Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 18 (1927)
Heft: 9

Artikel: Die 50 kV-Kabelleitungen des Elektrizitätswerkes der Stadt Zürich
Autor: Leuch, H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058636

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: 22.08.2025

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

Elektrizitätswerksbetrieb. — Exploitation de centrales d'électricité.

Die 50 kV-Kabelleitungen des Elektrizitätswerkes der Stadt Zürich.

Von Dipl.-Ing. *H. Leuch,* Zürich.

621.319.34 (009)

Der Verfasser spricht zunächst von den Vorstudien, die das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich, zum Teil gemeinsam mit den Kabelfabriken, vorgenommen hat, um die Umformerstation Drahtzug direkt mit den 50 kV-Fernleitungen zu verbinden. Der Autor berichtet ferner über die Projektierung der 50 kV-Kabelanlagen und die Verlegung der Leitungen. Er beschreibt sodann die in den Hochspannungslaboratorien der Kabelfabriken vorgenommenen Prüfungen, wie auch die Messungen, die durch die Materialprüfanstalt des S. E. V. an den verlegten Kabeln durchgeführt wurden. Der Aufsatz enthält zum Schluss einige wirtschaftliche Angaben.

L'auteur parle d'abord des études préliminaires effectuées par le service d'électricité de la ville de Zurich, en partie avec la collaboration des fabricants de câbles, dans le but de connecter la station transformatrice du „Drahtzug" directement au réseau aérien de 50 kV. Puis l'auteur donne des indications sur le projet des installations de câbles à 50 kV et sur la pose de ces derniers. Il décrit ensuite les essais exécutés dans les laboratoires à haute tension des fabriques de câbles, ainsi que les mesures faites par la station d'essai des matériaux de l'A. S. E. sur les câbles en place. L'article termine par quelques considérations économiques.

Die Frage des Baues von Kabelleitungen für 50 kV Betriebsspannung beschäftigt das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich (E.W.Z.) schon seit mehreren Jahren. Zahlreiche zwangsweise Verlegungen von Hochspannungsfreileitungen in der Umgebung der Stadt, welche namentlich durch die Ausdehnung der Ueberbauung notwendig wurden, liessen es als angezeigt erscheinen, dem Kabelproblem näher zu treten, um in späterer Zeit auf diesem Gebiete über Erfahrungen zu verfügen, wenn einmal dringende Fragen dieser Natur an das Unternehmen herantreten sollten.

Die vier 50 kV-Uebertragungsleitungen des E.W.Z., welche aus den Jahren 1907 bis 1910 stammen, zu je zweien auf gemeinsamem Gestänge verlegt sind und auf beiden Ufern des Zürichsees von Siebnen (Wäggitalwerk) nach Zürich führen, münden dort in den zwei Haupttransformatorenstationen (50/6 kV) Frohalp und Guggach. Eine weitere Doppelleitung umschlingt die Stadt auf der Nord- und Westseite und schliesst den Ring zwischen den genannten Punkten (Fig. 1). Im Zuge dieser Leitung liegen zwei weitere Transformatorenstationen 50/6 kV, welche für die Versorgung des limmatabwärts sich ausdehnenden Industriegebietes der Stadt sehr günstig gelegen sind. Die Zürichberglehne und das Seefeld wiesen bis 1926 die weitesten Versorgungsdistanzen von den vier Transformatorenstationen auf (Fig. 1). Die Anlage Drahtzug, als Umformerstation in diesem Gebiet während der Jahre 1921 und 1922 erbaut, war dazu bestimmt, diese Versorgungswege abzukürzen und wurde daher von Anfang an so angelegt, dass eine

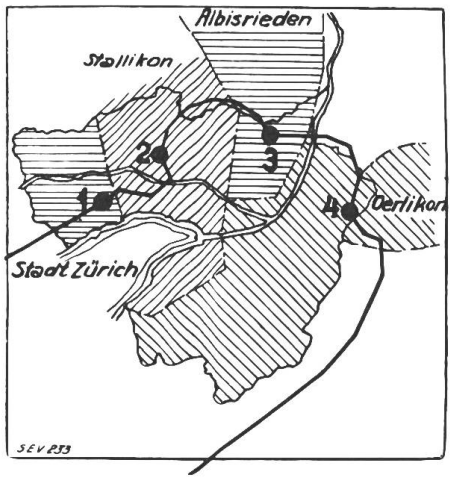

Fig. 1.
Lage und Versorgungsgebiete der Haupttransformatorenstationen bis 1926.
● Haupttransformatorenstationen 50/6 kV.
1 Frohalp. 3 Schlachthof.
2 Albishof. 4 Guggach.

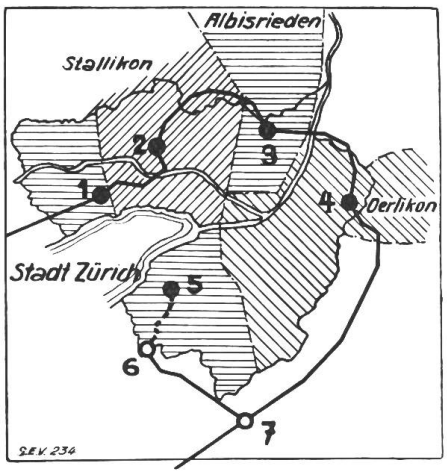

Fig. 2.
Lage und Versorgungsgebiete der Haupttransformatorenstationen seit 1926.
● Haupttransformatorenstationen 50/6 kV.
O Freiluft-Trennerstationen 50 kV.
1 Frohalp. 5 Drahtzug.
2 Albishof. 6 Eichhalde.
3 Schlachthof. 7 Dübendorf.
4 Guggach.

Transformatorenstation 50/6 kV angegliedert werden konnte. Deren Ausbau und die Erstellung der 50 kV-Zuleitung konnten bis 1926 aufgeschoben werden (Fig. 2). Das ursprüngliche Zuleitungsprojekt (Klösterli) wurde neu bearbeitet, wobei die Kabelstrecke von 3,5 km auf 1,6 km verkürzt werden konnte (Fig. 3).

Eine allgemeinverständliche Abhandlung über den Bau dieser Kabelleitungen erscheint in der Tagespresse, während der vorliegende Aufsatz einige technische und wirtschaftliche Angaben über Vorstudien, Projektierung, Verlegung und Prüfung der Leitungen enthält.

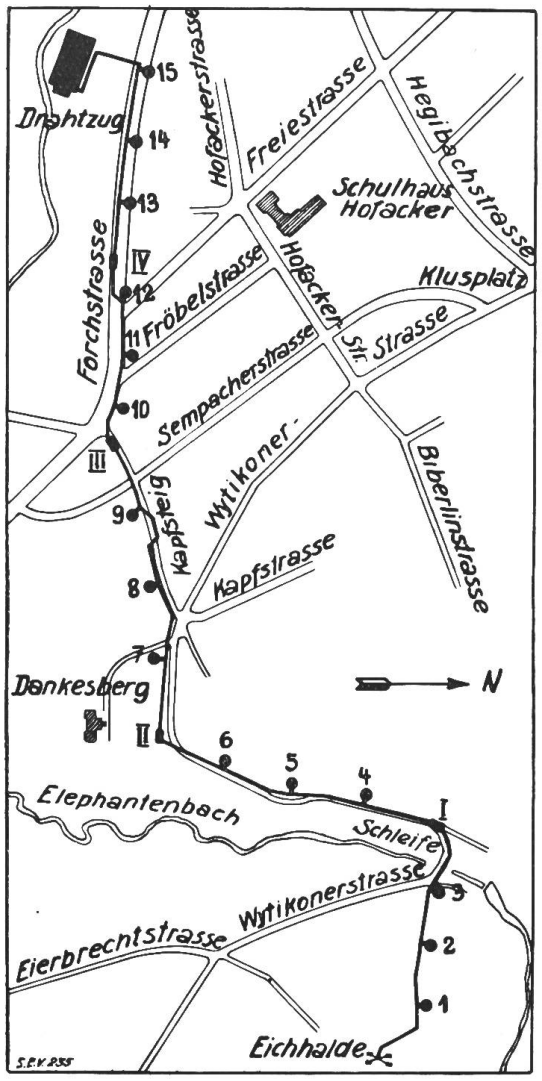

Fig. 3.
Lageplan der Kabelleitungen Eichhalde-Drahtzug
1 : 10 000.
● 1 bis 15 Temperatur-Messstellen.
■ I bis IV Muffenschächte.

