

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band:	33 (1942)
Heft:	9
Rubrik:	Bericht über die Diskussionsversammlung des SEV : Höchstleistungsübertragung auf grosse Distanzen [Fortsetzung]

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: 22.02.2026

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

BULLETIN

REDAKTION:

Sekretariat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:

Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telephon 51742
Postcheck-Konto VIII 8481

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

XXXIII. Jahrgang

Nº 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

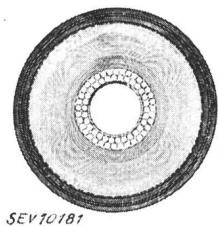
Zahlreiche Drehstromanlagen von 150 kV und 220 kV haben ihre Bewährungsprobe bestanden. Der verwendete Kabeltyp ist sozusagen ausschliesslich das Oelkabel; für Spannungen bis 150 kV sind auch Gasdruckkabel ausgeführt worden.

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-

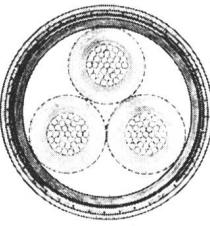
ren Ueberdruck von 1...3 kg/cm² steht, wird das durch Temperaturvariationen bedingte «Atmen» durch Uebertreten des sehr dünnflüssigen Imprägnieröles in Druck- und Speisegefässen bei Muffen und Endverschlüssen ermöglicht. Das Druckgas-Kabel, welches im allgemeinen als normales Massekabel ausgeführt ist, lebt unter einem beständigen äusseren Ueberdruck von etwa 15 kg/cm²; das Kabel wird zu diesem Zwecke entweder in eine Druckleitung eingezogen, oder es enthält eine entsprechend druckfeste Armatur (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 verselten 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-



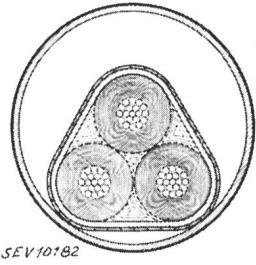
a



b

Fig. 1.
Oel-Kabel.

a Einleiter 132 kV. b Dreileiter 50 kV.



SEV 10182

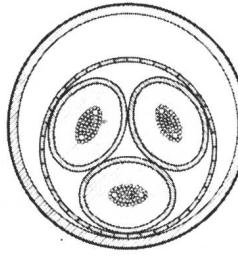


Fig. 2.
Massedruckkabel.

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-

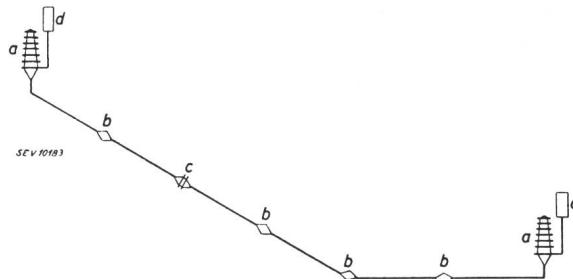


Fig. 3.
Prinzipielle Darstellung einer Oelkabelanlage.

- a Endverschluss.
- b gewöhnliche Muffe.
- c Sperr-Muffe.
- d Ausgleichsgefäß.

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

Kompensation 33 MVA erforderlich und Drosselspulen von 44 MVA installiert.

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

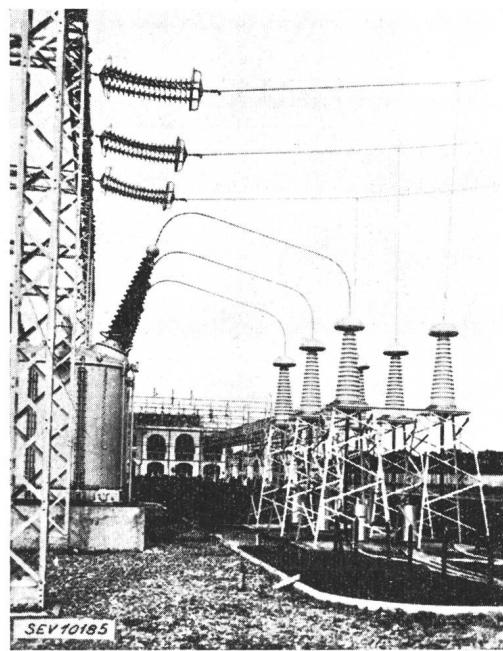


Fig. 4.
Anlage Cislago, 220 kV.
Erstellungsjahr 1932 (Pirelli, Mailand).

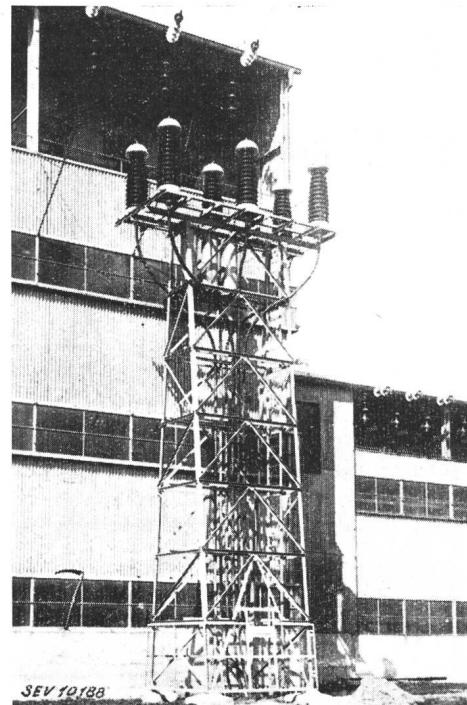


Fig. 5.
Anlage Töss, 150 kV.
Erstellungsjahr 1934 (Kabelwerke Brugg).

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 375Ω , jener des Kabels zu 50Ω . Aus dem Kurvenverlauf geht hervor, dass für Freileitungen die Zusatzblindleistung positiv oder negativ

sierung» einer Hochspannungskabelleitung muss daher prinzipiell durch Querdrosselpulen erfolgen, welche die Kabelblindleistung im Grenzfalle angehert kompensieren.

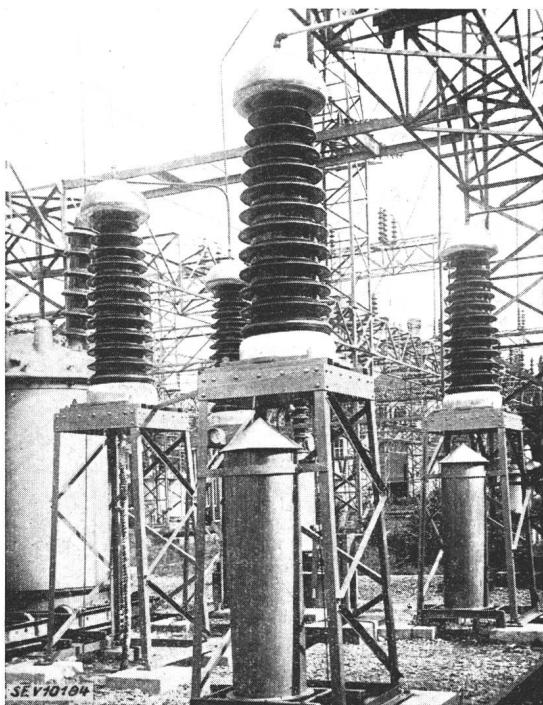


Fig. 6.
Anlage Rapperswil, 132 kV.
Erstellungsjahr 1935 (Kabelwerke Brugg).

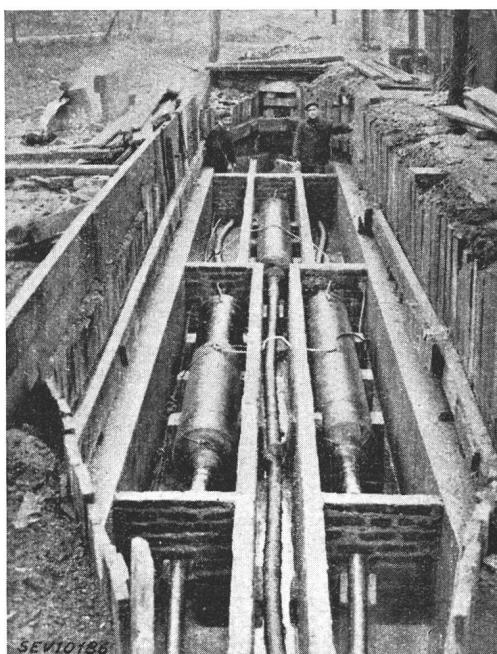


Fig. 7.
Anlage Paris, 220 kV.
Erstellungsjahr 1936 (Jeumont, Lyon, Clichy, Le Havre).

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



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

Diese grossen Kompensationsleistungen, verbunden mit den an sich hoheren Gestehungskosten einer Wechselstromkabelleitung sorgen in natürlicher Weise dafür, dass ein Kabel für Fernübertragung technisch zwar interessant ist, aber aus wirtschaftlichen Grunden 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 hiefür 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 Leitungstracs. Auch gibt es hin und wieder Strecken, wo die Er-

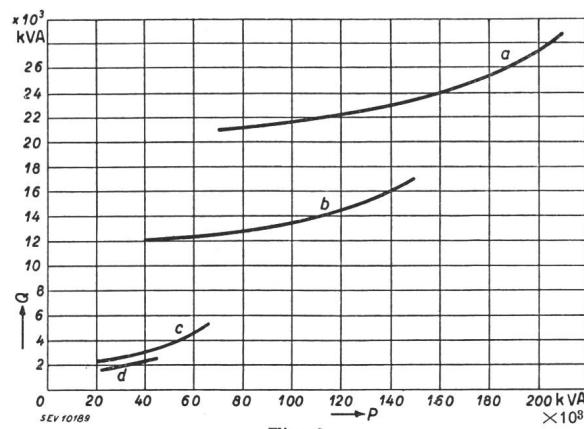


Fig. 9.
Ladeleistung Q einer Kabelleitung von 10 km Länge in
Funktion der zulässigen Uebertragungsleistung P .
a 220-kV-Oelkabel. b 150-kV-Oelkabel. c 50-kV-Oelkabel.
d 50-kV-Massekabel.

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 wäre¹⁾. Zwar besteht bei den Betriebsleuten ein

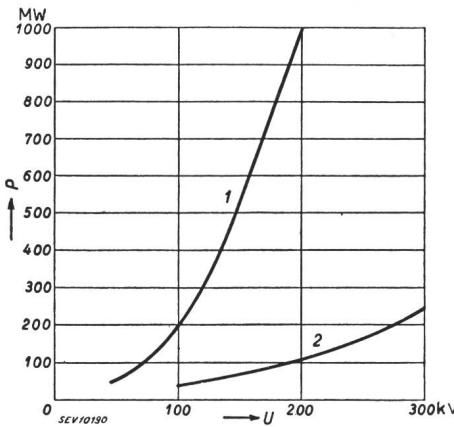


Fig. 10.

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

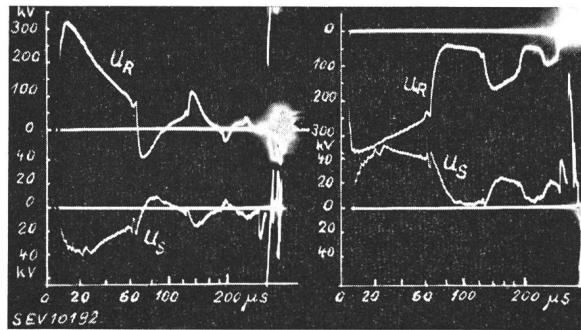


Fig. 11.

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

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

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

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

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

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

Wenn es sich anderseits um eine «pupinisierte» Hochspannungsleitung handelt, ist klar, dass der Beitrag der Kabelstrecke in der übrigen Kompen-sation einzukalkulieren ist.

