Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 20 (1929)
Heft: 22

Artikel: Die Hochspannungskabelanlage der Kraftwerke Oberhasli A.-G.
Autor: Schneeberger, P.E.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1056834

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke | REDAKTION Zürich 8, Seefeldstr. 301 | Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union de Centrales Suisses d'électricité

Verlag und Administration | Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G. Zürich 4, Stauffacherquai 36/38 | Editeur et Administration

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet | Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XX. Jahrgang XXe Année | Bulletin No. 22 | November II Novembre II 1929

Die Hochspannungskabelanlage der Kraftwerke Oberhasli A.-G.

Von *P. E. Schneeberger,* Ingenieur, Brugg.

621.319.34 : 621.312.134(494)

Die im Kraftwerk Handeck der Kraftwerke Oberhasli A.-G. erzeugte Energie (ca. 220×10⁶ kWh/Jahr, 112 000 bis 128 000 kVA) wird unter 50 kV Spannung bis nach Guttannen durch Kabel zu Tal transportiert. Die Kabel liegen in einem begehbaren Stollen, welcher im Winter als einziger Zugang zum Kraftwerk dient.

Im folgenden Artikel wird diese Kraftübertragung beschrieben und auf die Fabrikation, die Prüfung und die elektrischen Eigenschaften der Kabel eingegangen. Ferner werden die Verbindungsmuffen und Endverschlüsse behandelt. Zum Schluss gibt der Autor ein Bild der interessanten Verlegungsarbeiten.

L'énergie produite à la centrale de la Handeck des Forces Motrices de l'Oberhasli, soit 220 millions de kWh par année environ, est transportée dans la vallée par câbles, sous une tension de 50 kV. Ces câbles sont posés dans un tunnel spacieux, qui sert en hiver de seule voie d'accès à la centrale.

Dans l'article suivant, l'auteur décrit l'installation des câbles, en s'arrêtant à leur fabrication, aux essais subis et à leurs propriétés électriques. Il parle ensuite des manchons de raccordement et des boîtes terminales et termine sur un aperçu des travaux de pose.

Das Kraftwerk Handeck der Kraftwerke Oberhasli A.-G. (K. W. O.) [1]) mit seinen vier Generatoren von je 28000 bis 32000 kVA Dauerleistung muss, infolge des in den Wintermonaten unzugänglichen und lawinengefährdeten Gebietes zwischen Guttannen und Handeck, die erzeugte Energie durch Kabel zu Tal liefern. Eingehende Vorstudien haben den Weg für die günstigste Anlage dieser Leistungsübertragung im Hochgebirge geebnet.

Die technischen Vorbedingungen waren wie folgt gestellt:

Das Kraftwerk Handeck wird zur Aufnahme von vier Maschinengruppen, bestehend aus je einer Freistrahlturbine mit einem Drehstromgenerator für 11000 V, gebaut. Jedem Generator ist, ohne Zwischenschaltung eines Oelschalters, ein Transformator zugeordnet, welcher die Spannung auf ca. 50000 V erhöht (vergl. Schaltungsschema Fig. 1).

An die Oberspannungsklemmen der Transformatoren ist, ohne Zwischenschaltung eines Oelschalters, die Drehstrom-Hochspannungskabelleitung von ca. 5 km Länge und 50 kV Betriebsspannung mit *direkt geerdetem Sternpunkt* angeschlossen. Beim Dorfe Guttannen geht die Hochspannungs-Kabelleitung in eine Hochspannungs-Freileitung über. Der Uebergang von den Kabelleitungen auf die Freileitungen findet in einer Gebäude-Uebergangsstation statt. Von dort führen die Freileitungen ca. 7 km weit nach der Freiluftstation Innertkirchen, wo die Energie noch einmal,

[1]) Siehe Bulletin S.E.V. 1928, No. 8, S. 258.