Zum Festlegen der Baugrösse der Kabel waren zahlreiche Fragen abzuklären, welche von Anfang an in zwei Gruppen geschieden werden konnten, nämlich solche, die vom E.W.Z. allein zu entscheiden waren und andere, welche gemeinsam mit den Kabelfabriken behandelt werden sollten. Zur ersten Gruppe gehören insbesondere die vom Kabel auszuhaltende Spannung, die übertragbare Leistung, das Leitermaterial und dessen Querschnitt. Die Betriebsspannung war zu etwa 50 kV zwischen zwei Phasen des Drehstromsystems gegeben, dessen Nullpunkt über Petersen-Spulen an Erde gelegt ist. Weil die Fabriken in der Lage waren, Kabel für Betriebsspannungen bis 60 kV anzubieten, war die Spannungsfrage der Kabel entschieden. Die Möglichkeit, später eine 50 kV-Kabelverbindung zwischen den links- und rechtsufrigen Leitungen herzustellen, ist nicht zu verneinen, jedoch wird nicht unbedingt die Station Drahtzug deren Ausgangspunkt werden. Man wählte deshalb die im Drahtzug voraussichtlich zur Aufstellung gelangende Transformatorenleistung mit einem Zuschlag von 20 % für Ueberlastungen und die notwendige Reserve als obere Grenze der Uebertragungsleistung, nämlich 24000 kVA.

Die erste Umfrage bei sieben Kabelfabriken des In- und Auslandes im Juni 1925 ergab für 25000 kVA pro Leitung Vorschläge von im Mittel 185 mm² Kupferquerschnitt, während das E.W.Z. in seinen technisch-wirtschaftlichen Vorstudien zu den Grenzen 140 bis 180 mm² gelangt war. Auf die etwas erweiterten zweiten Grundlagen, welche 13 Firmen (Schweiz 3, Frankreich 4, Deutschland 3, Oesterreich 1, Italien 1, England 1) zur Vernehmlassung zugestellt wurden, gingen wertvolle Mitteilungen über Isolationsbeanspruchung, Durchschlagsfestigkeit des Dielektrikums und Belastbarkeit der Kabel verschiedenen Fabrikats, begleitet von einzelnen Referenzen ein. Die Firmenvorschläge sind insofern von besonderem Interesse, als neben dem Aderquerschnitt auch die Anzahl der zu verlegenden Stränge darin behandelt wurde. Das umfangreichste Projekt sah vier Leitungen von 3×270 mm² gleich total 3240 mm² Kupferquerschnitt vor, während das kleinste dieselbe Aufgabe mit zwei Leitungen von 2×100 mm², also mit insgesamt 600 mm² lösen wollte. Für die Bestimmung des Kupferquerschnittes musste wegen des Zusammen-

hanges zwischen Belastbarkeit und Abkühlung die Wahl zwischen Ein- oder Dreileiterkabel getroffen werden. Der maximale, am Leiterumfang bei Betriebsspannung auftretende Spannungsgradient der angebotenen imprägnierten Papierbleikabel bewegte sich zwischen den Grenzen von 3200 und 3780 V/mm, während von andern Fabriken für den elektrischen Durchschlag 5600 bis 40 000 V/mm genannt wurden. Das E.W.Z. hielt sich bei seinen theoretischen Vorstudien über die Vergebung von Papierbleikabeln an einen Quotienten aus Aussendurchmesser des Dielektrikums und Durchmesser eines vollkommen zylindrischen Leiters, welcher dem Idealwert $e = 2{,}72$ möglichst nahe kommt. Anderseits liefert die Beziehung zwischen Betriebsspannung und maximalem Spannungsgradient ein zweites Mass für den Leiterdurchmesser. Ausgehend von 150 mm² Kupferquerschnitt und einem Aussendurchmesser d des hiezu erforderlichen Seils von etwa 16 mm ergibt sich aus:

$$\frac{D}{d} = e \qquad = 2{,}72$$

der Durchmesser der Isolation: $D \sim 2{,}72 \cdot 16 \qquad = 43{,}6$ mm

und die radiale Isolationsdicke: $\frac{D-d}{2} = \frac{43{,}6 - 16{,}0}{2} = 13{,}8$ mm.

Tritt an Stelle des Leiters mit vollkommen zylindrischer Oberfläche ein Seil aus über 30 Einzeldrähten, so wird die grösste auftretende Feldstärke etwa 16% höher anzunehmen sein. Ausgehend von einem Spannungsgradienten von 3,1 kV/mm am Umfang des vollkommen zylindrischen Leiters gelangt man zu einem Wert von ca. 3,6 kV/mm, welcher als höchstzulässige Grenze bei der zu verlangenden Sicherheit anzusehen ist. Daraus ergibt sich annäherungsweise der Wert für den minimalen Leiterdurchmesser d:

$$d = \frac{2 \cdot E}{\delta} = \frac{2 \cdot 50}{\sqrt{3} \cdot 3{,}6} = 16 \text{ mm.}$$

Wenn für Dauerbetrieb eine Stromdichte von 1,8 Amp./mm² angenommen wurde, so ist bei 150 mm² Kupfer ein Strom von 270 Amp. zulässig. Mit einer solchen Kabelleitung lassen sich auch bei ungünstigsten Betriebsverhältnissen dauernd 21 000 kVA übertragen.

Die zweite Gruppe, deren Fragen gemeinsam mit den Fabriken gelöst werden mussten, umfasste die Abklärung über die Verwendung von Ein- oder Dreileiterkabeln, das Festlegen der Fabrikationslängen und der Bettungsart im Erdreich. Die Vorschläge für die Verlegungsart gingen in der räumlichen Anordnung weit auseinander, dagegen verlangten die meisten Lieferanten, dass die Kabel in ihrem Schutzkanal eingesandet werden. Das E.W.Z. begegnete diesem Verlangen durch Vorschlag einer mit 6 kV-Kabeln erprobten Kanaltype, hergestellt aus 1 m langen, armierten Betonformsteinen, mit besonderm Deckel (Fig. 4). Der Unterteil besitzt Trogform, hat 9 Rillen zur Aufnahme von Kabeln bis zu 75 mm Aussendurchmesser bei Achsabständen von ca. 125 mm. Ein Unterteil wiegt 330 kg, ein leichter armierter Deckel 150 kg und der stärker armierte, welcher in der Fahrbahn verwendet wird und bis 6 t Belastung erträgt, ca. 160 kg. Unterteile und Deckel werden in patentiertem Verfahren fabrikmässig hergestellt und fertig auf den Platz geliefert. In diesen Kanälen von etwa 42 cm lichter Höhe liegen die Kabel an der

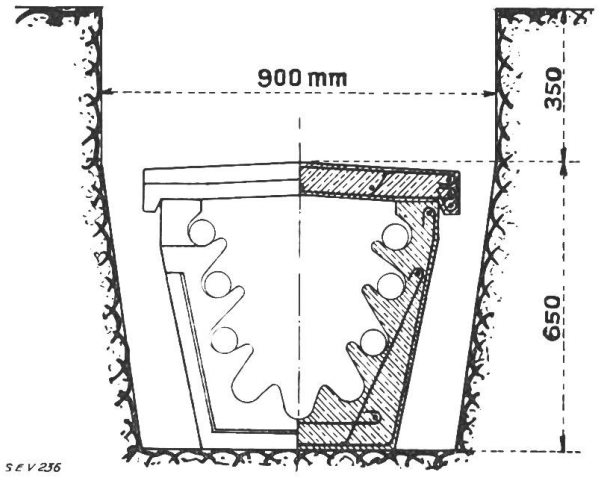

Fig. 4.
Querschnitt durch Graben und Betonkanal 1:20.