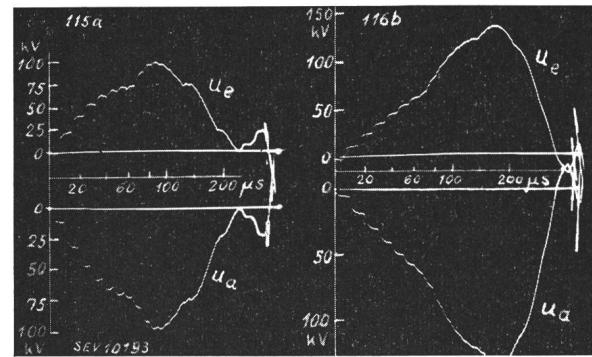


Fig. 12.

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

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

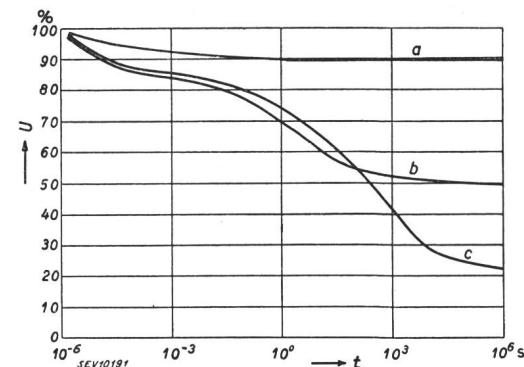


Fig. 13. Zeitdurchschlagskurven verschiedener Kabel.

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

Hauptgrund hiefür 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-

in einige Sätze über die Anlage Moûtiers - Lyon (Fig. 14) zu zitieren. Thury sagt²⁾:

«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 Elektrikums 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 Verbindungsleitungen 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 Savoyon 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 Ehrenperger 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 benutzen. 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 Kathodenstrahlzosillograph 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 mm² 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.

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

Mechanische Freileitungsmodelle

Vortrag¹⁾, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 13. Dezember 1941 in Zürich,
von G. Hunziker, Baden

621.315.1.00157

Es wird gezeigt, wie die rechnerisch schwierig zu erfassenden statischen und dynamischen Vorgänge, die bei gespannten Seilen, z.B. Freileitungen, auftreten, durch Modellversuche auf Grund einer Modelltheorie des Verfassers quantitativ bestimmt werden können. An einigen Beispielen wird dargelegt, in welch vielfältiger Weise diese Modelltheorie und die darauf gestützten Versuche bei der Leitungsplanung nützlich sein können.

Il est démontré que les processus statiques et dynamiques qui entrent en jeu dans les câbles tendus (lignes aériennes p. ex.) et qui sont fort malaisés à déterminer par le calcul, peuvent l'être quantitativement par des essais sur modèle, basés sur une théorie des modèles mise au point par l'auteur. Quelques exemples prouvent toute l'utilité de cette théorie et des essais qui s'y rattachent, pour l'établissement des projets de lignes aériennes de tous genres.

1. Allgemeines

Zahlreiche statische und dynamische Vorgänge, die sich auf Freileitungen zufolge des Einwirkens äusserer Kräfte abspielen, lassen sich rechnerisch entweder nur näherungsweise oder aber überhaupt nicht erfassen. Solche Vorgänge können jedoch die Betriebssicherheit einer Uebertragungsanlage unter Umständen entscheidend beeinflussen, so dass sie bei der Ausgestaltung und Dimensionierung der Leitungen entsprechend zu berücksichtigen sind.

Beispielsweise ist die Ermittlung der genauen statischen Seillage bei grossen Spannweiten in rauhreifgefährdeten und schneereichen Gebieten besonders bei ungleichmässig verteilter Zusatzlast für die Betriebssicherheit der Leitung und für deren unmittelbare Umgebung von grosser Bedeutung. Die rechnerisch genaue Erfassung dieses Problems, das sich z. B. bei Gebirgsleitungen stets stellen wird, stösst besonders bei grossen Spannweiten und bei beträchtlichen Zusatzlasten auf erhebliche Schwierigkeiten und ist ausserdem sehr zeitraubend.

Für die Wahl der Leiterabstände, des Mastbildes, des Leitermaterials und der Montagespannung ist die Kenntnis der Schnellhöhe von grösster Wichtigkeit. Als Schnellhöhe eines Seils wird jene extreme Seillage bezeichnet, die das Seil nach dem Abfallen der gleichmässig oder ungleichmässig verteilten Zusatzlasten einnimmt. Die rechnerische Erfassung der durch den Lastabwurf eingeleiteten dynamischen Vorgänge ist bis heute nur teilweise und unter vereinfachenden Annahmen geglückt. Sie ist jedoch auch näherungsweise noch nicht möglich für die dynamischen Vorgänge zufolge partiellem oder zeitlich gestaffeltem Lastabwurf an Seilen zwischen Trag- oder Stützwinkelmasten mit auslenkbaren Hängeketten, zwischen Pendelmasten usw.

Ausser diesen erwähnten Erscheinungen gibt es noch zahlreiche statische und dynamische Vorgänge auf Seilen zwischen Abspann- und Stützmasten, die sich rechnerisch nicht oder nur unvollkommen durch sehr zeitraubende Näherungsverfahren erfassen lassen.

Es besteht daher unbestritten das Bedürfnis, sich die fehlenden Kenntnisse im Interesse der Betriebssicherheit und der Wirtschaftlichkeit der Uebertragungsanlage auf andere Weise zu beschaffen.

Auf vielen Gebieten der Technik erwies sich die Nachbildung von statischen und dynamischen Vorgängen an Modellen als ausserordentlich aufschlussreich für alle Probleme, die der Rechnung nicht

oder nur schwer zugänglich sind. Daher wurde der Versuch unternommen, mechanische Modelle für Freileitungen zu entwickeln, welche ein geometrisch ähnliches Abbild der zu untersuchenden Leitungsstrecke darstellen und an welchen die interessierenden Fragen statischer und dynamischer Natur untersucht werden können. Solche Freileitungsmodelle, die in der Herstellung weit geringere Kosten verursachen als eine Versuchleitung in natürlicher Grösse und die in geschlossenen Räumen aufgebaut werden können, dürften daher für den Leitungsbauer sowie für die Besitzer von Leitungen zur Abklärung der oben angedeuteten Probleme und der Störungsursachen an bestehenden Leitungen von beträchtlichem Nutzen sein.

2. Die mechanische Ähnlichkeit

Es ist zunächst zu prüfen, ob es überhaupt möglich ist, ein geometrisch der Freileitung ähnliches Gebilde zu schaffen, an welchem die Bewegungsvorgänge mechanisch (dynamisch) ähnlich verlaufen, wie an der interessierenden Hauptausführung.

Definition der mechanischen Ähnlichkeit und Bezeichnungen

Zwei Vorgänge werden als mechanisch ähnlich bezeichnet:

a) wenn die Systeme, auf denen sich die Vorgänge abspielen, geometrisch ähnlich sind und wenn die Bewegungen, die sich an den Systemen abspielen, geometrisch ähnlich verlaufen;

β) wenn die homologen Grössen der gleichen physikalischen Art (Kräfte, Gewichte, Massen, Zeiten, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen) zu einander in einem festen, ebenfalls stets gleichbleibenden Verhältnis stehen, das für jede Art der zu vergleichenden Grösse verschieden sein kann.

Der Längenmaßstab des Modells werde mit $1 : \lambda$ bezeichnet; also ist das

Verhältnis entsprechender Längen $= \lambda$
Es sei das Verhältnis entsprechender Kräfte $= \kappa$
das Verhältnis entsprechender Zeiten $= \tau$
das Verhältnis entsprechender Massen $= \mu$

Damit die Vorgänge an der Freileitung und an dem sie darstellenden Modell ähnlich verlaufen, damit also alle Massenteilchen ihre Bewegungen frei unter der Wirkung der sie beeinflussenden natürlichen Kräfte ausführen, müssen die Bewegungsgleichungen beider Vorgänge vollständig miteinander übereinstimmen. Gemäss den Gesetzen der Ähnlichkeitsmechanik²⁾ ist diese Bedingung er-

¹⁾ Vgl. Weber, Schiffbautechn. Gesellschaft, 1919, 20. Bd., Grundlagen der Ähnlichkeitsmechanik, und die Publikation des Verfassers «Theorie gespannter Seile. Schnellhöhe und Modellmechanik». Verlag Gebr. Leemann A.-G., Zürich 1942.

²⁾ Auszug aus einer Publikation, die demnächst im Verlag Gebr. Leemann A.-G. in Zürich erscheinen wird.

füllt, wenn zwischen den Verhältnissen λ , τ , κ und μ die Bertrandsche Bedingungsgleichung

$$\kappa = \mu \cdot \frac{\lambda}{\tau^2} \quad (1)$$

erfüllt ist und wenn alle an der Hauptausführung und am Modell wirkenden Kräfte F — bzw. F_m — zu jeder Zeit und in jedem Punkt im gleichen Kräfteverhältnis κ stehen. Es müssen also die weiteren Bedingungsgleichungen erfüllt sein:

$$\kappa = \frac{F}{F_m} = \frac{F_1}{F_{1m}} = \dots \quad (2)$$

Im folgenden tragen alle Größen, die sich auf das Modell beziehen, den Index m .

3. Die Modellgesetze

Durch die Modellgesetze werden die von der Art der wirkenden Kräfte abhängigen Beziehungen zwischen den linearen und zeitlichen Größen der beiden Vergleichsvorgänge festgelegt.

Allgemein kann festgehalten werden, dass die statischen und dynamischen Vorgänge auf Freileitungen im wesentlichen durch die Schwerkraft, die elastischen Kräfte und durch die durch diese beiden Kräftearten resultierenden Massenbeschleunigungs Kräfte bedingt sind.

Der Leiter soll frei von inneren Torsions- und Biegungsspannungen, sowie frei von Scheerbeanspruchungen sein. Der Luftwiderstand werde vernachlässigt.

Diese für die Berechnungen im Leitungsbau üblichen Voraussetzungen sollen auch für das Modell gelten.

Durch Gleichsetzung der Verhältnisse der Schwerkräfte, der elastischen Kräfte und der Massenbeschleunigungs Kräfte lassen sich die Modellgesetze bei gleichbleibender Erdbeschleunigung g anschreiben. Das Verhältnis λ entsprechender Längen ergibt sich zu

$$\lambda = \frac{E}{E_m} \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma} \quad (3)$$

Dabei bedeutet E , E_m den Elastizitätsmodul, γ , γ_m das spezifische Gewicht des Leiters der Hauptausführung bzw. des Modells. Der Quotient $\frac{E}{E_m}$ bzw. $\frac{\gamma_m}{\gamma}$ bedeutet die homologen dynamischen Elastizitätsmaße, so dass sich Gl. 3 in Worten wie folgt ausdrücken lässt:

Das Verhältnis λ entsprechender Längen ist gleich dem Verhältnis der dynamischen Elastizitätsmaße der Hauptausführung und des Modells.

Die Beziehungen zwischen dem Verhältnis homologer Längen und Zeiten lautet

$$\tau = \sqrt{\lambda} \quad (4)$$

Wird mit λ'^2 das Verhältnis entsprechender Leiterquerschnitte q bezeichnet, wobei die Durchmes-

ser der Leiter sich nicht wie λ verhalten müssen, ist also

$$\frac{q}{q_m} = \lambda'^2$$

so schreibt sich das Verhältnis homologer Kräfte zu

$$\kappa = \frac{E}{E_m} \cdot \lambda'^2 \quad (5)$$

Auf Grund der Maßstabregel der Ähnlichkeitsmechanik und mit Hilfe von Gl. 4 lässt sich das Verhältnis ε homologer Geschwindigkeiten ermitteln aus der Formel

$$\varepsilon = \frac{v}{v_m} = \frac{\lambda}{\tau} = \sqrt{\lambda} = \tau \quad (6)$$

d. h. die homologen Geschwindigkeiten verhalten sich gleich wie die entsprechenden Zeiten.