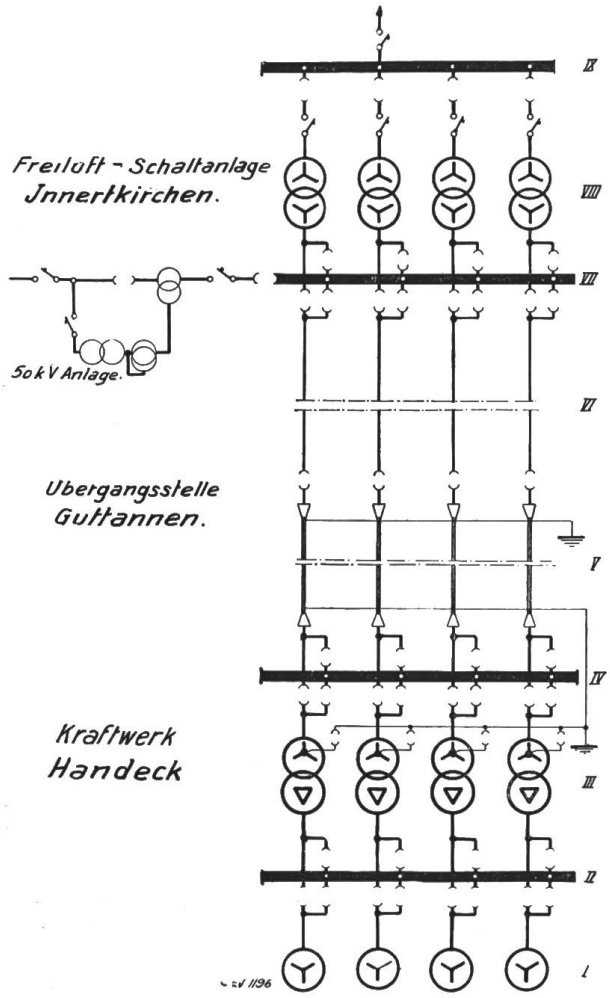

Fig. 1.

Schaltungsschema der Kraftübertragung Handeck-Innertkirchen.

I 4 Generatoren zu je 28 000 kVA
II Hilfsschiene 11 kV
III 4 Transformatoren 11/50 kV
IV Hilfsschiene 50 kV
V Kabel 50 kV
VI Freileitung 50 kV
VII Hilfsschiene 50 kV
VIII 4 Transformatoren 50/150 kV
IX Sammelschiene 150 kV

wiederum ohne Zwischenschaltung eines Oelschalters, durch Drehstrom-Transformatoren von 50 auf 150 kV hinauftransformiert wird. Die Oberspannungsseite der Transformatoren ist durch einen automatischen Oelschalter an die Höchstspannungs-Sammelschiene angeschlossen, von welcher aus 150 kV-Leitungen von einigen 100 km Länge abzweigen. Turbine, Generator, Auftransformator, Kabel, Freileitung, zweiter Auftransformator und 150 kV-Oelschalter bilden somit eine Einheit, die normalerweise in Innertkirchen zu- oder abgeschaltet und im Kraftwerk Handeck reguliert wird. Ueber Hilfssammelschienen in Handeck und Innertkirchen kann jedoch ein Generator auch mit andern als dem zugehörigen Transformator zusammenarbeiten.

Die notwendige ständige Verkehrsverbindung zwischen Kraftwerk und Guttannen ist durch einen begehbaren Stollen gewährleistet (Fig. 2). Dieser wurde so ausgebaut, dass er ausser den 4 Drehstromkabelschleifen auch eine Akkumulatorenlokomotive aufnehmen kann. Das mittlere Gefälle des Stollens ist bei einer Gesamtlänge von 4,8 km 5 %. Das max. Gefälle beträgt 8,8 %.

Die Kabel können im Stollen reichlich in Sand eingebettet werden. Die Sandeinfüllung wird durch fliessendes Wasser dauernd durchfeuchtet und dadurch eine möglichst günstige Wärmeableitung erreicht. Fig. 2 zeigt die detaillierte Verlegungsart. Der in der Mitte des Stollens fliessende Bach wird von Zeit zu Zeit fischtreppenartig so aufgebaut, dass das Wasser den Sand ständig durchdringen muss.