Luft und sind bei der geringen, mittleren Ueberdeckung von 35 cm, durch Abheben einzelner Deckel leicht zugänglich oder doch streckenweise kontrollierbar. In Anbetracht der Unsicherheit, die eine Erstlingsanlage dieser Art bietet, war es angezeigt, eine Verlegungsweise zu wählen, bei welcher die Kabel nicht übereinandergeschichtet werden müssen, dennoch mechanisch gut geschützt sind und bei allfällig auftretenden Schäden leicht von aussen untersucht werden können. Ueberdies durfte die ganze Anlage wegen des geringen zur Verfügung stehenden Platzes in den nur teilweise ausgebauten und den mit andern Leitungen belegten Strassen, nur wenig Breite beanspruchen. Die kurz beschriebene Kanaltype schien diesen Anforderungen am besten zu entsprechen, doch war noch in Zusammenarbeit mit den Kabelfabriken abzuklären, welche Verluste im Falle der Verwendung von Einleiterkabeln bei den gegebenen Achsabständen entstehen würden, ferner ob im Falle eines elektrischen Durchschlags die Nachbarkabel genügend geschützt seien und im Kanal kein Brand entstehen könne. Endlich mussten die Erwärmungs- bezw. Abkühlungsverhältnisse bei dieser Verlegungsweise eingehend studiert werden, um über die Belastbarkeit Aufschluss zu erhalten. Die Kabelfabrik Berthoud, Borel & Co. in Cortaillod (Schweiz) führte an einer im Fabrikgelände mit der vorgeschlagenen Kanalsorte aufgebauten Versuchsanlage eingehende Erwärmungsstudien durch, die zum Resultat führten, dass der Kanal für die vorliegenden Verhältnisse brauchbar war.

Daraufhin konnten die Vor- und Nachteile von Ein- und Dreileiterkabeln gegeneinander abgewogen werden. Traten ausländische Firmen mehr für Dreileiterkabel ein, so bot nur eine Schweizerfabrik solche an. Die schweizerische Industrie wies hauptsächlich Referenzen für Einphasen-Einleiteranlagen bis 60 kV aus, während einzelne ausländische Firmen Dreileiteranlagen bis 60 kV erstellt hatten. Das E.W.Z. verschaffte sich Kenntnis der in- und ausländischen Anlagen, wobei sich aber herausstellte, dass nur wenige derselben eine lange Freileitung ohne Transformation vorgeschaltet haben. In Paris bestanden Einleiterstrecken für 60 kV von 2,7 km Länge. Die nordischen Staaten sind an die Anwendung von Hochspannungskabeln etwas früher herangetreten, weil sie bei der Kreuzung der zahlreichen Wasserläufe oder einzelner Meeresarme mittels Luftleitungen auf Schwierigkeiten stiessen oder anderseits der Boden sich für die Aufrichtung hoher Maste als nicht genügend tragfähig erwies. In Holland bestehen über 80 km lange Einleiteranlagen für 50 kV, zwischen Dänemark und Schweden liegen zwei Seekabel, deren eines schon im Jahre 1915 für 25 kV erstellt wurde. Das zweite besteht aus 5 km Dreileiterseekabel mit Eisenarmatur und beidseitigen Uferstrecken von je 3,5 km Länge. Diese Leitungen durchqueren zwischen Helsingör und Helsingborg den grossen Sund. Für diese moderne Seeverlegung lag es auf der Hand, Dreileiterkabel zu verwenden. Auch in Schweden sind Kabel verlegt worden, aber vorwiegend für 30 kV; dagegen werden in neuerer Zeit 50 kV-Strecken erstellt, weil in den Küstengebieten durch Ablagerung von Salzkrusten auf den Isolatoren Schwierigkeiten im Betriebe von Freileitungen aufgetreten sind. Endlich liegen auch in Barcelona Einleiterkabel für 50 kV, und in der Schweiz bestehen ausser den Einphasenkabelstrecken der Bundesbahnen einzelne kurze Versuchsanlagen und Verbindungen in Kraftwerken. Wenn auch die Besitzer solcher Kabelleitungen über ihre Betriebserfahrungen befragt wurden und die Auskünfte im allgemeinen günstig lauteten, so konnten doch daraus keine direkten und sicheren Folgerungen für die projektierte Zürcher Anlage gezogen werden, weil in jedem Fall andere Verhältnisse vorlagen. Bei der Entscheidung zwischen Ein- und Dreileiterkabeln waren die ungünstige Isolationsbeanspruchung und die schwierigere Verlegung der letztern, die komplizierten Verbindungs- und Endmuffen, die ungünstigeren Erwärmungs- bezw. Abkühlungsverhältnisse gegen die etwas höheren Verluste in den Bleimänteln der Einleiterkabel und die Unmöglichkeit, eine Eisenbewehrung bei denselben anzuwenden, gegeneinander abzuwägen. Bei der vorgesehenen Verlegung in einem armierten Betonkanal konnte auf die Armatur verzichtet werden und die Verwendung der Höchstädter-Dreileiterkabel hätte die Ionisierungsgefahr in den Zwickeln vermindert.

Für den Entscheid zugunsten der Einleiterkabel sprachen aber die übersichtliche Anordnung der Leiter, die Möglichkeit, selbst bei gleichzeitiger Beschädigung einzelner Leiter in zwei oder mehr Leitungen aus den gesunden Adern stets rasch ein betriebsfähiges Dreileitersystem herstellen, im Falle eines Durchschlags kleinere Einsatzmuffen verwenden zu können und je nach der Grösse des Schadens nur einzelne Adern statt der ganzen Leitung ersetzen zu müssen. Nach dem Entschluss, Einleiterkabel im beschriebenen Kanal zu verwenden, konnten die äusseren Verhältnisse der Kabel ebenfalls bestimmt werden. Wegen der Brandgefahr bei allfälligen Durchschlägen, unterdrückte man die Juteumwicklung und Asphaltierung, legte die Dicke des nahtlosen Bleimantels auf 2,5 mm fest und verlangte zum Schutze desselben gegen etwa auftretende chemische Einwirkungen der Umgebung einen in der Fabrik warm aufgebrachten einmaligen Teeranstrich. Für die Bestimmung der Fabrikationslängen waren die örtlichen Verhältnisse massgebend.

Der Ohmsche Widerstand (bei 15° C) aller angebotenen Kabel von 150 mm² Cu-Querschnitt lag zwischen 0,115 und 0,120 Ω/km und Phase, während die Induktivitäten pro Phase schwankten zwischen $0{,}55 \times 10^{-3}$ und $1{,}3 \times 10^{-3}$ Henry/km. Die Längeneinheit der Kabel besitzt eine rund 10 mal grössere Betriebskapazität als die vorgeschaltete Freileitung, nämlich etwa 0,18 bis 0,23 μF/km, in einem vereinzelten Fall sogar bis 0,36 μF/km. Die gemessenen und berechneten Werte der gekauften Kabel sind in Tab. I zu finden.

Tabelle I.

Leitung	Messungen einzelner Längen in der Fabrik				Verlegte Kabel, Messung		Berechnete Induktivität
	Cosinus des dielektrischen Verlustwinkels bei 20° C			Kapazität Mittelwert	Isolationswiderstand	Ohmscher Widerstand	
	bei 35 kV	50 kV	70 kV	μF/km	Megohm	Ohm	Millihy/km
Leitung 1	0,0083	0,0083	0,0080	0,203	> 1000	0,1741	0,6
Leitung 2	0,0050	0,0056	0,0065	0,189	> 1000	0,1833	0,6

Nach Abschluss der Vorarbeiten fand im Juni 1926 ein beschränkter Wettbewerb statt unter den Lieferanten, welche sich an jenen beteiligt hatten, aus welchem die Kabelfabrik Berthoud, Borel & Cie. in Cortaillod (Schweiz) und die Siemens-Schuckertwerke (Berlin) mit Aufträgen für Lieferung und Montage von je einer Drehstromleitung für die 1560 m lange Strecke hervorgingen. Wollte man den schweizerischen Fabriken Gelegenheit geben, sich den inländischen Markt zu sichern, so gebrach es ihnen an guten Referenzen für gleichartige Anlagen. Das Risiko, welches das E.W.Z. als öffentliche Verwaltung in technischer Hinsicht auf sich zu nehmen hatte, musste auf eine sichere Grundlage gestellt werden, welche man durch Beizug der bekannten Siemens-Unternehmung zu schaffen erwartete. Im Hinblick auf den Bedarf an 50 kV-Kabeln für die im Bau befindlichen Kraftwerke Oberhasli, glaubte das E.W.Z. der Schweizer Kabelindustrie Gelegenheit geben zu sollen, die Ebenbürtigkeit ihrer Erzeugnisse mit bekannten ausländischen Produkten zu beweisen, damit der inländische Markt in Zukunft von den Schweizer Fabriken gedeckt werden könne.