Weil Hauptausführung und Modell derselben Erdbeschleunigung g ausgesetzt sind, müssen die übrigen Beschleunigungen, denen die homologen Massen ausgesetzt sind, ebenfalls für Hauptausführung und Modell gleich gross sein, so dass das Verhältnis $\frac{b}{b_m}$ homologer Beschleunigungen gleich 1 ist. Dieses Ergebnis lässt sich auch auf Grund der Maßstabregel und mit Hilfe von Gl. 4 ableiten:

$$\frac{b}{b_m} = \frac{\lambda}{\tau^2} = \frac{\lambda}{(\sqrt{\lambda})^2} = 1 \quad (7)$$

Damit nun das Längenverhältnis λ von 1 verschieden wird, müssen gemäss Gl. 3 die dynamischen Elastizitätsmaße $\frac{E}{\gamma}$ des Seils der Hauptausführung und des Modell-Leiters voneinander verschieden sein. Wünschenswert wäre, einen Werkstoff zu besitzen, dem ein beliebiges dynamisches Elastizitätsmaß gegeben werden könnte, um dadurch in der Wahl des Modellmaßstabes $1 : \lambda$ frei zu sein. Kein bekanntes Material erfüllt diese Bedingung. Vergleicht man die dynamischen Elastizitätsmaße der Werkstoffe miteinander, aus welchen Leitungen gebaut und Modelle nachgebildet werden könnten, gelangt man zum Ergebnis, dass die Herstellung von Freileitungsmodellen aus normalen Drähten, Litzen oder Seilen nicht in Frage kommt, weil die dynamischen Elastizitätsmaße $\frac{E}{\gamma}$ zu wenig verschieden voneinander sind und weil es nicht zweckentsprechend ist, auf die Materialkonstanten angewiesen und nicht frei in der Wahl des Längenmaßstabes zu sein.

Es lässt sich nun zeigen, dass das dynamische Elastizitätsmaß von Spiralfedern durch geeignete Dimensionierung der Federabmessungen und durch geeignete Wahl des Drahtdurchmessers und des Drahtmaterials in beliebig weiten Grenzen den Erfordernissen von Freileitungsmodellen angepasst werden kann, wodurch erreicht ist, dass Hauptausführungen aus beliebigem Leitermaterial mittels geeigneter konstruierten Spiralfedern in jedem

wünschbaren Maßstab zur Darstellung gebracht werden können. Die Industrie³⁾ stellt die Federn heute mit der erforderlichen Präzision und Homogenität her.

4. Versuche an Freileitungsmodellen

Durch Versuche liess sich die Brauchbarkeit der entwickelten Modelltheorie bestätigen.

Bei der einen Versuchsserie wurden die statischen und dynamischen Vorgänge (Zustandsänderungen, Schnellhöhe) mit Hilfe von neu entwickelten Formeln für eine Modellausführung vorausberechnet, welche eine fiktive Hauptausführung im Maßstab 1 : 40 000 zur Darstellung brachte. Das untersuchte Modell würde einer rein theoretischen Spannweite von 200 km entsprechen.

Bei einer weiteren Versuchsserie wurden die entsprechenden Vorgänge (Zustandsänderungen und Schnellhöhen) für eine Spannweite von 1500 m vorausberechnet und die Ergebnisse der Rechnung mit Hilfe der Modellmaßstäbe auf das Modell umgerechnet, das die Hauptausführung im Maßstab 1 : 304 darstellte.

Die Berechnung der statischen und dynamischen Erscheinungen liess sich in beiden Fällen am Modell überprüfen. Weitere Versuche erstreckten sich auf Modelle, die gewisse Spannweiten in den Maßstäben 1 : 10 bis 1 : 800 darstellten.

Die Uebereinstimmung der Versuchsergebnisse mit den berechneten Resultaten für alle erwähnten Modellmaßstäbe war bei den statischen und dynamischen Vorgängen überaus befriedigend. Frühere Messungen an belasteten und unbelasteten Seilen zur Kontrolle der Brauchbarkeit der Durchhangsberechnungen und Zustandsgleichungen können in diesem Zusammenhang als Kontrollversuche über statische Vorgänge an einer Hauptausführung angesprochen werden. Ferner wurde die Weg-Zeit-Funktion eines hochschnellenden Kupferseiles mittels Zeitlupenaufnahmen bestimmt. Diese an der Hauptausführung gemessene Funktion deckte sich mit grosser Genauigkeit mit der entsprechenden Funktion, die am Modell im Maßstab 1 : 85 ermittelt wurde, so dass diese Messung bestätigt, dass sich das Modell dynamisch ähnlich verhält, wie die Hauptausführung.

Es seien an dieser Stelle einige weitere Versuche, die an Freileitungsmodellen durchgeführt worden sind, kurz erläutert, um die vielseitige Verwendbarkeit der Modelle zu illustrieren.

a) Modell einer 1100-m-Spannweite

Eine Spannweite von 1100 m bei einer Höhendifferenz der Aufhängepunkte von 94 m wurde im Maßstab 1 : 780 dargestellt. Die Kurvenform des Bronzeseiles von 155 mm² Querschnitt und bei einer Scheitelspannung p_0 von 700 kg/cm² bei 0° C ist aus Fig. 1 ersichtlich. Das Erdseil (70 mm² Stahl) besitzt ebenfalls eine Scheitelspannung von 700 kg/cm² und bleibt unbelastet.

³⁾ Federnfabrik Baumann & Co. A.G. in Rüti (Zürich).

Der Modell-Leiter besitzt in Abständen von je 5 cm kleine Haken, an welchen die Zusatzlast in Form von Drahtstücken, deren Gewicht auf Grund des Kräftemaßstabes bestimmt wird, eingehängt

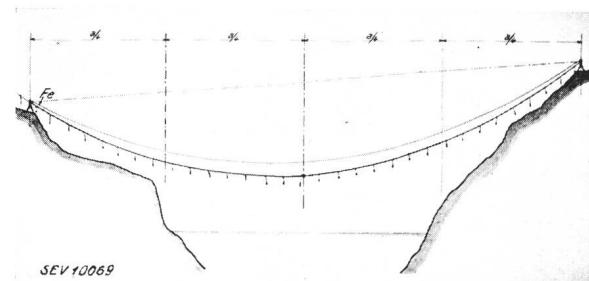


Fig. 1.
Leiterseil und Erdseil unbelastet.

werden kann. Ferner wird an den Haken die Schmelzvorrichtung befestigt, welche gestattet, die Zusatzlast am ganzen Leiter gleichzeitig, zeitlich gestaffelt oder partiell abfallen zu lassen.

Die Kurvenform des Seiles bei einer gleichmässig verteilten Zusatzlast von 5 kg/m ist aus Fig. 2 ersichtlich.

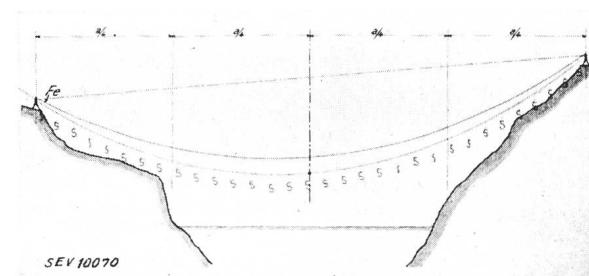


Fig. 2.
Leiterseil mit 5 kg/m belastet; Erdseil ohne Zusatzlast.

Wie bereits oben erwähnt, interessiert bei gewissen Spannweiten die statische Seillage bei ungleichmässig verteilter Zusatzlast. In Fig. 3 z. B. ist die 1100-m-Spannweite dargestellt, wenn die linke Hälfte der Spannweite mit einer Zusatzlast von

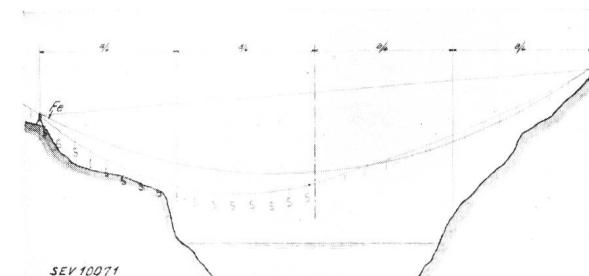


Fig. 3.
Linke Hälfte des Leiterseils mit 5 kg/m belastet; rechte Hälfte und Erdseil ohne Zusatzlast.

5 kg/m behangen und die rechte Hälfte ohne Zusatzlast ist. Die Gefahr der Bodenberührungen ist jedoch wesentlich ausgeprägter, wenn nur rd. $1/4$ der Spannweite mit 5 kg/m behangen ist, wie aus den

Fig. 4 und 5 hervorgeht. Die Seilmitte ist in den Fig. durch einen schwarzen Punkt markiert, welcher bei unsymmetrischer Lastverteilung die Längsverschiebung des Seils angibt.

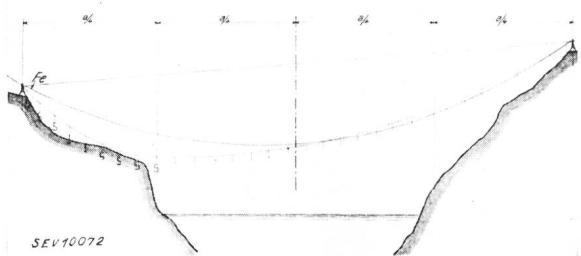


Fig. 4.
Ein Viertel des Leiterseils (links) mit 5 kg/m belastet;
Erdseil ohne Zusatzlast.

Der ungünstigste Belastungszustand lässt sich somit am Modell auf einfachste Weise bestimmen. Daraus ergeben sich die Unterlagen für die Bestimmung der Maststandorte und der definitiven Masthöhen.

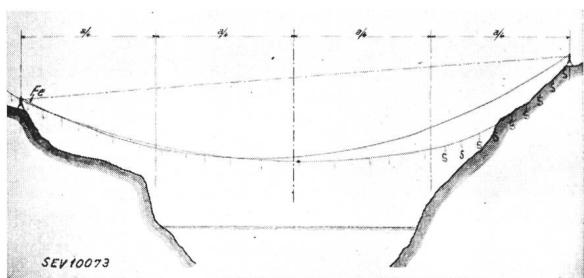


Fig. 5.
Ein Viertel des Leiterseils (rechts) mit 5 kg/m belastet;
Erdseil ohne Zusatzlast.

b) Schnellhöhe-Versuche an einer 1500-m-Spannweite

Die Bewegungsvorgänge des hochschnellenden Modelleiters werden mittels Zeitlupengerät (Aufnahmefrequenz 68 bis 130 Bilder pro Sekunde) gefilmt.

Für eine 1500-m-Spannweite bei einer Höhendifferenz der Aufhängepunkte von 120 m beträgt die Schnellhöhe eines Bronzeseils von 230 mm^2 Querschnitt, das bei 0°C eine Scheitelpfannung von 1018 kg/cm^2 besitzt, in der Mitte der Spannweite beim Abfallen einer gleichmässig über das ganze Seil verteilten Zusatzlast von 5 kg/m rd. $9,4 \text{ m}$, und beim Abfallen von 8 kg/m rd. $18,6 \text{ m}$. Wenn dagegen nur die Hälfte der Spannweite mit einer gleichmässig verteilten Zusatzlast behangen und die andere Hälfte frei ist, so ergeben die Modellversuche im Abstand von ca. $1/4$ der Spannweite vom tiefer liegenden Abspannmast aus beim Abfallen einer Zusatzlast von

5 kg/m eine Schnellhöhe von $64,5 \text{ m}$

und bei 8 kg/m eine Schnellhöhe von 78 m .

Diese erstaunlich hohen Werte, die auf rechneri-

schem Weg bisher überhaupt nicht ermittelt werden konnten, deuten darauf hin, dass die Leiter beim Hochschnellen und bei gleichzeitigem Seitenwind mit den Erdseilen, die sich im vorliegenden Fall bis 40 m über den Leitern befinden, zusammenschlagen können.

c) Weitere Modellversuche.

In Fig. 6 ist eine Spannweite einer durch die Motor-Columbus A.-G., Baden, in Vorschlag gebrachten und projektierten einpoligen 500-kV-Gleichstromleitung neuester Bauart dargestellt.