Die Kabel waren für folgende Daten vorzusehen:

Nennleistung	28000 kVA	Frequenz	50 Per/s
Nennspannung	50 kV (verkettet)	Verlegung in durchfeuchtetem Sand in einem Stollen.	
Nullpunkt	geerdet		
Nennstrom	310 A	Gefälle: mittleres	5,0 %
		max.	8,8 %

Kabelkonstruktion. Als günstigste Konstruktion wurde ein Kabel mit folgenden Abmessungen gewählt (vergl. Fig. 3):

Kabelquerschnitt	180 mm² Kupfer	Doppelte Juteschicht	4 mm
Isolation	12 mm	Aussendurchmesser des Kabels	ca. 56 mm
Bleimanteldicke	3 mm	Kabelgewicht per Meter	ca. 8,6 kg
2 geteerte Papiere	0,3 mm	Mittlere Fabrikationslänge	900 m

Um die Frage des Leiterquerschnittes möglichst abzuklären, wurden vorgängig der Bestellung im Stollen Belastungsversuche durchgeführt. Diese Untersuchungen

ergaben, dass ein Querschnitt von 120 mm² hinsichtlich Erwärmung genügen dürfte. Wirtschaftliche Erwägungen hingegen liessen einen höhern Kupferleiter günstiger erscheinen, so dass ein Leiterquerschnitt von 180 mm² vorgeschrieben wurde.

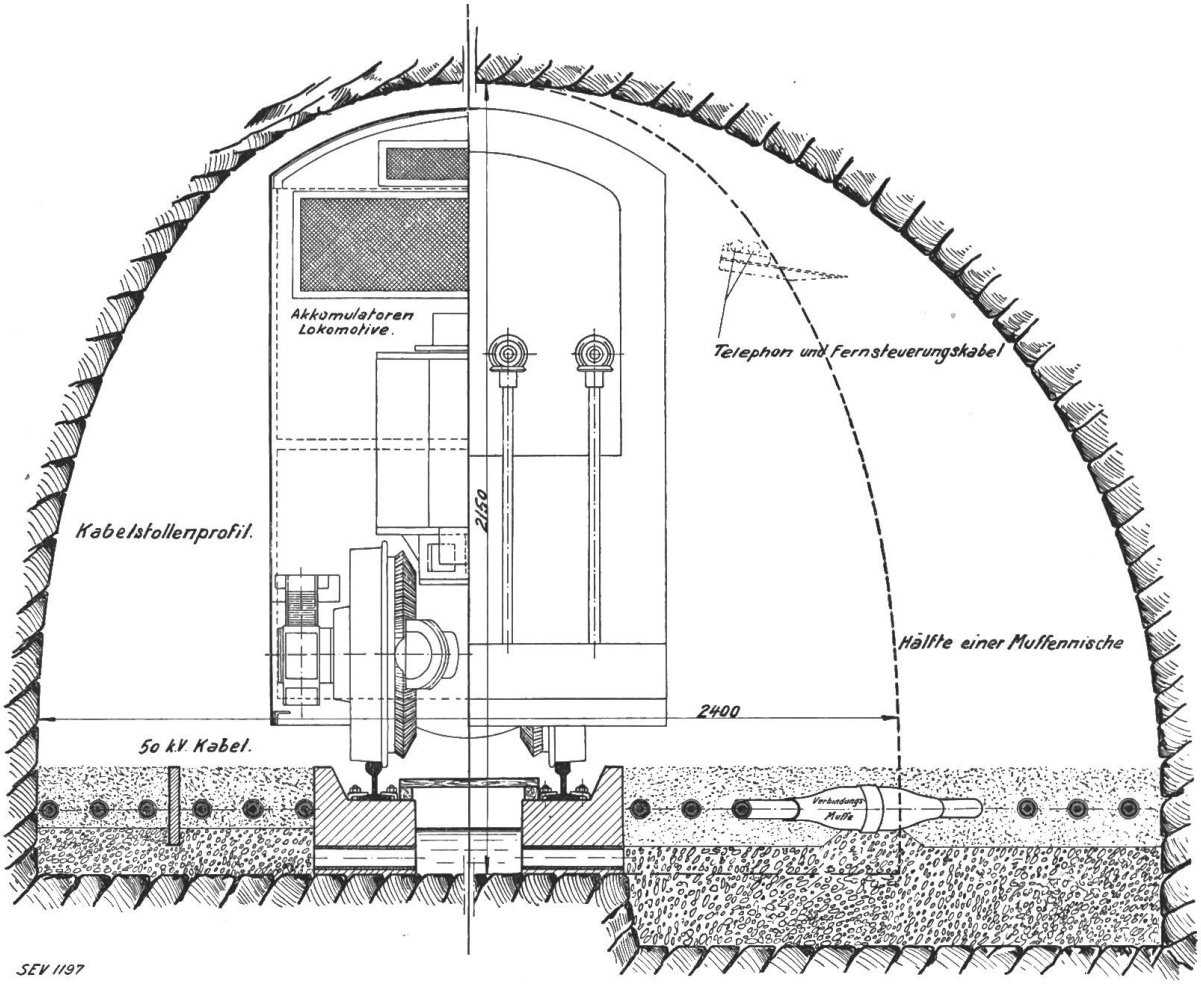

Fig. 2.
Querschnitt durch den Kabelstollen.