Die bestellten Kabel besitzen als Leiter ein Seil aus Kupfer von wenigstens $56 \frac{\text{m}}{\Omega\ \text{mm}^2}$ Leitfähigkeit. Das Seil ist zusammengesetzt aus 37 runden Kupferdrähten, angeordnet in 4 Lagen mit $1 + 6 + 12 + 18$ Einzeldrähten von je 2,27 mm Durchmesser. Der Totalquerschnitt beträgt $37 \times 4{,}05$ mm² = 150 mm² Cu. Die Isolation der Kabel besteht aus ca. 140 Lagen imprägnierten Papiers von ca. 20 mm Breite und bestimmtem Zellulosegewicht. Das Dielektrikum ist mit stumpfem Stoss, je nach Maschinengrösse, in etwa 3 bis 5 Arbeitsgängen gewickelt und nachher

imprägniert worden. Die Vervollkommnung des Kondensators durch Anwendung einer Lage metallisierten Papiers am Leiter und über der Isolation war nicht Bedingung für die Lieferung, aber gewünscht worden. Die Fabriken hatten auf die Frage des Schutzes der Kabel gegen eindringende Ueberspannungswellen verschiedene Apparate vorgeschlagen (Drosselspulen, event. mit parallelgeschalteten Ohmschen Widerständen, Fünfhörnerableiter, Stern-Dreieckschutz usw.), welche zwischen Kabel und Freileitung geschaltet werden sollten, doch erklärten sie sich auch bereit, auf jeden derartigen Schutz ohne Schmälerung der Garantie zu verzichten. Selbst von einer erhöhten Isolation am Leitungsanfang wurde Umgang genommen.

In den Lieferungsverträgen wurden neben den mechanischen und elektrischen Baugrössen auch die Prüfungen, welche teils in der Fabrik, teils an der fertig verlegten Leitung vorzunehmen waren, festgelegt. Den Lieferanten wurde daher auch das Risiko für Transport, Verlegung und Montage der Kabel und Muffen überbunden. Insgesamt wurden 32 Fabrikationslängen in Auftrag gegeben, deren jede in der Fabrik der Isolations- und Leiterwiderstandsmessung zu unterwerfen, während 30 Minuten mit 75 kV, Leiter gegen Mantel und unmittelbar anschliessend während 5 Minuten in gleicher Schaltung mit 90 kV-Wechselspannung zu prüfen war. Nach der Scheringschen Methode musste von jeder Länge der dielektrische Verlustwinkel bei 35, 50 und 70 kV ermittelt werden. Einzelne Kabel wurden einer 36 stündigen Dauerprobe mit 60 kV unter fortgesetzter Beobachtung des Verlustwinkels bei möglichst konstanter Temperatur unterworfen. Die Siemens-Schuckert-Kabelwerke verwendeten hiezu einen Luftkondensator von ca. 2,5 m Länge (ca. 50 $\mu\mu F$), während in der Kabelfabrik Cortaillod, ein Pressgaskondensator für 12 Atm. denselben Dienst versah. Ein Cosinus des Verlustwinkels von 0,015 bei 20° C und 70 kV war die oberste Grenze für die Annahme der Kabel. Die Dauerprobe sollte ein Kurvenbild ohne Unstetigkeiten liefern, wenn nicht im Kabel sich Vorgänge abspielten, welche, etwa durch die verwendeten Materialien oder Ungleichmässigkeit der Fabrikation hervorgerufen, früher oder später den elektrischen Durchschlag herbeiführen mussten. Es sei hier betont, dass vermieden wurde, die ganzen Längen einer höhern Phasenspannung als 70 kV auszusetzen, um die Kabel durch die Prüfung nicht zu schädigen. Die schärfsten Proben durften nur an Prüfabschnitten vorgenommen werden. Diese wurden in Längen von etwa 5,5 m über eine Trommel von 600 mm Radius nach folgender Formel hin und her gebogen: $90^0 + 4 \times 180^0 + 90^0$. Für die nachfolgende Spannungsprobe des gebogenen Stücks mussten die Enden präpariert und in Oel getaucht werden. Die Durchschlagsprobe begann mit einer Spannung von 60 kV, welche jede Minute um 20 kV sprungweise gesteigert wurde, bis zum Durchschlag des Dielektrikums, der nicht unter 180 kV liegen durfte. Es mag von Interesse sein, hier zu erwähnen, dass die Prüfeinrichtung der Kabelfabrik Cortaillod, mit welcher Spannungen bis zu 260 kV erzeugt werden können, nicht ausreichte, um Kabelstücke durchzuschlagen, bevor an den unter Oel hängenden Enden ein Ueberschlag eintrat. Das Siemens-Schuckert-Kabelwerk in Berlin-Gartenfeld, welches 1912 erbaut wurde, war in der Lage, im Herbst 1926 ein neues Hochspannungsprüflaboratorium dem Betrieb zu übergeben. Die ersten Prüfungen, welche darin vorgenommen wurden, sind diejenigen des Elektrizitätswerks der Stadt Zürich; es mögen daher an dieser Stelle einige Worte über diese Neuanlage am Platze sein. Dicht neben dem grossen, ebenerdigen Fabrikgebäude des Kabelwerks, welches allein 120 000 m² Dachfläche misst, ist ein Neubau von etwa 3000 m³ Inhalt entstanden. Der Raum enthält den 80 kVA-Prüftransformator, welcher Spannungen bis 500 kV herstellen kann und zwei grosse Oelbassins für die Prüfobjekte. Neben neuzeitlichen Einrichtungen für Türverriegelung, Lüftung und stufenweise oder vollkommene Verdunkelung ist der Hochspannungsprüfraum mit aufziehbaren Hängevorrichtungen, Kugelfunkenstrecken mit elektrisch gesteuerter Distanzverstellung in verschiedenen Geschwindigkeiten und dazugehöriger Anzeigevorrichtung in Uhrform ausgerüstet. Auf einer Gallerie sind in Pulten die Bedienungsgriffe und Mess-

instrumente untergebracht und daneben befindet sich ein verglastes Beobachtungszimmer. Der Raum unter der Gallerie enthält die eigentliche Schaltanlage. Ein im Dache eingebauter Durchführungsisolator für 200 kV gestattet, die Prüfspannung über das Dach der Fabrik hinweg in die alten Prüfräume zu leiten.

Die Ergebnisse der Spannungsprüfungen, welche an den für das E.W.Z. bestimmten Siemens-Kabeln bezw. an mit von Hand gewickelten Keulen versehenen Abschnitten durchgeführt wurden, sind in Tab. II zusammengefasst.

Tabelle II.

No.	Biegeprobe	bei kV	in Minute	trat Durchschlag ein
1	ungebogen	300	13	ca. 20 cm vom Ende unter Blei.
2	gebogen	340	15	am Ende in der Keule.
3	gebogen	280	12	ca. 50 cm vom Ende unter Blei.
4	gebogen	380	12	ca. 40 cm vom Ende unter Blei.
5	gebogen	310	14	etwa in der Mitte unter Blei.

War durch die Fabrikprüfungen ein gewisser Gütebeweis für die einzelnen Kabel geleistet, so wurde anderseits in Zürich die von jeder Fabrik montierte Leitung in verlegtem Zustand weiteren Prüfungen unterzogen. Diese umfassten die Bestimmung des Gleichstromwiderstandes, welcher auf 15° C reduziert, 0,120 Ω/km und Phase nicht überschreiten durfte, eine Isolationsmessung (Siemens bei 15° C > 500 $\frac{\text{Megohm}}{\text{km}}$, Cortaillod bei 15° C > 100 $\frac{\text{Megohm}}{\text{km}}$), sowie die Spannungsprobe mit 50 kV Leiter gegen Erde während einer Stunde.

Jedes Kabel nimmt bei einer Spannung von 50 kV zwischen Leiter und Mantel einen Ladestrom von ca. 5 Amp. auf (ca. 3,5 kW). Da ein Prüftransformator genügender Leistung nicht zur Verfügung stand, wurden 2 vorhandene 5000 kVA, 50/6 kV-Transformatoren oberspannungsseitig, einphasig in Serie geschaltet und mittelst eines Generators auf der 6 kV-Seite gespeist. Dieser Kunstgriff gestattete, auch die Schaltanlage mit einer verketteten Spannung von 65 kV zu prüfen und als Vorstufe für die Inbetriebsetzung je zwei Kabeladern gegeneinander während je einer Stunde auf diesen Wert zu spannen (Fig. 5).