Die Abspannstrecke von 1600 m , die im Modell im Maßstab $1 : 314$ abgebildet ist, wird durch 4 Pendeltragmaste in A-Form unterteilt, die einen Mastabstand von je 400 m aufweisen. Die Mastspitzen sind durch ein Erdseil (200 mm^2 Stahl) miteinander verbunden. Der Leiter besteht aus 600 mm^2 Cu-Seil, ist an den Tragmasten mittels Hängeketten befestigt und ausserdem zwischen den Masten mit Isolatorenketten am Erdseil aufgehängt, so dass das Erdseil gleichzeitig als Tragseil für den Leiter dient. Diese Anordnung erlaubt, die Spannweiten des Leiters auf die Hälfte, also



Fig. 6.
Modell einer Katenarleitung mit Pendelmasten
(400 m Spannweite).

rd. 200 m und weniger und seinen Durchhang auf rd. $1/4$ und weniger herunterzubringen. Die Pendelmaste sind gelenkig auf den Fundamenten befestigt, so dass sie auch bei ungleichmässig verteilter Zusatzlast auf den Leitern keine Biegungsbeanspruchung in Leitungsrichtung aufnehmen müssen. Sowohl Mastgewicht als auch Fundamentkosten lassen sich auf diese Weise auf ein Minimum reduzieren.

Die analytische Erfassung von statischen und dynamischen Vorgängen auf solchen Leitungen bietet grosse Schwierigkeiten und ist bis jetzt nur teilweise gelückt. Mast- und Seilbewegungen sowie die Gleichgewichtslagen bei ungleichmässiger Zusatzlastverteilung können dagegen am Modell bei Beachtung der korrekten Uebertragungsmaststäbe für die Längen, Kräfte und Zeiten in zweckmässiger Weise untersucht werden, was die zuverlässigen Unterlagen für die betriebssichere Konstruktion solcher Leitungen liefert.

Zum Schluss sei noch auf einen Modellversuch hingewiesen, der zum Zweck hat, die Schlagbiegebeanspruchungen abzuklären, denen Abspannisolatorenketten beim Auftreffen von Transversalwellen ausgesetzt sein können. Die beim Abfallen von Zusatzlasten entstehenden Seilwellen laufen auf den Abspannketten auf und werden dort reflektiert. Dadurch werden die Isolatoren ausser auf Zug auch auf Biegung beansprucht. Um über die Grösse der

Beanspruchung einen Begriff zu erhalten, wurde eine Isolatorenkette im Längenmaßstab 1 : 119 dargestellt und als massentreue Abspannkette in einem Modell eingebaut, das einer Spannweite von 585 m entsprach. Die Bewegungen der einzelnen Kettenglieder nach dem Lastabwurf wurden gefilmt. Aus den Zeitlupenaufnahmen konnten der zeitliche Verlauf und die absoluten Größen der Beschleunigungen ermittelt werden, die die Kette unter der Einwirkung der Seilwellen erfuhr und welche Isolatoren und Klöppel heftigen Schlagbiegebeanspruchungen ausgesetztten. In Fig. 7 ist die Modellkette mit einem kurzen Leiterstück der 585-m-Spannweite dargestellt.

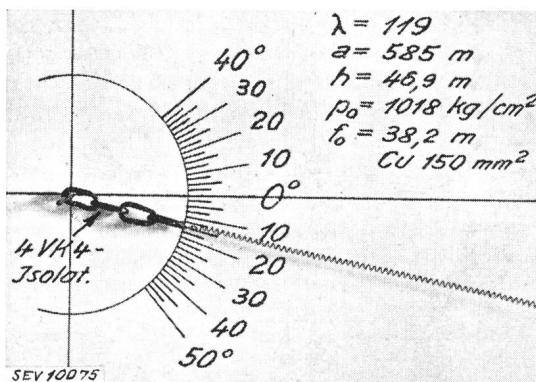


Fig. 7.
Modell einer 4gliedrigen Abspannisolatorenkette mit einem kurzen Modell-Leiterstück.

Einer wirklichen Isolatorenkette konnten mittels sehr kräftiger Federn dieselben Beschleunigungen erteilt werden, die aus den Modellversuchen ermittelt worden sind. Auf diese Weise ist es möglich, festzustellen, ob die Isolatoren bei den Verhältnissen, die sich im ungünstigsten Fall in der Natur bieten, zu Bruch gehen oder ob sie den zufolge der Peitschenschläge auftretenden Schlagbiegebeanspruchungen gewachsen sind.

d) Messgenauigkeit.

Die Modellversuche bestätigen, dass die statischen Messungen auf $1/10$ mm und die dynamischen Messungen aus dem Film auf mindestens 1 mm genau durchgeführt werden können. In der Hauptausführung entspricht dies bei einem Modellmaßstab von 1 : 300 einer grössten Ungenauigkeit von 3 cm für die statischen und 30 cm für die dynamischen Vorgänge.

Aus diesem Ergebnis kann der Schluss gezogen werden, dass Messungen am Modell für die praktischen Bedürfnisse des Leitungsbauwerks genügend genaue Resultate ergeben, die an Genauigkeit den üblichen Näherungsberechnungen ebenbürtig, in vielen Fällen sogar sehr beträchtlich überlegen sind. Es mag auch noch darauf hingewiesen sein,

dass der Zeitbedarf für die Durchführung von Untersuchungen an vorhandenen Modellen unvergleichlich viel kleiner ist, als der Arbeitsaufwand für die rechnerische Erfassung eines Leitungsbauproblems.

5. Zusammenfassung.

Es ist bekannt, dass zahlreiche statische und dynamische Vorgänge auf Freileitungen rechnerisch nur annäherungsweise oder überhaupt nicht erfasst werden können. Auf vielen Gebieten der Technik hat sich die Durchführung von Modellversuchen zur Abklärung nicht erfassbarer Vorgänge als ausserordentlich wertvoll erwiesen. Auf Grund der Gesetze der Aehnlichkeitsmechanik werden die Modellgesetze erläutert, die erfüllt sein müssen, wenn sich ein Modell einer Freileitung mechanisch (dynamisch) ähnlich verhalten soll, wie die Hauptausführung. Die Modellgesetze sind gültig für den Fall, dass die statischen und dynamischen Vorgänge im wesentlichen durch die Schwerkraft und die elastischen Kräfte bedingt sind. Diese Forderung ist bei den allermeisten Leitungsbauproblemen erfüllt.

Die Schlussfolgerungen aus den Modellgesetzen führen dazu, Freileitungsmodelle aus Spiralfedern oder einem kombinierten elastischen Material herzustellen. Dabei ist man in der freien Wahl des Modellmaßstabes von irgendwelchen Materialkonstanten weitgehend unabhängig.

Modellversuche beweisen, dass die aufgestellte Modelltheorie durchaus brauchbar ist. Es werden Versuchsanordnungen beschrieben, welche das grosse Anwendungsgebiet der Freileitungsmodelle illustrieren. Diese bilden ein wertvolles Werkzeug in der Hand des Leitungsbauers, welches ihm gestattet, bis jetzt unlösbare Probleme im Interesse der Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit der Uebertragungsanlage mit grosser Genauigkeit innert kürzester Zeit zu lösen. Die Modelle sind auch dazu berufen, die zeitraubenden und umständlichen Näherungsberechnungen aus dem Gebiete des Leitungsbauwerks weitgehend zu verdrängen, da sie die gewünschten Resultate bei kleinem Zeitaufwand mit einer Genauigkeit liefern, welche mit den üblichen Rechnungsmethoden kaum erreicht wird.

Für die Besitzer von Leitungen bilden die Modelle ein Hilfsmittel, mit welchem gefährdete Leitungsstrecken abgebildet und Störungsursachen durch entsprechende Versuche festgestellt werden können. Auf diese Weise lassen sich die Unterlagen für die Elimination von Störungsherden beschaffen.

Die skizzierte Methode der Modelldarstellung lässt sich natürlich auf alle Bauten und Anlagen mit gespannten Drähten und Seilen anwenden. Sie wird sich daher auch für die Nachbildung von statischen und dynamischen Erscheinungen auf Seilbahnen, Hängebrücken, Ankerseilen usw. als nützlich und wertvoll erweisen.

Diskussion

Der Vorsitzende, Herr Dr. h. c. M. Schiesser, Präsident des SEV, dankt allen Referenten herzlich für die Vorträge und eröffnet die Diskussion.

Herr Prof. Dr. F. Niethammer, Deutsche Technische Hochschule Prag: Vor allem danke ich Herrn Präsident Dr. Schiesser für die mir bei der Eröffnung gewidmeten warmen Worte der Begrüssung aufs herzliche. Ich danke dem Schweizerischen Elektrotechnischen Verein für die freundliche Einladung zu dieser äusserst aktuellen Tagung. Meine Beziehungen zu Ihrem Verein und zur Schweizer Elektroindustrie sind ja nicht von heute, zähle ich doch zu den älteren Vereinsmitgliedern und vor kurzem hat Ihr Verein mir sogar die Ehre erwiesen, mich zum Freimittglied zu ernennen.

Ich bin schon immer ein ausgesprochener Freund des «alten» Gleichstromes gewesen — das datiert schon seit etwa 1900 —, und ich freue mich deshalb ganz besonders, heute bei dieser Tagung zur feierlichen Einführung des hochgespannten Gleichstromes in die Grossleistungsübertragung auf weite Distanzen durch massgebende Fachleute persönlich anwesend sein zu können. Dass gerade der Schweizerische Elektrotechnische Verein diese Tagung veranstaltet, halte ich für wohl begründet. Wenn auch die in der Schweiz vorliegenden Distanzen zweifellos mit Drehstrom noch völlig beherrscht werden können, so hat doch die schweizerische Elektroindustrie und speziell Ihr Präsident auf dem Gebiete des hochgespannten Gleichstromes und insbesondere der dazu erforderlichen Stromrichter ganz grundlegende Arbeit geleistet, wie das ja auch aus dem heutigen Tagungsprogramm zu ersehen ist. Dazu kommt ein wichtiger historischer Grund: Vor 50 Jahren hat die Drehstromübertragung Lauffen-Frankfurt, die ja von der Schweizer Elektroindustrie auch ganz massgebend gefördert wurde¹⁾, die ungeheure Entwicklung des Drehstromes eingeleitet. Trotzdem begann um diese selbe Zeit der Schweizer Ingenieur Thury²⁾ in Genf seine genialen Arbeiten mit hochgespanntem Gleichstrom von konstanter Stromstärke. Schon als ganz junger Ingenieur habe ich die Einfachheit und Vielseitigkeit dieser Thury-Anlagen im Val de Travers und von St. Maurice nach Lausanne bewundern können. Sie erreichten dann in der französischen Anlage Moutiers-Lyon 125 000 V, geplant waren dort schon ernstlich 300 000 V. Ihr Altmäister Thury hat immer wieder und mit Recht auf die grossen Vorteile des Systems mit konstanter Stromstärke, wo man nicht ausschaltet, sondern kurzschliesst, hingewiesen, für die Abzweigungen beim Konstantspannungssystem in vermaschten Netzen, wie sie Herr Ehrenspurger erwähnt hat, fehlen uns vorläufig noch die Schalter. Aber Thury hat auch bereits die Erdrückleitung mit 2×150 A praktisch erprobt und Erdkabel für hochgespannten Gleichstrom mit Vorteil benutzt. Ich bin überzeugt, dass der Vorredner, Herr Müller, von den Kabelwerken Brugg, noch seine Freude mit den Gleichstromkabeln haben wird.

Mathematisch veranlagte Ingenieure können an der Theorie langer Leitungen und den zugehörigen Wechselfällen, Schalt- und Schwingungsvorgängen ihre helle Freude haben. Wir nähern uns da der Hochfrequenztechnik, da sehr grosse Längen ähnlich wirken wie hohe Frequenz. Die Theorie zeigt aber, wie das Dr. Wanger so ausgezeichnet behandelt hat —, dass bei langen Leitungen die Spannungs- und Leistungsverhältnisse recht unübersichtlich, ja unstabil werden, ja dass unter Umständen ein Betrieb unmöglich wird, wenn nicht eine sorgfältig verteilte Pupinisierung oder Kompensation angeordnet wird. Es versagt da schliesslich der Drehstrom infolge seiner Kompliziertheit gegenüber dem Gleichstrom, der in seiner unübertrefflichen Einfachheit mit dem Ohmschen Gesetz in seiner primitivsten Form auskommt, gleichgültig ob man Kabel oder Freileitung benutzt. Allerdings sind es nun die Stromrichter am Anfang und Ende der Leitung und ihre Oberwellen, welche viel Entwicklungs- und Forschungsarbeit verlangen, ja eine völige Umstellung des Elektroingenieurs von den den ganzen Elektromaschinenbau in so exakter Weise beherrschenden

Maxwellschen Gleichungen auf die ganz anders geartete Elektrotheorie. Es soll aber hier auch einmal laut betont werden, dass der Quecksilberdampf-Stromrichter mit seiner flüssigen, stets gleichbleibenden Kathode eine ganz wunderbare Einrichtung ist, die schon einen sehr hohen Grad der Betriebssicherheit erreicht hat.