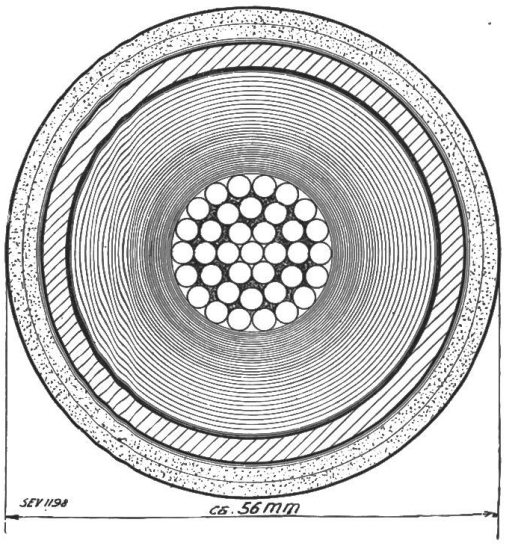

Fig. 3.
Querschnitt durch das 50 kV Kabel, 1 × 180 mm².

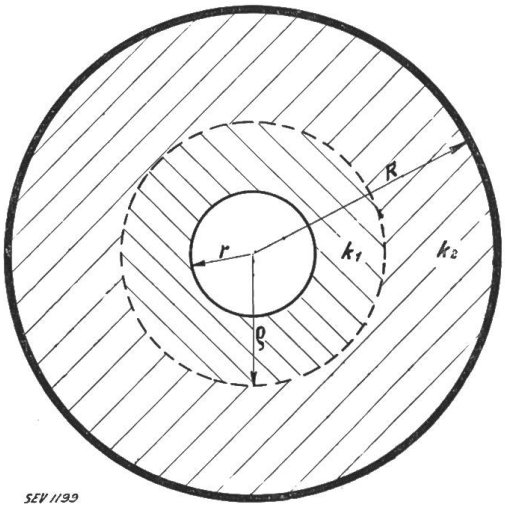

Fig. 4.
Querschnitt durch das 50 kV Kabel, 1 × 180 mm².

Das Kupferseil besteht aus einer normalen 37er Konstruktion mit Drähten von 2,5 mm Durchmesser. Die Kupferqualität entspricht den Vorschriften des S.E.V. Die Hohlräume zwischen den einzelnen Kupferdrähten wurden, um ein Fliessen der Kabelmassen infolge der Höhendifferenz möglichst zu verhindern, mit Papiergarn ausgefüllt.

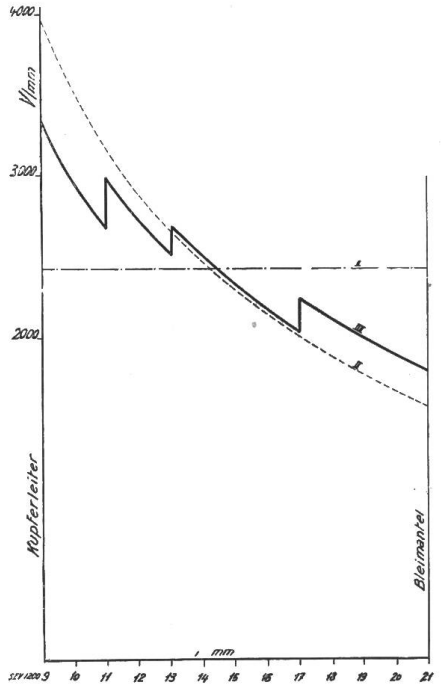

Fig. 5.
Theoretische dielektrische Beanspruchung der 12 mm starken Isolation.

I Ideale Beanspruchung.
II Mit homogener Isolation.
III Mit 4fach abgestufter Isolation.