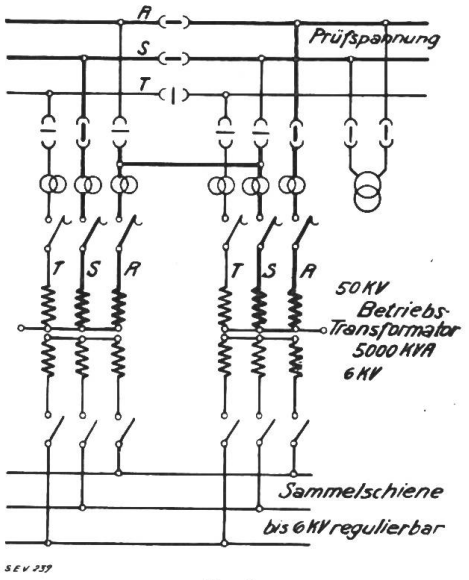

Fig. 5.
Schaltung für die Spannungsprüfungen der verlegten Kabel mittelst der 50 KV-Anlage Drahtzug.

Die letzte Untersuchung, welche nach der ersten Inbetriebsetzung vorgenommen wurde, hatte die Belastbarkeit bei der gewählten Verlegungsart bis zu den gewährleisteten Werten zu beweisen und Aufschluss über die Erwärmung von Leiter, Bleimantel und Luft im Kabelkanal zu geben. Diese Studie, über deren Durchführung hier einige Einzelheiten erwähnt seien, erforderte die weitestgehenden Vorbereitungen. Beim Zuschütten des Kanals blieb an 15 Stellen (siehe Fig. 3), welche je zu dreien eine Teilstrecke in 4 gleich lange Stücke zerlegten, der Kanaldeckel unüberschüttet, so dass in jeden ein Gasrohr in senkrechter Lage eingebaut werden konnte. Am oben aufgesetzten Abschlusszapfen hing ein Quecksilber-Thermometer, dessen Kugel in halber Kanalhöhe frei schwebte. Unter den benachbarten, zum Kippen eingerichteten Deckel jeder Messstelle wurden die mittleren Phasen jeder Leitung ebenfalls mit Quecksilber-Thermometern in der Weise versehen, dass ein

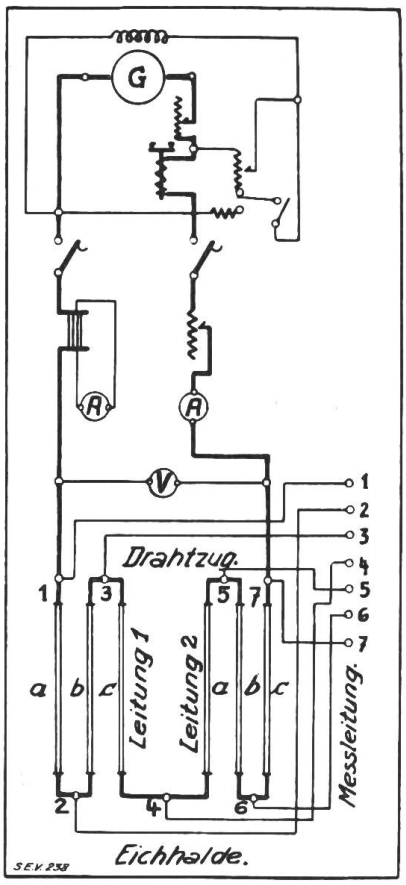

Fig. 6.
Schaltung der 6 Kabel für die Erwärmungsmessungen.

inniger Kontakt mit dem Bleimantel gesichert und die Ablesung möglich war ohne die Thermometer aus der Lage zu bringen. Insgesamt waren $15 \times 3 = 45$ Thermometer angebracht; zum Aufzeichnen der äusseren meteorologischen Verhältnisse während des ununterbrochenen 48 stündigen Erwärmungsversuchs dienten 1 Thermograph, 1 Barograph und 1 Hygrograph am obern Leitungsende sowie 1 Thermograph am untern. Ein solches Instrument wurde im Muffenschacht III aufgestellt zum direkten Aufzeichnen des Lufttemperaturverlaufs. Die 6 Adern der beiden Leitungen wurden in Reihe geschaltet, so dass ein einziger Stromkreis von der 6fachen Leitungslänge entstand, welcher mit 150 Amp. Gleichstrom so lange gespeist wurde, bis der stationäre Temperaturzustand im Kupfer erreicht war. Die direkt angeschlossene Belastungsstufe von 270 Amp. durfte nach den Bestimmungen der Lieferverträge während 4 Stunden aufrecht erhalten werden. Ein nachfolgender Versuch mit einem in einen Muffenschacht behelfsweise eingebauten Ventilator hatte Unterlagen über die Wirkung der künstlichen Ventilation zu liefern. Die Reihenschaltung der 6 Kabel und ihre Belastung mit Gleichstrom war der Nutzbelastung unter Betriebsspannung vorgezogen worden, weil es mit Hilfe eines permanenten Messkabels gelang, während des Dauerversuchs ohne Stromunterbruch die Widerstandsänderung der Leiter durch die gemessenen Spannungsabfälle zu verfolgen (Fig. 6). Vor Beginn des

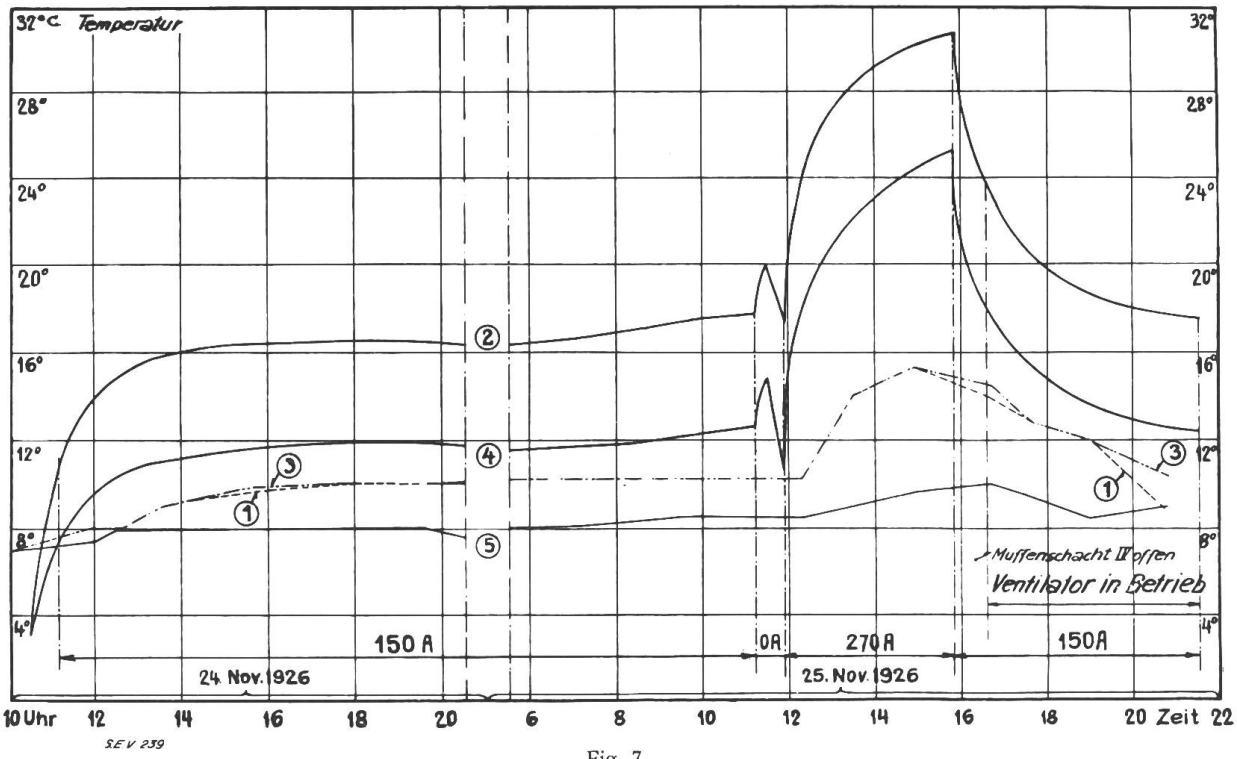

Fig. 7.
Zeitlicher Verlauf der Temperaturen einer Messstelle (Nr. 7).
(1) Temperatur des Bleimantels, Phase b, Leitung 1. (3) Temperatur des Bleimantels, Phase b, Leitung 2.
(2) „ „ Kupferleiters, „ b, „ 1. (4) „ „ Kupferleiters, „ b, „ 2.
(5) Lufttemperatur im Kabelkanal.