Sie wissen, dass es auch andere Gebiete gibt, wo der Gleichstrom ebenfalls die ultima ratio ist. Schwierige Motortriebe bis zur grössten Reversierwalzenstrasse lassen sich nur mit dem Gleichstrommotor bewältigen. Hätte man dieselbe Forschungs- und Entwicklungsarbeit, die man den Einphasenmotoren — ich kenne ja diese Brüder auch genau — und dem ganzen Einphasenbahnsystem gewidmet hat, auf Gleichstrom von 4000 bis 6000 V oder mehr Fahrdrähtspannung verwendet, so hätten wir bezüglich Wirtschaftlichkeit und Betriebsicherheit ein ganz vorzügliches Bahnsystem schaffen können.

Wir müssen uns also wieder mehr mit Gleichstrom beschäftigen, der auch seine Tücken hat, und deshalb begrüsse ich diese Tagung aufs herzlichste und beglückwünsche den Präsidenten Dr. Schiesser zu diesem ausgezeichneten Erfolg.

Der Vorsitzende: Ich möchte Herrn Prof. Niethammer für sein Votum sehr danken. Es war verblüffend, festzustellen, mit welch jugendfrischer Art und mit welcher Begeisterung dieser alte Pionier der Elektrotechnik sich mit den Fragen der technischen Zukunft auseinandersetzt. Als sich Herr Ehrenspurger heute morgen zur Systemfrage so positiv eingestellt hatte, dachte ich mir gleich, es werde der eine oder andere unter uns auf den Plan gerufen. Nun ist schon ein Gegenpol entstanden: Herr Ehrenspurger — und übrigens auch ich — befürwortete das Konstantspannungssystem, Herr Prof. Niethammer das Konstantstromsystem. Darüber allein könnte man sich lange unterhalten.

Weiter gefreut hat mich auch die Begeisterung, mit der Herr Prof. Niethammer das jüngste Gebilde der Elektrotechnik, den Quecksilberdampfmutator, behandelt. Es ist in der Tat noch gar nicht abzusehen, wo diese Entwicklung enden wird — vielleicht in der drahtlosen Energieübertragung —; dann kommen wir aber in das Gebiet der Hochfrequenz (Zur Prof. Niethamers: Tesla!).

Ich möchte Herrn Prof. Niethammer nochmals herzlich danken und das Wort Herrn Darrieus erteilen. Auch Herrn Darrieus brauche ich Ihnen nicht vorzustellen. Er hat schon verschiedentlich in unsren Kreisen das Wort ergriffen. Vielleicht hören wir von ihm, ob er mit dem einen oder andern der Herren Referenten nicht einverstanden ist.

M. G. Darrieus, Lyon: Les caractères généraux du comportement des très longues lignes à courant alternatif et les conclusions du rapport très intéressant du Dr Wanger peuvent être aisément obtenus par la considération de l'ellipse qui, en admettant toujours des pertes nulles, représente, dans le cas le plus général, le diagramme des tensions le long de la ligne et peut être considérée comme résultant de la superposition, soit de deux régimes alternatifs stationnaires, par exemple à vide et en court-circuit, convenablement déphasés, soit de deux ondes mobiles directe et inverse, représentables chacune par un cercle, mais avec sens de parcours opposés (fig. 1).

Comme les différentes ellipses correspondant à tous les régimes possibles de fonctionnement ont un même centre coïncidant avec l'origine des coordonnées, la condition de passer toutes par l'extrémité A du vecteur OA figurant la tension à l'arrivée, entraîne pour ces ellipses la condition de se recouper également au point A' diamétralement opposé, qui correspond à une longueur de ligne d'une demi-onde ou de 3000 km à 50 Hz, de sorte que l'équivalence, tant au point de vue de la stabilité que de celui de la synchronisation (qui n'introduit d'ailleurs pas de condition nouvelle), d'une ligne de longueur quelconque avec une raccourcie d'un nombre entier quelconque de demi-longueurs d'onde, est ainsi établie immédiatement.

Il peut d'autre part être montré que les points homologues des diagrammes relatifs à deux régimes quelconques d'une même ligne se correspondent entre eux par une simple projection cylindrique, ce qui permet de tracer aisément l'é-

¹⁾ Bulletin SEV 1941, Nr. 18, S. 425.

²⁾ Bulletin SEV 1930, Nr. 5, S. 157.

lipse afférente à un régime particulier caractérisé par exemple par la tension OC' donnée au départ de la ligne à partir de celle relative à un autre régime quelconque, par exemple du cercle ABC représentatif du fonctionnement à la puissance naturelle pour laquelle la tension au départ est OC et l'angle $\phi = AOC$ mesure la longueur de la ligne. Le point C' de l'ellipse se détermine ainsi à partir du point homologue C

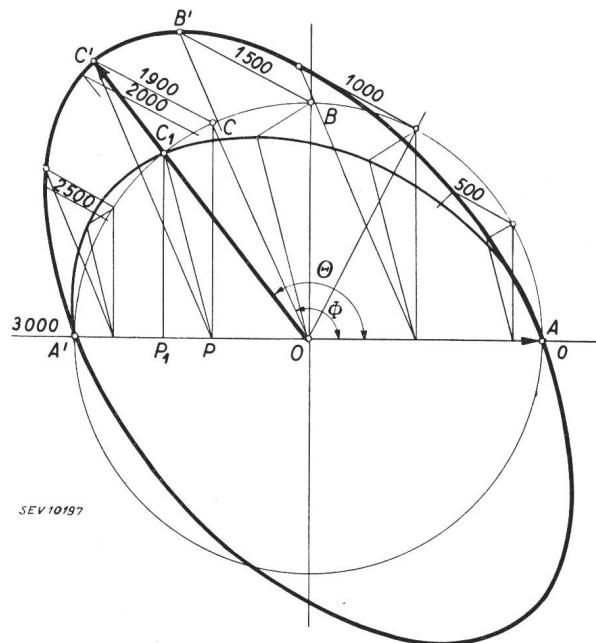


Fig. 1.

Diagramme des tensions le long d'une ligne sans pertes.

du cercle, en construisant le triangle CPC' semblable au triangle BOB' que forment les deux diamètres conjugués du diamètre commun $A'OA$, respectivement dans le cercle et dans l'ellipse.

Cette propriété projective des diagrammes relatifs aux divers régimes de fonctionnement subsiste d'ailleurs dans le cas général d'un quadripôle passif quelconque sans pertes, pouvant comporter, outre une ou plusieurs lignes à constantes réparties, une chaîne arbitraire de capacités ou d'inductances. La proportionnalité de la puissance transmise au sinus de l'angle Θ entre les vecteurs tension, au départ et à l'arrivée, établie par le Dr Wanger dans le cas qu'il a envisagé d'une réactance X en série avec une ligne, subsiste dans ce cas général et découle du fait que les puissances transmises pour deux régimes quelconques sont simplement proportionnelles aux ordonnées respectives de deux points homologues arbitraires des deux ellipses correspondantes.

L'intérêt qui s'attache à la considération du diagramme général des tensions le long de la ligne est encore accru par la conformité qu'il présente avec le type de modèle mécanique que nous avons proposé en 1925¹⁾ et que les Américains ont utilisé à diverses reprises pour traiter les problèmes de stabilité. Comme nous l'avons montré en 1928 dans une étude générale sur l'emploi des modèles mécaniques en électrotechnique²⁾, la substitution aux tensions des flux dont ces tensions sont les dérivées, comme grandeurs représentées par les rayons vecteurs du diagramme, étend la portée de représentation du modèle, du cas seul ordinairement considéré d'un régime permanent à fréquence constante, au cas tout à fait général d'un régime varié ou transitoire absolument quelconque. Dans cette interprétation, la chaîne d'inductances constituant la ligne est représentée par un ressort dont la tension en chaque point correspond au courant et dont la

¹⁾ G. Darrieus, Quelques problèmes relatifs à l'interconnexion de réseaux bouclés d'extension indéfinie. Conférence Internationale des Grands Réseaux Électriques. Paris 1925, tome I, p. 227..255.

²⁾ G. Darrieus, Les modèles mécaniques en électrotechnique; leur application aux problèmes de stabilité. Bulletin de la Société Française des Électriciens 1929, p. 794..809.

masse correspond d'autre part à la capacité répartie. Sous l'influence de la force centrifuge développée par la rotation du modèle à la vitesse angulaire ω , et qui représente le courant de capacité, le ressort au lieu de conserver, comme dans l'emploi usuel élémentaire du modèle, une forme rectiligne entre le point de départ et le point d'arrivée, s'incurve entre ces points précisément suivant l'arc d'ellipse qui représente, dans le diagramme des tensions, en régime permanent de pulsation ω , la chaîne des chutes de tension inducives le long de la ligne.

Une telle interprétation mécanique du diagramme des tensions contribue beaucoup à rendre intuitives les manifestations complexes du régime variable et va nous permettre de montrer que, contrairement à l'opinion courante, le fonctionnement d'une longue ligne de transmission à fréquence quelconque peut être maintenu artificiellement stable, quelle que soit sa longueur, même lorsque celle-ci est comprise entre un nombre impair et le nombre pair consécutif de quarts d'onde, c'est-à-dire dans les intervalles pour lesquels la stabilité statique n'est plus réalisée.

Supposons, par exemple, que, dans le cas d'une ligne à 50 Hz, d'une longueur de 1900 km, comprise par conséquent dans l'intervalle instable de 1500 à 3000 km, le vecteur tension au départ OC prenne une avance accidentelle et se trouve ainsi porté en OC_1 en avance de Θ sur la tension à l'arrivée OA . Comme nous l'avons vu, la puissance transmise se trouve alors réduite dans le rapport des ordonnées $P_1C_1 : PC$, ce qui, si le couple moteur demeure constant, conduit à l'instabilité prévue dans ce quadrant. Si nous admettons, par contre, qu'une surexcitation de l'alternateur intervienne assez vite pour porter la tension de OC_1 en OC' suivant la nouvelle direction de la roue polaire, avant que cette dernière ait atteint une avance angulaire excessive, l'ordonnée de l'extrémité C' du vecteur tension pourra de nouveau atteindre, voire même dépasser l'ordonnée initiale, ce qui, en portant la puissance transmise à une valeur supérieure à celle d'équilibre, tendra à ramener la roue polaire dans sa première position.

Le calcul montre que la stabilisation peut être ainsi obtenue en général avec des exigences moindres concernant les régulateurs et les excitatrices, que dans le cas déjà résolu de l'excitation rapide des compensateurs synchrones, tout au moins hors du cas de court-circuit, qui peut relever d'ailleurs d'autres mesures tendant à sauvegarder le synchronisme, comme l'insertion rapide à la centrale, dans le court délai d'intervention du régulateur de vitesse, d'une charge momentanée appropriée, fournie par exemple par une résistance hydraulique.

Un autre moyen de réglage, plus particulièrement applicable au cas où l'angle ϕ est assez proche de 180°, consiste dans l'insertion momentanée, en série avec la ligne, d'une réactance supplémentaire qui, comme il est ais de s'en rendre compte, détermine dans les conditions admises, un allongement et une extension de la chaîne des réactances et par suite un accroissement de la puissance transmise ainsi que du couple de rappel.