Die Isolation. Der wichtigste Teil eines Hochspannungskabels ist die Isolation. Je sorgfältiger sie aufgebaut und behandelt wird, desto betriebssicherer wird die Anlage. Unter besonderer Berücksichtigung des Umstandes, dass diese Kabel absolut betriebssicher sein müssen, war vom Besteller Wert darauf gelegt worden, die spezifische Beanspruchung möglichst gering zu halten.

Die Isolationsstärke der Oberhasli-Kabel beträgt 12 mm. Als Isolationsmaterial kommt in der heutigen Hochspannungskabeltechnik nur imprägniertes Papier in Frage. Die Auswahl der Papiersorten ist dem Fabrikanten durch die neuere Erkenntnis der elektrischen Durchschlagsphänomene einerseits und durch die verbesserten Fabrikationseinrichtungen der Papierfabriken anderseits in letzter Zeit erleichtert worden. Es bedurfte jahrelanger Forschungsarbeit, um die günstigsten Papiermischungen herauszubringen. Der Dichtigkeitsgrad der Papiermasse ist für den Aufbau des Kabels von grosser Bedeutung. Betrachten wir die theoretische Kurve der elektrischen Feldbeanspruchung eines Einleiterkabels, so ist auffallend, dass nur wenige Papierschichten hoch beansprucht werden. Nach der bekannten O'Gormanschen Formel tritt der maximale Spannungsgradient

$$e_{max} = \frac{U}{r \ln \frac{r+\delta}{r}}$$

wo U die Spannung zwischen Kupferleiter und Blei,
r den Radius des Leiters und
δ die Isolationsstärke ist,

an der Leiteroberfläche auf. Neuere Untersuchungen haben aber ergeben, dass bei Durchschlagsversuchen die stärksten Verbrennungserscheinungen sich nicht direkt am Leiter, sondern in der Isolationsschicht im Abstand von ca. 2 mm vom Leiter befanden. Ueber diese Erscheinung werden in nächster Zeit die angesetzten Versuche erschöpfend Auskunft geben.

Die Möglichkeit, Papiere mit verschiedenen Dichtigkeitsgraden herzustellen, gibt dem Kabelfabrikanten nun ein Mittel in die Hand, die ungünstige Feldverteilung etwas zu verbessern. Papiere verschiedener Dichte haben verschiedene Dielektrizitätskonstanten. Legt man an den Leiter, als der Stelle der theoretisch grössten Beanspruchung, Papiere von hoher Dielektrizitätskonstante und verwendet man an der Peripherie der Isolation Papiere geringerer Dielektrizitätskonstante, so ergibt sich aus der Beziehung:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{c_2}{c_1} = \frac{k_2 \ln \frac{\varrho}{r}}{k_1 \ln \frac{R}{\varrho}},$$

wo e_1 und e_2 die beiden Teilspannungen,
c_1 und c_2 die beiden Teilkapazitäten,
k_1 und k_2 die beiden Dielektrizitätskonstanten und
r, ϱ und R die Halbmesser

(in Fig. 4) darstellen, die Möglichkeit, das Dielektrikum wesentlich günstiger zu beanspruchen. Die sorgfältige Auswahl der Papiersorten gestattet, verschiedene

Teilkapazitäten zu erzeugen und dadurch die Spannungsverteilung im Kabeldielektrikum günstiger zu gestalten. Fig. 5 gibt die Darstellung des berechneten Verlaufes der Beanspruchung der Oberhasli-Kabel. Es geht daraus hervor, dass die maximale Beanspruchung von 3900 V/mm bei normaler Ausführung ohne Abstufung auf 3300 V/mm herunter gesetzt werden konnte.

Mechanisch besteht der Aufbau der Isolation aus ca. 140 Papierschichten von vier verschiedenen Dielektrizitätskonstanten. Das Aufbringen der Isolation erfolgte mittels der modernen Tangential-Spinner-Isoliermaschine (Fig. 6).