Versuchs hatten die Kabel 2 × 24 Stunden ausser Betrieb gestanden. Die erste Messung lieferte einen Anhaltspunkt für die Ausgangstemperatur des Kupfers, die vermutlich bei 3° C lag; aus den Widerstandsänderungen wurde sodann rückwärts auf die Leitertemperatur geschlossen. Nach 24 Stunden konnte der ersten Belastungsstufe die zweite folgen, da keine nennenswerte Aenderung der Verhältnisse zu erwarten war. Fig. 7 gibt den Temperaturverlauf einer Messstelle wieder. Trotzdem sich aus den Messungen der Ohmschen Widerstände

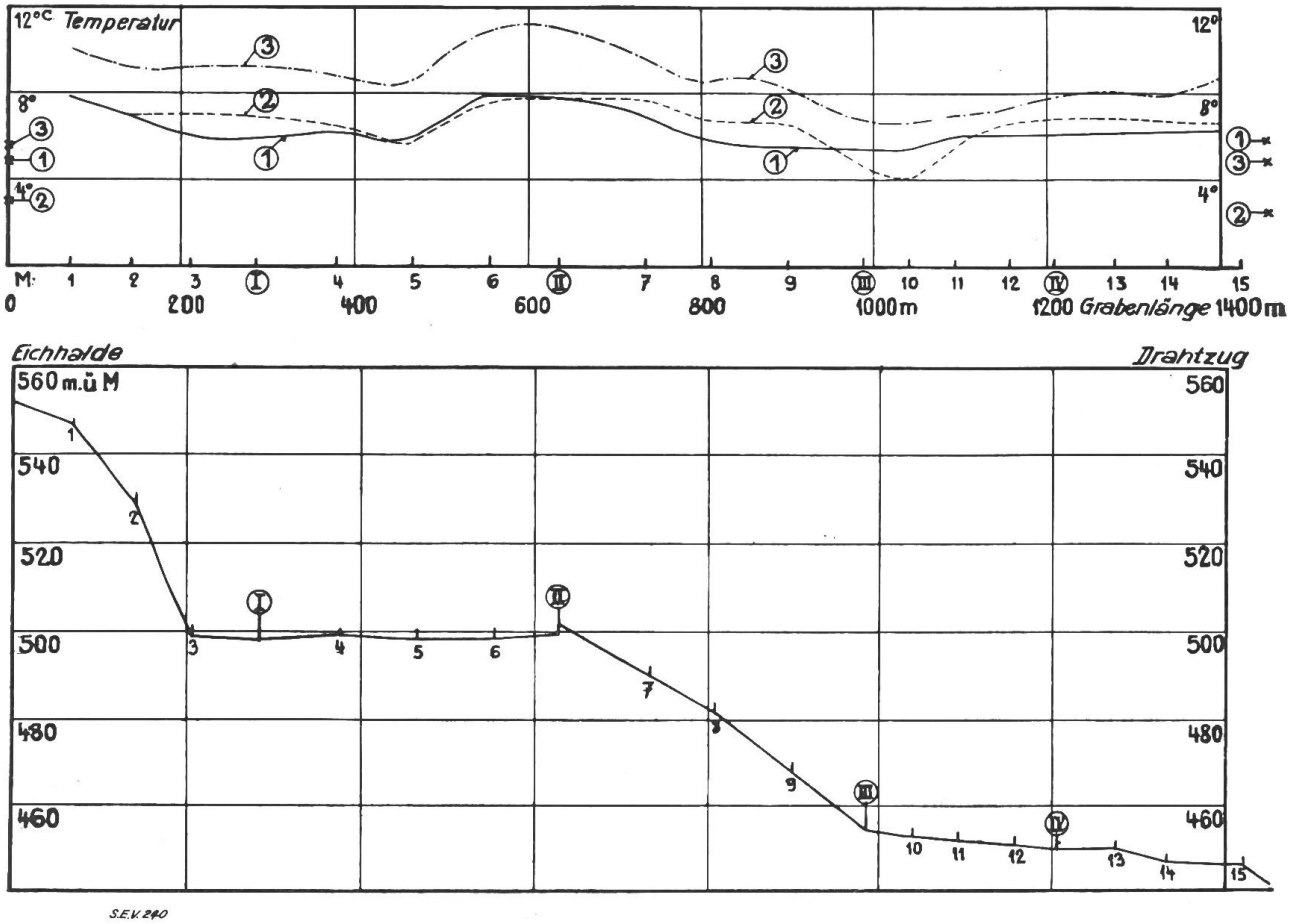

Fig. 8.

Oben: Verlauf der Lufttemperatur im Kanalinnern; unten: Höhenplan der Leitungen (5-fach überhöht).

(1) Lufttemperatur im Kabelkanal am 24. Nov. 1926 11 Uhr.
(2) „ „ „ „ 24. „ 1926 23 „
(3) „ „ „ „ 25. „ 1926 15 „

× Lufttemperatur im Freien.
M: 1 bis 15 Temperatur-Messstellen.
I bis IV Muffenschächte.

der 6 Adern bei gleicher Stromstärke für Leitung 2 höhere Werte ergaben, hat das Kupfer der Leitung 1 eine höhere Temperatur erreicht, als dasjenige der Leitung 2. Dagegen verlaufen die Temperaturen der Bleimäntel beider Leitungen annähernd in den gleichen Grenzen. Die grössere Kapazität der Leitung 1 lässt erkennen, dass die Kabel mehr Papier je Volumeneinheit besitzen als diejenigen der Leitung 2, also satter besponnen sind; zudem sind die Kabel der Leitung 1 mit zwei Schichten metallisierten Papiers versehen, welche den Kondensator der Idealform koaxialer Zylinder näherbringen. Zwischen der äussern Lage metallisierten Papiers und dem Bleimantel liegt beim Kabel 1 ein mit Kupferdraht durchwirktes Nesselband zur Herstellung inniger Berührung. An den Trennschichten verschiedener Materialien entstehen überdies in radialer Richtung kleine Temperatursprünge. Der Vergleich der Verlustwinkel beider Kabelsorten führt zum Schluss, dass die Imprägniermasse des Kabels 1 mehr Harze, diejenige des Kabels 2 mehr Oel enthält.

Es darf nicht unerwähnt bleiben, dass die Bestimmung der Temperatur der Kanalluft einigen Schwierigkeiten begegnete, weil bei jeder Messstelle nach Ablesung

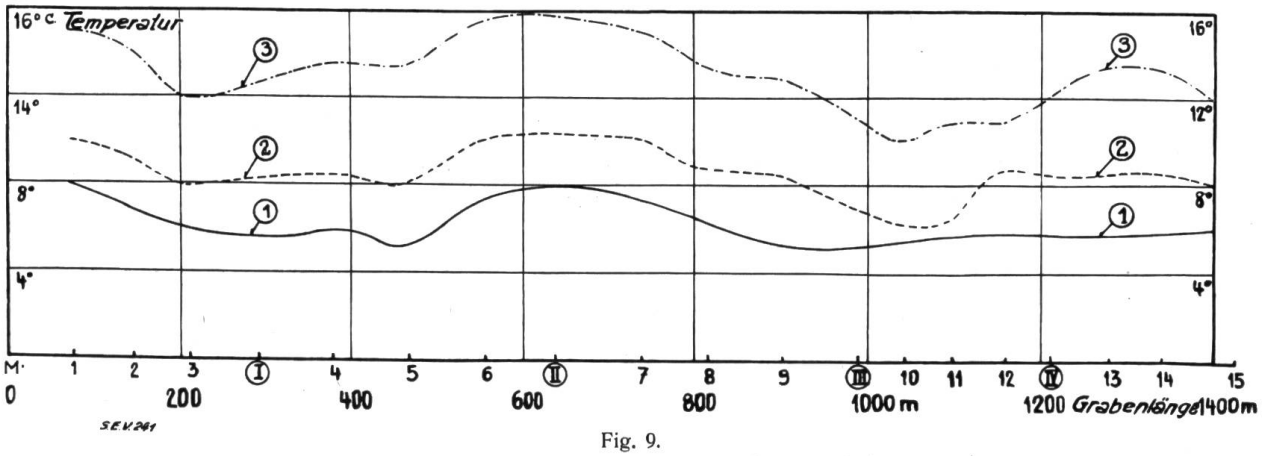

Fig. 9.
Temperaturverlauf längs des Kabelmantels, Phase b, Leitung 1.
(1) Temperatur des Bleimantels am 24. Nov. 1926 11 Uhr.
(2) „ „ „ „ 24. „ 1926 23 „
(3) „ „ „ „ 25. „ 1926 15 „
M: 1 bis 15 Temperatur-Messstellen. I bis IV Muffenschächte.

des schwebenden Thermometers der Nachbardeckel zur Ablesung der Manteltherm-ometer aufgekippt werden musste. Dadurch wurde die Kanalluft bei den sich alle 1 bis 2 Stunden folgenden Ablesungen in unerwünschtem Masse von aussen her beeinflusst. Da die etwas schwerfälligen Deckel an den Messstellen nur mangelhaft abdichteten, konnten keine zuverlässigen Feststellungen über die Zugverhältnisse im Kanal gemacht werden, dagegen legt Fig. 8 die Vermutung nahe, dass bei den mit Kreuzen angegebenen Aussentemperaturen der Endstellen ein leichter Zug der warmen Luft nach den höher liegenden Kanalpunkten vorgeherrscht hat. Der Verlauf der Manteltemperaturen lässt nach Fig. 9 den gleichen Schluss zu.