Il est ainsi possible de plusieurs manières, de faire fonctionner la ligne quelle que soit sa longueur et sa fréquence, même dans les zones primitivement interdites, sans recourir à une autre compensation que celle requise pour le fonctionnement à vide, ce qui est fort important, car si la transmission à courant alternatif ne pouvait être réalisée qu'au prix d'artifices supplémentaires aussi compliqués, coûteux et sujets à des difficultés en exploitation, que des condensateurs ou machines en série, il est à peu près certain que, privée de la plupart de ses avantages naturels de simplicité, elle ne conserverait aucune justification à l'égard du courant continu, pour les grandes distances de transmission envisagées.

En ce qui concerne l'excitatrice série, rappelons que nous l'avons proposée dès 1927 en montrant sa supériorité de principe sur les autres modes d'excitation, shunt ou indépendante, qui résulte de l'intégrité qu'elle assure spontanément, du flux total inducteur, et par suite de l'élimination de la réaction d'induit qui, si grande qu'elle puisse être, n'exerce plus ainsi aucune influence sur le réglage de tension, ni sur la stabilité. Notre regretté collègue, M. Fallou, s'était d'ailleurs, après avoir momentanément prononcé l'excitation indépendante des excitatrices, pleinement rallié par la suite à notre manière de voir.

Comme l'a montré le Dr Wanger, la tension la plus économique dépend beaucoup plus de la puissance que de la distance de transmission, ce qui paraît à première vue contredit par la constatation que la statistique des lignes existantes fait ressortir une relation approchée empirique de proportionnalité entre la distance et la tension. Ceci s'explique en somme par le fait que, pour des raisons de rentabilité, seuls sont exécutés les transports d'énergie à grande distance pour lesquels les pertes Joule représentent une fraction modérée admissible, par exemple 10 : 100, de la puissance transmise. Or, comme la règle de lord Kelvin sur la densité de courant économique maintient dans d'étroites limites la chute ohmique par kilomètre, indépendamment de la tension ou du genre de courant, le maintien à une valeur constante du rapport de la chute totale RI à la tension U exige que cette dernière croisse proportionnellement à la distance.

D'autre part, la condition pour les réseaux d'interconnexion à tension échelonnée qui recouvrent ensemble un grand pays, d'avoir des nœuds communs pour le transfert mutuel de leur puissance, conduit évidemment à les réaliser avec des longueurs moyennes de mailles dans un rapport entier simple qui ne peut guère être autre que deux. Il devra donc en être de même des tensions qui, pour des distances moyennes entre nœuds par exemple de 100, 200, 400 km du sous-réseau, du réseau principal et du super-réseau d'interconnexion, devront être également en progression géométrique de raison deux, ce qui justifie le choix des échelons respectifs de 110, 220 et 440 kV, dans la normalisation des tensions proposées par la CEI (Torquay 1938)³⁾.

La détermination de la tension la plus économique dépend d'autre part considérablement du prix des lignes, qui à son tour dépend essentiellement de leur conception et de leur mode de réalisation. Or, la constatation, assez affligeante, que le prix des conducteurs qui constituent cependant le seul élément utile de la ligne, ne représente toujours que 18 à 25 : 100 du prix total d'établissement, incite à rechercher si des économies massives ne pourraient être obtenues sur l'ensemble des autres termes (pylônes, fondations, transport, montage, etc.) qui constituent encore de beaucoup la majeure partie de ce prix de revient.

C'est dans ce but, qu'espérant la suppression du câble de terre qui permettra dans un avenir prochain l'extension généralisée de la pratique du réenclenchement rapide après court-circuit, ou même seulement la possibilité de dédoubler les lignes de transmission sans supplément de prix, nous avons proposé (Revue Brown Boveri, octobre 1941, p. 288) de constituer les supports de ligne par de simples chevalets en A avec isolateurs en compression en tête, articulés à leur pied et supportant chacun à leur sommet un conducteur individuel, et qui réalisent, plus complètement que la solution de compromis avec suspension caténaire décrite dans le même article, les avantages de simplicité et d'économie des lignes articulées.

L'extrême légèreté de ces chevalets qui, même pour les plus gros conducteurs à envisager pour 440 kV, peuvent être encore réalisés en bois, ou en tubes d'acier (Mannesmann) et la quasi-suppression des massifs de fondation, conduisent à une réduction considérable du prix total, tandis que l'indépendance absolue des conducteurs permettrait d'assurer à peu de frais une sécurité à peu près complète, à l'égard de presque toute espèce d'incidents, avec un simple conducteur de réserve.

Le fait que les isolateurs-supports n'y sont, comme les montants des chevalets, jamais soumis qu'à des efforts de flexion très réduits par rapport aux efforts de compression suivant leur axe, même dans les circonstances les plus défavorables (accélérations horizontales dues à la brusque décharge du givre) permet de les réaliser presque aussi élancés que les isolateurs rigides en suspension (Langstab). Or, le prix des lignes a une influence considérable sur la distance pour laquelle le courant continu devient plus économique que le courant alternatif; si par exemple le prix au kilomètre en est réduit à la moitié, cette distance sera portée

au double, c'est-à-dire à une valeur de l'ordre de 600 au lieu de 300 km.

D'une manière générale, le courant continu paraît devoir l'emporter en tout cas dans les pays neufs, pour les lignes isolées de grande longueur, tandis que le courant triphasé à fréquence normale gardera sans doute longtemps encore les avantages découlant d'une interconnexion plus facile, pour les lignes relativement courtes (de l'ordre de 500 km) destinées à constituer dans un pays à distribution assez dense comme l'Europe ou les Etats-Unis, les mailles bouclées d'un super-réseau.

Der Vorsitzende: Ich danke Herrn Darrieus sehr für seinen Beitrag. Er hat im wesentlichen drei Probleme angeschnitten:

Das erste Problem betrifft die Erweiterung der Stabilisierung. Wenn ich richtig verstanden habe, sucht Herr Darrieus Mittel und Wege, die Stabilität der Drehstromübertragung und der grossen Distanzen ohne Zwischenstützpunkte sicherzustellen. Vielleicht will sich Herr Dr. Wanger dazu noch äussern.

Der zweite Punkt, den ich für sehr bedeutungsvoll halte, ist der Beitrag zum Bau der Leitungen. Herr Darrieus sagt, es sei eigentlich heute fast nicht zu verantworten, dass der Anteil der Baukosten für die Masten und Fundamente einen so hohen Prozentsatz ausmacht gegenüber den Kosten der Leiter. Er sucht deshalb Mittel und Wege, die Kosten für die Masten und Fundamente wesentlich zu verringern; seine Vorschläge werden vielleicht dazu führen, die Drehstromübertragung weiter zu vervollkommen als wir für möglich halten.

Der dritte Punkt betrifft die Normung der Spannung.

Meine Herren, leider können wir die Diskussion nicht mehr weit ausdehnen, denn der Saal wird auf 19 Uhr anderweitig belegt und vorher muss noch alles umgestellt werden. Ich bitte deshalb die Herren, die noch das Wort ergreifen wollen, sich kurz zu fassen.

Herr Dr. W. Wanger, Referent: Herr Vögeli hat über die Frage der Erdseile eine andere Ansicht als ich. Er glaubt, dass auch bei sehr hoher Leiterisolation noch Ueberschläge durch atmosphärische Ueberspannungen auftreten, wenn man auf Erdseile verzichtet. Um kein Missverständnis aufkommen zu lassen, möchte ich feststellen, dass auch ich nicht der Ansicht bin, man könne etwa bei 300 oder 400 kV Betriebsspannung die Leiterisolation so hoch wählen, dass trotz Verzicht auf Erdseile unter keinen Umständen Ueberschläge vorkommen. Ich habe aber im Zusammenhang mit der Frage der Erdseile auch die Methode der raschen Wiedereinschaltung erwähnt. Wenn diese ermöglicht, Lichtbogenkurzschlüsse sofort und ohne Betriebsunterbrechung abzuschalten, warum sollte man dann nicht hie und da einen Ueberschlag in Kauf nehmen. Mir scheint daher, dass wir in der Frage der Erdseile nicht einfach starr am bisherigen Standpunkt festhalten dürfen. Als Techniker sind wir verpflichtet, auch die andern Möglichkeiten vorurteilsfrei zu prüfen und vor allem die wirtschaftliche Seite der Frage nicht ausser acht zu lassen.

Der Vorschlag von Herrn Darrieus, durch eine geeignete Spannungsregulierung auch bei sehr grossen Distanzen die Kompensation der Leitung überflüssig zu machen, erscheint außerordentlich interessant. Natürlich ist jede Möglichkeit, die Anlagen zu vereinfachen und zu verbilligen, stets sehr willkommen.

Wenn man die natürliche Leistung über eine unkomponierte Leitung von beispielsweise 2000 km überträgt — wie das Herr Darrieus angenommen hat —, so arbeitet man in einem instabilen Bereich. Ohne besondere Massnahmen würden die Spannungsvektoren an den Enden der Leitung unweigerlich auseinanderlaufen und die Maschinen ausser Tritt fallen. Herr Darrieus will nun durch eine genügend rasche Spannungsregelung die auseinanderlaufenden Vektoren zwingen, gegen die Gleichgewichtslage zurückzukommen. Da es sich um ein labiles Gleichgewicht handelt, können die Vektoren nicht dort stehen bleiben, sondern laufen darüber hinaus. Durch eine Spannungsregelung im umgekehrten Sinn werden sie wieder zurückgeholten usw. Wenn also die Polräder infolge der labilen Gleichgewichtslage nicht stationär dort bleiben können, so sollen sie dafür gezwungen werden, stän-

³⁾ La série des multiples de 110, qui remonte aux débuts de l'industrie électrique (Edison) constitue en fait le seul élément permanent des diverses normalisations existantes. La tension de 380 kV (220 $\sqrt{3}$) n'a par contre aucune justification dans ce domaine des très hautes tensions où le couplage triangle est pratiquement exclu.

dig darum herum zu pendeln, wobei man natürlich danach trachtet, die Ausschläge der Schwingungen möglichst klein zu halten.

Ich möchte bloss noch bemerken, dass das nicht die einzige Methode ist, die ermöglicht, die natürliche Leistung noch über sehr lange Leitungen ohne Kompensation zu übertragen. Ich habe bereits in meinem Vortrag erwähnt, dass auch die asynchrone Uebertragung dazu imstande ist. Beide Methoden sind noch nicht praktisch erprobt; bei beiden sind also noch viele Fragen abzuklären, bis eine praktische Verwirklichung möglich ist. Welches der beiden Systeme sich dann schliesslich als vorteilhafter erweisen wird, das, glaube ich, werden wir heute nicht mehr entscheiden.

Der Vorsitzende: Ich danke Herrn Dr. Wanger für die Bekanntgabe seiner Ansicht zum Votum des Herrn Darrieus. Ich möchte nun Herrn Vögeli bitten, noch kurz Stellung zu nehmen.

Herr R. Vögeli, Referent: Die Herren Dr. Wanger und Darrieus haben eigentlich den gleichen Punkt gestreift. Wohl können wir billigere Leitungen bauen; die Frage ist nur, wie es mit deren Betriebssicherheit steht.

Wir müssen daran denken, dass wir hier über die oberste Leitungsklasse diskutieren, für die eine bis heute nicht erreichte Betriebssicherheit verlangt werden wird. Diese Leitungen werden notwendigerweise sehr lang werden und wohl auch gewitterreiche Gegenden durchqueren. Beide Herren denken daran, die Erdseile der Leitungen wegzulassen. Jeder Blitzeinschlag müsste daher die Leiterseile treffen. Die resultierenden Spannungen sind das Produkt aus Blitzstrom und Wellenwiderstand der Leitung, also nach den bis heute vorliegenden Messungen im ungünstigsten Falle etwa 100 000 A mal 400...500 Ohm oder 40 Millionen V. Wie man diese Spannung beherrschen soll, kann ich mir nicht vorstellen. Man müsste für die stärksten Blitze Ueberschläge in Kauf nehmen. Die Herren sagten, man könne die Leitungen rasch ab- und wieder einschalten; aber wenn sich das täglich mehrere Male wiederholen sollte, dann sind die Stöße, die auf die Maschinen kommen, sicher nicht sehr zuträglich. Aus- und Wiedereinschalten, das geht; aber ich bin kein Anhänger davon, wenn damit die Betriebssicherheit beeinträchtigt werden sollte. Die Erdseile und die durch sie verursachten Mastmehrkosten betragen übrigens bloss etwa 2...3 % der Leitungskosten.