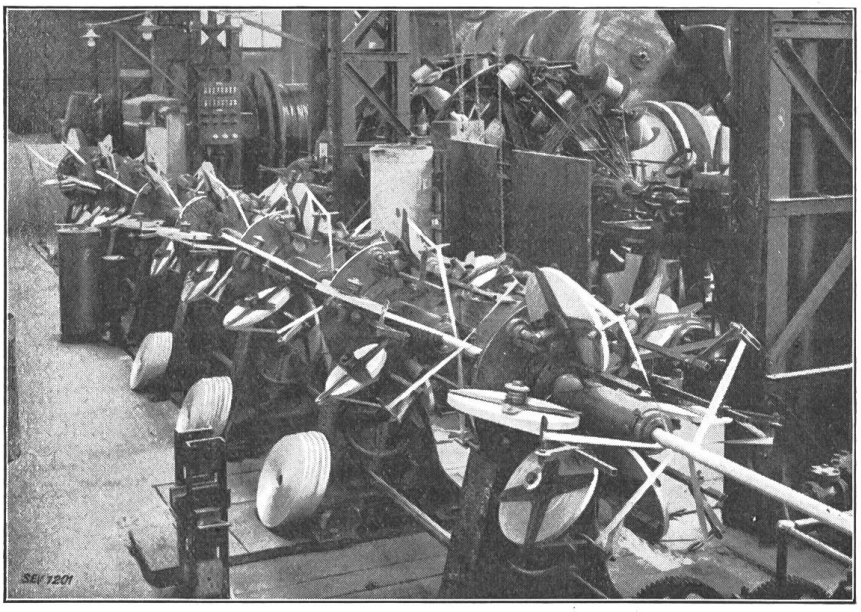

Fig. 6.
Tangential-Spinner-Isoliermaschine.

Die Kabel wurden nach dem Verfahren von M. Höchstädter, welches nachstehend kurz beschrieben ist, gegen Glimmerscheinungen unter dem Bleimantel geschützt. Den Abschluss der Isolation bildet eine auf Papierband kaschierte Aluminiumfolie. Die letztere dient dazu, Gaseinschlüsse zwischen Isolation und Bleimantel, welche infolge der Ausdehnungsmöglichkeit des Bleimantels entstehen könnten, unschädlich zu machen. Die hauchdünne Aluminiumfolie folgt ohne weiteres den Bewegungen der Isolation, welche dieselbe infolge der Temperatureinflüsse ausführt. Der dicke Bleimantel kann diesen Schwankungen nicht folgen. Immerhin ist das Anbringen dieses metallisierten Papiers in erster Linie als Verbesserung des Kabels und nicht als absolute Notwendigkeit anzusprechen.

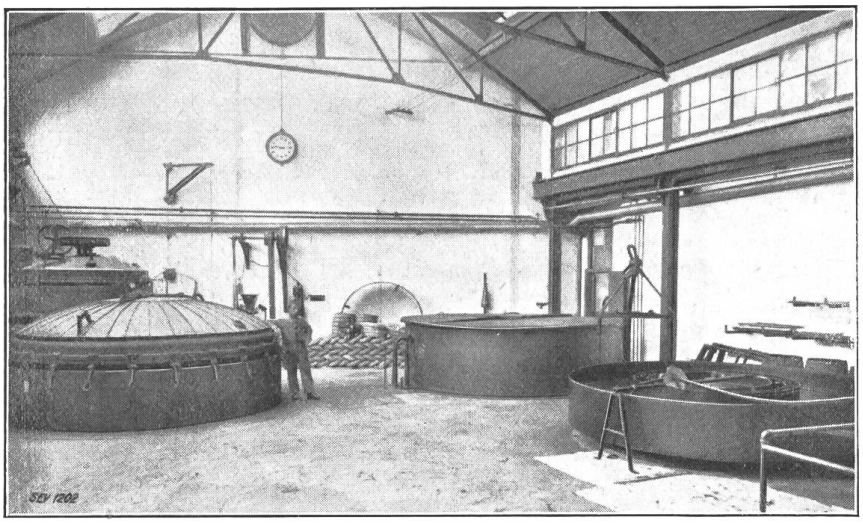

Fig. 7.
Vakuumtrocken- und Imprägnierkessel.