Alle Messungen an den verlegten Kabeln waren der Materialprüfanstalt des S. E. V. übertragen und sind von dieser in sorgfältiger Weise durchgeführt worden.

Die Freiluftstation Eichhalde ist mit je drei Einleiter-Porzellan-Endverschlüssen der beiden Lieferfirmen ausgerüstet. Im Schalterraum der Station Drahtzug gelangten zur Beschränkung der Reserve an den Siemens-Kabeln ebensolche Freiluft-Endverschlüsse zur Aufstellung. Bei den von der Fabrik Cortaillod gelieferten Kabeln

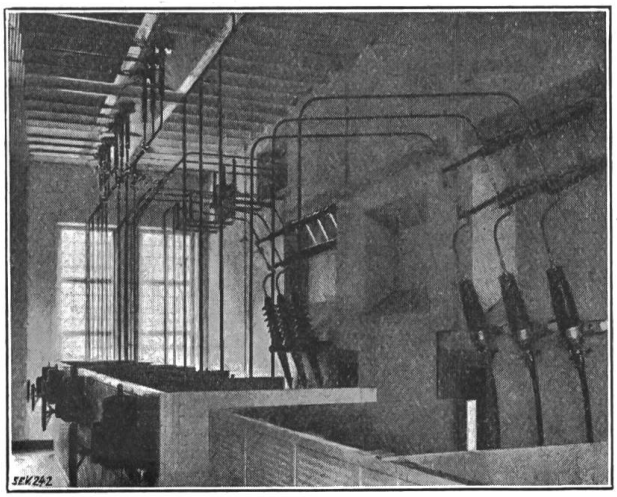

Fig. 10.
Blick in den 50 kV-Schalterraum Drahtzug. Rechts die Innenraum-Endverschlüsse Cortaillod, links im Hintergrund die Freiluft-Endverschlüsse Siemens.

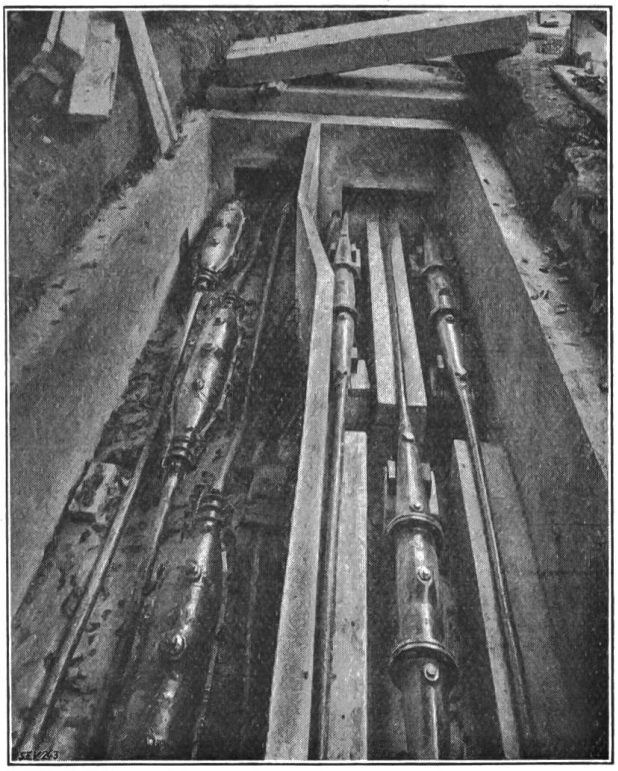

Fig. 11.
Blick in einen Muffenschacht (Nr. I). Links die Verbindungsmuffen Cortaillod, in der Mitte das Mess- und Telephonkabel, rechts die Verbindungsmuffen Siemens (20. Oktober 1926).

wurden versuchsweise Innenraum-Endverschlüsse aus Häfelyt angewendet. Diese sind im Laboratorium während einer Minute trocken mit 160 kV auf Ueber- bezw. Durchschlag und mit 30 kV im Dunkeln auf Glimmen geprüft worden (siehe Fig. 10).

Die Bleimäntel aller Kabel wurden mit den Körpern der Verbindungsmuffen leitend verbunden. Während die Siemens-Schuckertwerke die beidseitigen Endmuffen an Erde legten, sind diejenigen der Kabelfabrik Cortaillod am einen Ende gegen Erde isoliert aufgestellt. Siemens rechnet bei 150 Amp. Belastung mit einem Strom im Bleimantel von 30 Amp., Cortaillod dagegen setzt die Bleimäntel einer Teilstrecke durch die erwähnte Massnahme unter Spannung, welche für die ganze Strecke zu ca. 30 V berechnet wurde. Immerhin sind diese Verhältnisse nicht einwandfrei erreicht worden, weil die Bleimäntel gegen Erde nicht isoliert sind und dennoch ein Strom darin zirkuliert. Er kann aus der an den isoliert aufgestellten Endmuffen auftretenden Spannung gegen Erde ermittelt werden. Für 1 Amp. Belastung wurde an diesen Kabeln auf 1 km eine im Bleimantel induzierte Spannung von ca. 0,29 $\frac{V}{km, Amp.}$ errechnet. An einem trockenen Tage wurden die Orte ermittelt, an welchen die Bleimäntel dieser Leitung gegenüber Erde das Potential Null haben. Dabei ergaben sich Abstände vom Endpunkt der Leitung, welche für zwei 2 Phasen 780 bis 800 m und für die dritte ca. 410 m betrugen. Von einer Verdrillung der Phasen untereinander wurde der geringen Leitungslänge wegen abgesehen.

Während über die fabrikationstechnischen Details, sowie über die Konstruktion der Verbindungsmuffen und ihre Montage die Fabriken selbst die ihnen von Interesse scheinenden Mitteilungen in der Fachpresse machen mögen, sollen noch einige Aufschlüsse über die Verlegungsweise gegeben werden. Das Trasse durchquert einen Waldhang von 50 % Gefälle, verläuft im übrigen in horizontalen und bis zu 15 % geneigten Strassen und mündet am Ende in einen etwa 4 Jahre früher gebauten, begehbaren Kabelkanal, in welchem Platz für die 50 KV-Kabel vorgesehen war. Bei der Verlegung waren längere Strecken zu überwinden, auf welchen die Kabel vom Spezialwagen direkt an ihre Plätze gebracht wurden (siehe Fig. 13) und Stellen, wo die Kabel unter Hindernissen durchgezogen werden mussten (siehe Fig. 14). Um die durchgezogenen Kabellängen wegen der zu ertragenden mechanischen Beanspruchung möglichst kurz zu halten, zerlegte man, durch Einfügen von Verbindungsmuffen, für deren Unterbringung besondere Schächte erstellt wurden (siehe Fig. 11), die gesamte Strecke in 5 Teile. Die dadurch entstandenen Fabrikationslängen der 5 Teilstrecken liegen zwischen den Grenzen von 220 und 375 m.