Ich möchte noch einen Punkt der Ausführungen von Herrn Darrieus berichtigten. Herr Darrieus sagt, dass auf die Leiter der heutigen Leitungen nur etwa 20 % der Gesamtkosten entfallen. Das stimmt nur für eine ganz bestimmte Leitungsart; in den meisten Fällen entfallen auf die Leiter 30...32 % der Kosten. Die Leitungskosten setzen sich gewöhnlich ungefähr folgendermassen zusammen:

Leiter	30...32 %
feste Kosten (Landerwerb, Durchleitungs-	
rechte, Waldentschädigungen	10...15 %
Bauleitungskosten	10 %
Isolatoren und Armaturen	12 %

Das gibt zusammen gewöhnlich rund 65 %. Auf die Masten und Fundamente entfallen die restlichen 35 %. Man kann daraus abschätzen, in welchem Umfange Einsparungen auf diesen Kosten denkbar sind. Diese Einsparungen dürfen nur in Kauf genommen werden, wenn sie keine Verringerung der Betriebssicherheit verursachen; das ist meine Ansicht.

Der Vorsitzende: Ich danke auch Herrn Vögeli für seinen Beitrag. Ich bin grundsätzlich der Meinung — und muss es auch sein —, dass man alles, was neu ist, verfolgen soll. Schliesslich ist in der Technik alles von einer Utopie ausgegangen. Es wird auch in Zukunft so sein müssen.

Es ist noch ein kurzes Referat von Herrn Dr. Keller von der PTT über Fragen der Telephonstörung angemeldet. Darf ich Herrn Dr. Keller bitten?

Herr Dr. H. Keller, PTT, Bern: Geräusche auf Fernsprechanlagen beeinträchtigen die Verständlichkeit der telephonischen Uebermittlungen. Geräuschspannungen können in den eigenen Anlagen entstehen oder von aussen übertragen

werden. Mit der ersten Art von Störungen, die durch die eigenen Energielieferungsanlagen oder durch Nebensprechen der verschiedenen Sprechkreise bedingt sind, brauchen wir uns hier nicht zu befassen. Bei der zweiten Art beeinflussen benachbarte Starkstromeinrichtungen die Telephonanlagen. Die Störungen werden entweder elektromagnetisch induziert oder durch die Verseuchung der Erde mit Wechsel- oder Gleichströmen auf verschiedene Weise übertragen, wobei das Oberwellenspektrum von Bahngleichrichteranlagen eine wesentliche Rolle spielt. Die Beeinflussung durch Starkstromanlagen besteht darin, dass den Kabeladern Längsspannungen aufgedrückt werden. Solange die Telephonverbindungen mit ihren zwei Sprechleitern absolut symmetrisch gegen Erde liegen, stören die Längsspannungen höchstens die Signalisierungsvorgänge, nicht aber die Gespräche. Vollkommene Symmetrie der Telephonverbindungen ist aber nur ein Idealzustand, der praktisch nie erreicht werden kann. Schon kleine Unsymmetrien von wenigen Promille verwandeln die Längsspannungen teilweise in Querspannungen. Dadurch werden die Störungen hörbar.

Schrittweise mit dem Ausbau der Elektrifikation hat die Telephonverwaltung schon vor Jahrzehnten begonnen, den lästigen Starkstromstörungen zu begegnen. Eindrächtige Telephonverbindungen mit Erde als Rückleiter gehören der Geschichte an. Es folgte die Verkabelung des ganzen Telephonnetzes. Erdunsymmetrische Teilnehmerschaltungen wurden verlassen. Fernämter, automatische Stadt- und Landzentralen wurden umgebaut und symmetrisch gemacht. So müssen beispielsweise alle Sprechwege durch eine Grosszentrale in betriebsmässiger Schaltung Unsymmetriewerte aufweisen, die im Mittel kleiner sind als 5 %. Wir sind schliesslich so weit gekommen, dass Sie beim Telephonieren zu Stadt und Land trotz der Nachbarschaft bedeutender Starkstromanlagen relativ wenig von Starkstromgeräuschen belästigt werden. Dort aber, wo unsere eigenen Massnahmen den Störungen nicht mehr Herr werden, müssen entsprechende Vorkrehe auf der Starkstromseite getroffen werden. Wir haben unsererseits das Mögliche veranlasst, die Störanfälligkeit unserer Anlagen auf ein Minimum zu bringen, das mit vernünftigen Mitteln zu erreichen ist. Wir sehen uns aber gezwungen, bei allfälliger Vergrösserung des Störpegels durch neuartige Starkstromeinrichtungen Stellung zu beziehen.

Ein einfaches Beispiel aus dem Strassenbahn- und Gleichstrombahnbetrieb mag am besten die gegenläufige Entwicklung von Starkstrom und Telephon veranschaulichen:

Starkstromseitig sind am Stelle der früheren, rotierenden Umformer die leistungsfähigeren Quecksilberdampfgleichrichter getreten. Ihr Oberwellenspektrum ist bedeutend grösser und hat sich gerade in den Bereich der grössten Telephonempfindlichkeit gesetzt (300...1500 Hz). Der Störgrad hat sich damit ungefähr verzehnfacht. Durch die Symmetrierung unserer Anlagen während der letzten Jahre hat sich die Störanfälligkeit beim Telephon auf rund $1/10$ reduziert. Wenn wir es auch nicht verlangt haben, so wäre doch schon hier der Einbau von speziellen Telephonfiltern starkstromseitig sehr erwünscht gewesen. Es gibt verschiedene Landesgegenden, wo die Starkstromstörungen zu Klagen Anlass geben.

Es existiert bekanntlich eine Telephonstörschutzkommision des SEV und VSE. Seit 15 Jahren hat sie nur einmal getagt. Diese Inaktivität ist aber nicht auf die Interesselosigkeit ihrer Mitglieder zurückzuführen, sondern auf den Umstand, dass bis jetzt alle Anstände durch kameradschaftliche Zusammenarbeit zwischen der einschlägigen und führenden Starkstromindustrie der Schweiz einerseits und der PTT anderseits behoben wurden. Vor allem war es die Firma Brown, Boveri, Baden, die für das Telephon-Entstörungsproblem stets ein gewisses Interesse bekundete. Auch den beiden Referenten, Herrn Dr. Wanger und Herrn Ehrensperger, möchten wir danken, dass sie in ihren Referaten das leidige Telephonstörsproblem entsprechend seiner Wichtigkeit gestreift haben.

Meine Herren! Es ist nicht so, dass das Telephon noch grössere Störungen verträgt. Die Möglichkeiten zur Unschädlichmachung der Starkstromstörungen sind auf der Schwachstromseite beinahe erschöpft. Gerade bei der Uebertragung noch höherer Leistungen auf grosse Distanzen handeln ihre Konstrukteure in ihrem ureigensten Interesse, wenn sie künftig das Oberwellenspektrum ihrer Ströme mit allen Mitteln

zu reduzieren trachten. Nachträgliche Entstörungen bleiben gewöhnlich ein minderwertiger Notbehelf.

Der Vorsitzende: Ich danke Herrn Dr. Keller für seinen Beitrag. Wir verstehen seine Sorgen bestimmt ganz genau. Als Vertreter der Fabrikationsindustrie kann ich ihm jedenfalls die Versicherung geben, dass wir auf die wichtigen Punkte aufs genauste achten werden. Es ist ganz richtig, was Herr Dr. Keller sagt: wir dürfen über diese Art von Problemen nicht leichtfertig hinweggehen.

Ich komme zum Schluss. Meine Herren, Sie können versichert sein, dass wir das heute behandelte Problem nicht aus Ueberhöchlichkeit auf die Traktandenliste des SEV gesetzt haben; wir haben das Problem in Angriff genommen, weil wir der Ueberzeugung sind, dass es seiner Reife entgegen geht. Wir haben geglaubt, zeigen zu dürfen, dass wir in der Schweiz in den letzten Jahren nicht geschlafen haben und dass es unser Wille ist, uns auch bei der Behandlung dieses neuen Problems eifrig in der vordersten Front zu bewegen.

Ich glaube, es wird einmal für unsere Jugend interessant sein, die heutigen Berichte zu lesen und alle die Hemmungen und Bedenken zu sehen, die dabei geltend gemacht wurden. Wenn dann einmal das Problem gelöst und Gemeingut geworden sein wird, dann werden diese Hemmungen und Bedenken zu einer Selbstverständlichkeit und vielleicht werden dann unsere Jungen darüber lachen, dass wir uns so viele Sorgen machten. Es ist mir ähnlich ergangen bei der Frage des Einphasenwechselstrom- oder Gleichstrom-Systems für Bahnen. Wenn man die Diskussionen über die Systemwahl bei der Bahnelektrifizierung nachliest, amüsiert man sich über die Gedanken, die damals geäussert wurden, von denen wir heute wissen, dass sie nicht zu Recht bestanden.

Schliesslich löst die Technik jedes Problem und überwindet jedes Hindernis. Wir müssen deshalb mutvoll hineingehen in die Welt der ungelösten Probleme. Das ist das Alpha und Omega unserer Existenz. Wir wollen das nie vergessen.

Meine Herren, Herr Direktor Dübi aus Brugg hat noch das Wort verlangt.

Herr W. Dübi, Direktor der Kabelwerke Brugg A.G.:
Gestatten Sie mir nur ein kurzes Wort.

Meine Herren!

Herr Dr. Schiesser hat in seinem Einführungsreferat heute morgen gesagt, dass diese Diskussionsversammlung eine Art von «Schwanengesang» für ihn bedeute.

Und da wollen wir doch diese Tagung nicht ausklingen lassen ohne unserem Präsidenten den herzlichsten, wärmsten und aufrichtigsten Dank auszusprechen für alles, was er in den letzten acht Jahren für die Diskussionsversammlungen des SEV getan hat.

Eine ganz grosse Zahl ausserordentlich interessanter Tagungen hat er in dieser Zeit mit der ihm eigenen Initiative ins Leben gerufen und mit seiner so umfassenden Sachkenntnis und seinem bewundernswerten Temperament geleitet und durchgeführt.

Die heutige Diskussionsversammlung bildet dazu eine «Höchstleistungs-Krone», speziell auch im Hinblick auf die Mutatoren, für welche sich Herr Dr. Schiesser von Anfang an in führender Weise eingesetzt hat und für die er sich sicher auch weiter einsetzen wird.

Wenn Sie mit mir einig gehen, so bitte ich Sie, unserem verehrten Präsidenten Dr. Schiesser unseren Dank durch Akklamation zu bestätigen. (Langanhaltender Beifall.)

Der Vorsitzende: Meine Herren, ich möchte Herrn Dübi herzlich danken für die warmen Worte, die er mir soeben gewidmet hat. Ich nehme ja nicht Abschied von Ihnen. Ich werde dem SEV weiter zur Verfügung stehen, soviel ich kann. Ich habe schon einmal gesagt, dass die ganze Arbeit, die mir das Präsidium des SEV gab, viel Mühe bereitete, aber auch viel Freude, und wahrscheinlich habe ich dabei mehr bekommen, als ich gegeben habe.

Indem ich mit diesem Dank an Herrn Dübi schliesse, möchte ich auch Ihnen danken, dass Sie alle so lange ausgehalten haben und ich schliesse unsere heutige Tagung.

Nachtrag¹⁾

Herr W. Simon, Trüb, Täuber & Co., A.G., Zürich:

1. Die bekannte Eigenschaft der Wechselstrom-Uebertragungsleitungen, dass der Wert der am Ende der Leitung auftretenden Klemmenspannung ein anderer sein kann als derjenige der Klemmenspannung im Kraftwerk, ist durch die Darlegungen im Vortrag von Herrn Dr. Wanger erneut hervorgehoben worden. Es dürfte in diesem Zusammenhang interessieren, dass die Firma Trüb, Täuber & Co. A.G. auf Anregung des damaligen Oberingenieurs der Kraftwerke Oberhasli A.G., Herrn Generalsekretär Kleiner, eine Messschaltung ausgeführt hat, welche ermöglicht, die am Ende einer Uebertragungsleitung auftretende Klemmenspannung im Kraftwerk selbst zu messen. Das wesentliche Merkmal dieser ohne Messleitungen auskommenden Methode liegt in der Verwendung eines Leitungsabbildes.

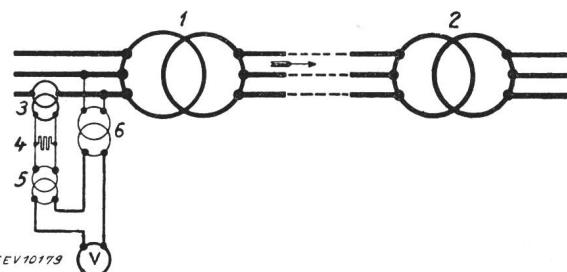


Fig. 1.

Schema der Spannungsmessung mit Leitungsabbild und Voltmeter.

1, 2 Leitungstransformatoren. 3 Stromwandler. 4 Nebenschlusswiderstand. 5 Zwischenwandler. 6 Spannungswandler. V Voltmeter.

Fig. 1 zeigt schematisch die dreiphasige Fernleitung mit je einem Leistungstransformator am Anfang und am Ende der Leitung, das Voltmeter und den zugehörigen Abgleichwiderstand mit Strom- und Spannungswandler. Im Sekundärkreis des im Leistungszug eingebauten Stromwandlers ist ein induktiver Widerstand eingeschaltet und derart geeicht, dass sein Spannungsabfall gemessen an der Sekundärseite eines kleinen Zwischenwandlers in Phase und Grösse dem Spannungsabfall am Ende der Leitung proportional ist. Dieser Spannungsabfall wird zu der Sekundärspannung, welche das Voltmeter speist, vektoriell addiert. Die resultierende Spannung ist dann unter der Voraussetzung, dass angenähert symmetrische Belastung besteht und der Einfluss der Leitungskapazität für die interessierenden Lastbereiche vernachlässigt werden kann, proportional der Klemmenspannung am Le-

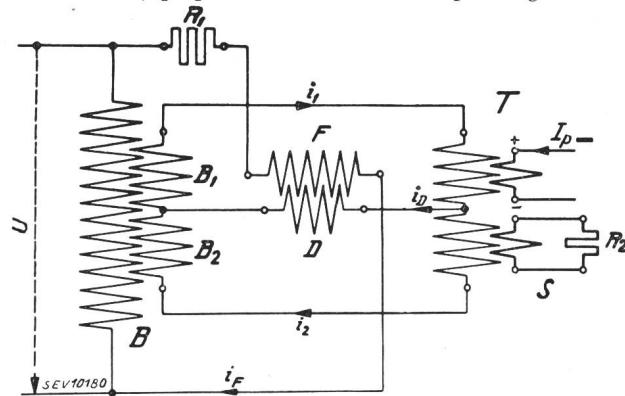


Fig. 2.

Schema eines Gleichstromwandlers mit 50periodigem Hilfstrom in Brückenschaltung.

B Brückentransformator.

B₁, B₂ sekundäre Wicklungshälften.

D Drehspule des Anzeigegerätes.

F Feldspule des Anzeigegerätes.

T Gleichstromwandler.

S Induktiver Brückenzweig mit Abstimmwiderstand R₂.

U Hilfsspannung z. B. 220 V, 50 Hz.

R₁ Vorwiderstand.

¹⁾ Beitrag schriftlich eingereicht.

tungsende für die in Frage kommenden Belastungen der Leitung.

2. Die Gleichstrom-Energie-Uebertragung von grossen Leistungen auf grosse Distanzen wird, wie Herr Ehrenspurger in seinem Vortrag gezeigt hat, mit Spannungen von ca. 50 000... 400 000 V erfolgen können. Da die Isolierung der Messinstrumente bei Gleichstrom nicht ohne weiteres möglich ist, muss der Shunt in die geerdete Leitung verlegt werden. Eine gegen die Betriebsspannungen vollkommen Isolation, analog wie dies bei Wechselstrommessungen mit Stromwandlern geschieht, ist wohl vorzuziehen, denn man ist dann nicht an den Erdleiter gebunden. Gleichstromwandler für hohe Ströme sind nach verschiedenen Prinzipien gebaut und bekannt geworden. Eine Schaltung, die aber besonders zur Messung kleiner Ströme, etwa von 20 A an, bei beliebiger Isolationsmöglichkeit zwischen Primär- und Sekundärkreis dienen kann, ist in Fig. 2 wiedergegeben.

Diese Schaltung ist an und für sich gleich derjenigen für Temperaturmessungen mit Isolierwandler und Widerstandsthermometer. An Stelle des zu messenden temperaturveränderlichen Widerstandselementes wird der zu messende Gleichstrom in einer oder mehreren Windungen um den Kern des Isolierwandlers geführt. Der Gleichstrom verändert die Permeabilität des Eisenkernes und damit die Impedanz des betreffenden Brückenzweiges. Das Gleichgewicht der Wechselstrombrücke wird dadurch gestört und der Ausschlag am Wechselstrominstrument, welcher dem Gleichstrom proportional ist, kann direkt in Ampere geeicht werden. Versuche haben ergeben, dass die Schaltung sowohl von Schwankungen der Hilfsspannung als auch von Temperaturänderungen und von der Einschaltdauer praktisch unabhängig ist. Die Remanenzfehler sind bei der Verwendung von Nickeleisen (Permalloy oder Mü-Metall) ebenfalls vernachlässigbar klein. Bei gewöhnlichem Transformatoreisen wird der Remanenzfehler dagegen 2...3 % betragen.

26. Schweizer Mustermesse Basel

Die diesjährige Basler Mustermesse war ausserordentlich stark besucht worden, und über Erwarten gross war auch der Besuch dieser interessanten Veranstaltung. In Ergänzung unserer der Mustermesse gewidmeten letzten Nummer des «Bulletins» erwähnen wir im folgenden einige weitere sehenswerte Ausstellungen der Messe.

Unter dem Thema

«Schaffen und Sorgen in der Kriegszeit»

veranstaltete das

Eidg. Kriegs-Industrie- und -Arbeits-Amt

im Rahmen der Mustermesse eine sehr lehrreiche und äusserst wirkungsvolle Sonderschau. In einer kleinen Vorhalle wurden im Stile der Landesausstellung 1939 — des unvergesslichen Höhenweges — die Probleme der Kriegswirtschaft durch Bild und Schrift dargestellt und erläutert. Man erhält daraus einen guten Eindruck von den vielfältigen organisatorischen, sozialen und rechtlichen Massnahmen, die zur Aufrechterhaltung unserer Landesversorgung nötig sind.

In der Haupthalle dieser Schau wurden dem Besucher die zahlreichen Möglichkeiten der Verwertung von Altmaterialien in auffälliger und eindrücklicher Weise vor Augen geführt. Dass dabei neben der Verwendung der Abfälle aus der Textilwirtschaft, der Papier-, Leder- und Gummiindustrie auch die Bedeutung der Sammlung von Altmaterialien aus Haushalt und Gewerbe hervorgehoben wurde, ist wohl selbstverständlich. Von grosser Wichtigkeit ist aber gerade diese Sammeltätigkeit auch für die Metallindustrie, was an vielen Schaustückern zum Ausdruck kam. Nur schade, dass man hier — wir denken vor allem an die Verwertung von Alteisen — immer noch nicht intensiv genug sammelt.

Mit Recht nimmt die Chemie, die hervorragendste Helferin in der Altmaterialverwertung und der Schaffung von Neustoffen, einen grossen Raum dieser Ausstellung in Anspruch. Die grossartigen Leistungen dieser Wissenschaft und Technik sind in breiten Volkskreisen noch viel zu wenig bekannt und werden kaum gewürdigt. Als Erzeugerin von unentbehrlichen Rohstoffen und Hilfsmaterialien wie auch von neuen Stoffen, ist die Chemie eine der Säulen unserer Volkswirtschaft; die Ausstellung zeigte auch, wenn auch nicht mit ausdrücklicher Betonung, dass für die meisten synthetischen Prozesse sehr grosse Mengen elektrischer Energie nötig sind.

Im Bauwesen zwingt die Knappe an künstlichen Baustoffen u. a. zu vermehrter Verwendung der natürlichen Baumaterialien. Der Ruf «Zurück zur Natur» auf diesem Gebiete wird in unserem Städte- und Landschaftsbild erfreuliche ästhetische Wirkungen zeitigen, die man hoffentlich auch nach dem Kriege nicht vergessen wird.

Auch die kriegswirtschaftliche Umstellung der Maschinen- und Elektroindustrie kam in der Schau des KIAA gut zur Geltung. Diese «metallfressenden» Industrien mussten sich ebenfalls weitgehend der Metallknappheit und der Beschränkung der zur Verfügung stehenden Metallarten anpassen. In der Elektroindustrie macht die Verwendung des Aluminiums

an Stelle des Kupfers schöne Fortschritte. Der Konstrukteur hat Wege gefunden, seine Maschinen und Apparate den Eigentümlichkeiten dieses Baustoffes anzupassen. Eine bedeutende Erleichterung für die Verwendung des anfänglich so schwierig zu verbindenden Leichtmetalls bot die Erfindung einiger Schweiß- und Lötzverfahren. Die Isoliertechnik versteht es, die unerhältlichen Hilfsmittel Kautschuk und Baumwolle zu ersetzen durch Kunstseide, Zellwolle usw., und auch das einst wegen seiner fast sprichwörtlichen Sprödigkeit als Konstruktionsmaterial so unbeliebte Glas schmiegt sich, meist in Form von Fasern, heute schon elegant fast jeder Form an und wird sicherlich in Zukunft seinen Platz auch in der Elektrotechnik behaupten.

Die Mustermesse hat durch die Sonderausstellung des KIAA eine neue Note erhalten, die ihr sehr zustatten kam. Mögen die Anregungen und Lehren, welche diese Sonderschau vermittelte, auf die so zahlreichen Besucher eine vorteilhafte und nachhaltige Wirkung zum Wohle unseres Landes ausüben!

Als Nachtrag zu den Standbeschreibungen veröffentlichen wir noch folgende:

«Elektrowirtschaft», Zürich

In einem grossen Stand hatte die «Elektrowirtschaft», wie üblich, alle möglichen elektrischen Apparate gesammelt und systematisch zusammengestellt. Zahlreiches Auskunftspersonal stand den Besuchern zur Verfügung. Ein weiterer Stand der «Elektrowirtschaft» warb für den Bau neuer Kraftwerke; hierauf wurde in der letzten Nummer auf S. 230 hingewiesen.

Die

Kabelfabrik Cortaillod

zeigte eine Serie Dreileiterhochspannungskabel-*Endverschlüsse* neuester Konstruktion für Innen- und Außenmontage und Spannungen von 10...30 kV. Die Isolatoren werden alle mechanisch geklemmt. Sie sind für die Spannungsreihe 10...20 kV bei Ein- und Dreileiterendverschlüssen (vertikal und horizontal, sowie für Innen- und Außenmontage) auswechselbar, wodurch die Lagerhaltung von Ersatzisolatoren weitgehend vereinfacht wird. Bemerkenswert sind ebenfalls die druckfesten Endverschlüsse des Modells VEB in Normal- und Flanschausführung für Niederspannungskabel. Diese Endverschlüsse sind heute für Ein-, Zwei-, Drei- und Vierleiterkabel mit oder ohne Abdeckhaube, in Grau- oder Aluminiumguss, lieferbar. In der Ausstellung waren auch die Endverschlüsse Modell V in neuer, sauberer Aufmachung zu sehen. Durch Modernisierung der Giessereianlage der Kabelfabrik konnten wesentliche Verbesserungen hauptsächlich in ästhetischer Hinsicht erreicht werden.

Schliesslich seien noch die bekannten Hausanschlusskästen erwähnt, die heute auch mit Hochleistungssicherungen von 350 A ausgerüstet werden.

Aktuell war auch die Ausstellungsgruppe «Transport», wo einige moderne und schöne Elektrofahrzeuge der