Die Verlegung selbst erforderte wegen der leichten Verletzbarkeit des ungeschützten Bleimantels besondere Vorbereitungen. Das E.W.Z. schaffte einen speziellen Kabelverlegungswagen an, auf welchem Kabeltrommeln bis zu 2,4 m Durchmesser der Seitenwände, bis 1,3 m Breite und höchstens 5 Tonnen Gewicht transportiert und gleichzeitig um die horizontale Achse gedreht werden können. Der Wagen ist als Automobilanhänger gebaut und mit einer Seilwinde zum Einholen der Trommeln auf die Ladebrücke versehen. Fig. 12 zeigt diesen Vorgang auf der Baustelle. Der den Kabelwagen schleppende Traktor hatte eine grösste Steigung von 9 % und ein stärkstes Gefälle von 15 % zu überwinden. In dieser letzten Neigung war der Wagenzug genötigt, zweimal das Kanaltrasse zu kreuzen, was durch kräftige, wegnehmbare Brücken ermöglicht wurde. Der Grundsatz, die Kabel unter geringster mechanischer Beanspruchung von der Trommel an ihren endgültigen Platz im Kanal zu bringen wurde nach Möglichkeit befolgt durch Längsfahrt des Wagens am Graben (siehe Fig. 13) und wo dies nicht angängig war, durch Ziehen des Kabels auf kleinen Rollen (siehe Fig. 14). Diese waren mit etwa 2 m Distanz auf die betreffenden Grabenstrecken verteilt; zum voraus wurde ein Hanfseil ausgelegt, auf etwa 2 bis 3 m ein Mann in den Graben gestellt und das Kabelende mittelst eines Litzenstrumpfs zugfest mit dem Seil gekuppelt (siehe Fig. 14). Mit Signalmitteln ausgerüstetes Aufsichtspersonal war an der Trommel postiert,

begleitete den Kabelanfang und überwachte die Handlanger auf der Strecke. Auf diese Weise war ein stockungsfreies Ablaufen des Kabels von der Trommel gewährleistet. Auf den Steilstrecken ist alle 20 m eine Befestigung der Kabel mit-

Fig. 12.
Kabeltransport- und Verlegungswagen des EWZ beim Beladen auf der Baustelle.
(Wytikonerstrasse, 14. Oktober 1926).

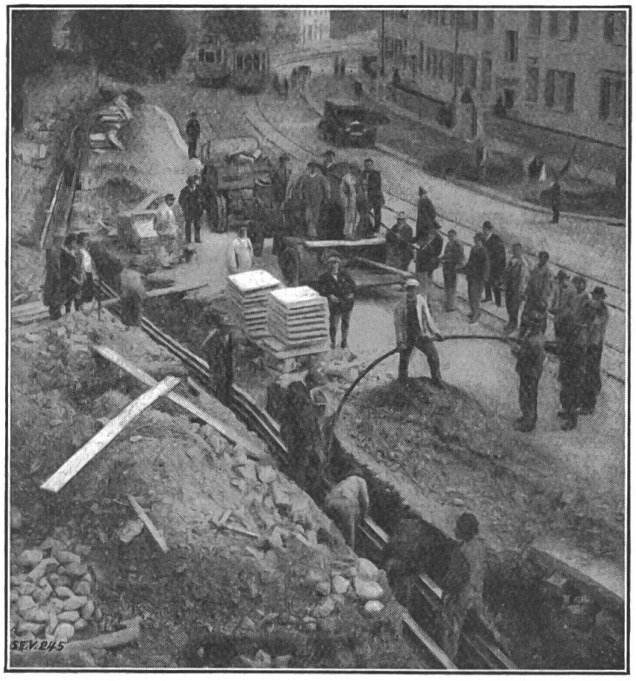

Fig. 13.
Auslegen des Kabels von der Trommel in den Kanal.
(Forchstrasse, 20. Oktober 1926).

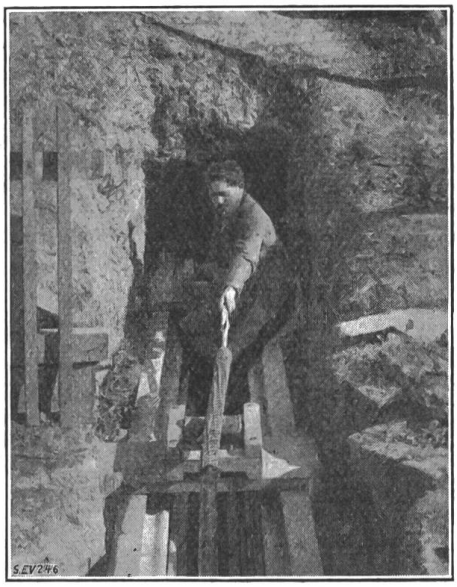

Fig. 14.
Ausziehen des Kabels auf Rollen mittelst Hanfseil und Litzenstrumpf.
(Bergheim-Kolonie, 14. Oktober 1926).

telst zweiteiliger Gusschellen mit Messingeinlagen und -Schrauben angebracht. Die Kabel besitzen an jenen Stellen auf 30 cm Länge eine warm aufgezogene Teerbandbewicklung von 51 auf 57 mm Durchmesser. Zum Schutz der Kabel wurden sofort nach beendigter Verlegung aller Kabel einer Teilstrecke durch Handlangergruppen unter Aufsicht von Kabelmonteuren die Kanaldeckel aufgelegt. Die Figuren 12 bis 14 geben Episoden aus der Verlegungszeit wieder. Vom Beginn derselben

verstrichen bis zur Inbetriebsetzung mit Einschluss der zeitraubenden Muffenmontage, der Kabelprüfungen und der Sonntage insgesamt 40 Tage.

Die beiden Kabelleitungen stehen seit Ende November 1926 ununterbrochen im Betrieb und haben bisher die auf sie gesetzten Hoffnungen vollauf erfüllt. Während dieser ersten 10 Betriebsmonate sind keinerlei Reparaturen notwendig geworden. Bei den Revisionen sind an einzelnen Verbindungsmuffen und Endverschlüssen geringe Austritte von Füllmasse beobachtet worden. Es ist vorgesehen, die mechanischen Nachprüfungen zu ergänzen durch jährlich zweimalige Messung des dielektrischen Verlustwinkels mittelst einer transportabeln Scheringschen Brücke.

Der für die 1560 m lange Leitungsstrecke aufgestellte Kostenvoranschlag weist bei einem Posten von Fr. 180 000.— für die 6 Hochspannungskabel eine Gesamtbausumme von Fr. 450 000.— auf. Daran sind die einzelnen Positionen wie folgt beteiligt:

		%
a)	Einleiterkabel	40,0
b)	Muffen, Endverschlüsse, Kleinmaterial	2,66
c)	Mess- und Telephonkabel	4,21
d)	Kabelkanäle	14,15
e)	Grabarbeiten, Schächte für die Muffen	15,0
f)	Transport und Verlegung der Kanäle und Kabel	7,33
g)	Kabelproben und Prüfanlage	5,55
h)	Kulturschaden, Strassenbeläge	3,60
i)	Pläne, Bauleitung	2,22
k)	Gebühren, Unvorhergesenes	5,28
		100 %

Aus einer einfachen Leitungslänge von 1560 m ergibt sich ein Preis von rund Fr. 290 000.— per km fertiger Doppelleitung. Die wirklichen Ausgaben betragen 89 % der vorgesehenen Gesamtkostensumme, während der unter Pos. *a)* angesetzte Betrag zu 92 % seiner Höhe aufgebraucht wurde. Dies lässt erkennen, dass der Kostenanschlag den wirklichen Ausgaben gut angepasst war. Die Untersuchung der Kostenverteilung auf die einzelnen Positionen zeigt, dass die teure Verlegungsweise, welche aber durch die waltenden Verhältnisse, durch die gebotene Vorsicht und durch die für eine städtische Energieversorgung verlangte hohe Sicherheit gerechtfertigt war, einen ansehnlichen Teil der Auslagen verursacht hat. Will man für unter einfacheren Verhältnissen zu bauende Kabelleitungen einen Schluss aus der beschriebenen Erstlingsanlage ziehen, so darf mit einer mutmasslichen Kapitaleinsparung von etwa 10 bis 15 % gerechnet werden, da einerseits die wirklichen Bauauslagen in den einzelnen Positionen nur etwa 90 % der im Kostenvoranschlag enthaltenen Beträge erreichen und anderseits für eine verhältnismässig kurze Baustrecke umfangreiche Vorarbeiten und Einrichtungen notwendig waren, deren Kostenanteil bei grösseren Anlagen eine kleinere Rolle spielen dürften. Stellt man diese Baukosten denen von Freileitungen gleicher Spannung, ausgerüstet mit zwei Strängen von etwa aequivalentem Leiterquerschnitt gegenüber, so kommt man in mittlerem Gelände auf einen 5 bis 6 mal kleineren Betrag für den Kilometer fertiger Freileitung. Der Vergleich lässt deutlich erkennen, dass ausser den bisherigen technischen Schwierigkeiten auch solche wirtschaftlicher Natur die Schuld tragen, warum man heute Kabel nur dort anwendet, wo man mit Freileitung die gestellte Aufgabe nicht lösen kann.