Nebst der sorgfältigsten Auswahl des Isolierpapiers ist die Behandlung des Kabels im Trocken- und Tränkkessel von einschneidender Wichtigkeit. Zur Fabrikation der Oberhaslikabel wurden deshalb von den Kabelwerken Brugg folgende besonderen Vorkehrungen getroffen. Die bestehenden Kesselanlagen, mit Vakuumtrocken- und Imprägnierkesseln bis 2,50 m im Durchmesser, wurden ergänzt durch eine neue ganz bedeutend grössere Anlage mit Vakuumtrocken- und Imprägnier-

kesseln und besonderen Kühlgefässen, beide von 4 m Durchmesser, ferner einem 17 m^3 haltenden Mischgefäss mit mechanischem Rührwerk und einer speziellen zweistufigen Hochvakuumpumpe für eine Leistung von 660 m^3/h mit zugehörigem Oberflächen-Kondensator von 32 m^2 Kühlfläche (Fig. 7). Das Fassungsvermögen des Haupttrocken- und Imprägnierkessels beträgt 22,5 m^3. Es können darin z. B. an Hochspannungskabeln 1×200 mm^2 für 50 kV Betriebsspannung gleichzeitig ca. 4000 m unter Vakuum getrocknet und imprägniert werden. Die in diesen aussergewöhnlich grossen Kesseln in einem Stück herstellbaren ganz bedeutenden Kabellängen sind meistens sehr erwünscht, um mit entsprechend weniger Verbindungsmuffen auszukommen, speziell bei Hochspannungskabeln. Ferner ermöglichen diese Kessel mit so bedeutenden Durchmessern während der Fabrikation die Einhaltung von durchwegs grössern Krümmungsradien für die Kabel als bisher in den kleineren Kesseln, was für den möglichst günstigen Ausfall der Kabel bezüglich Beständigkeit des Dielektrikums, besonders bei sehr hohen Betriebsspannungen, von ausschlaggebender Bedeutung ist. Selbstverständlich ist diese Anlage mit registrierenden Fernthermometern und Vakuummetern ausgerüstet, so dass die Vorgänge im Kessel genau kontrolliert werden können. Das über der Isolation angebrachte metallisierte Papier gestattet während dem Trocken- und Imprägnierungsprozess das Kabel auch elektrisch zu beobachten und die vollständige Durchtränkung zu konstatieren.

Den *Schutz des Kabels* gegen Feuchtigkeit und mechanische Verletzung übernimmt der nahtlos umpresste Bleimantel von 3 mm Dicke. Der Ohmsche Widerstand desselben wurde zu 0,487 Ω/km bestimmt, was einer Leitfähigkeit von 4,86 bei 18° C entspricht. Die Messung des Ohmschen Widerstandes des Bleis erfolgte speziell, um ein Bild über die Erdungswiderstände bei allfälligem Erdschluss des 50 kV-Netzes zu erhalten. Die Bleimäntel sämtlicher 4×3 Kabel werden alle 50 m miteinander verbunden. Diese Verbindungsstellen werden ferner auch an die Schienen der Stollenbahn (Eisenquerschnitt 2110 mm^2) angeschlossen. Dadurch wird erreicht, dass auf keinen Fall im Stollen gefährliche Potentialdifferenzen und Schrittspannungen entstehen können. Dies muss um so mehr verhindert werden, da der Stollen im Winter als einziger Zugangsweg zum Kraftwerk dient.

Durch die Verbindung der Bleimäntel erhält man zwischen dem Kraftwerk Handeck und der Uebergangsstation Guttannen eine Erdverbindung von ca. 0,2 Ω Widerstand und einem Bleiquerschnitt von ungefähr 5000 mm^2.

Als äusserer Schutz des Bleimantels gegen chemische Einflüsse und mechanische Verletzung dient je eine doppelte Papier- und Juteschicht. Die Umspinnungen werden getränkt und sehr intensiv bitumiert.

Abnahme-Prüfungen vor der Verlegung.

Sämtliche Messungen an dem vorgesehenen Probekabel, sowie die Durchführung der Abnahmeproben an dem zum Transport fertiggestellten Kabeln besorgte das Centraal Bureau der „Vereeniging van Directeuren van Electriciteitsbedrijven in Nederland“ in Arnhem (Holland). Diese Organisation, unter Leitung von Herrn Direktor J. C. van Staveren stehend, hatte Gelegenheit, infolge der ausgedehnten holländischen Hochspannungskabelanlagen, eingehende Studien über die zweckmässigsten Prüfungen von Hochspannungskabeln durchzuführen. Die aufgestellten Prüfbedingungen dieser Prüfstätte haben im allgemeinen die Anerkennung von Auftraggebern und Kabellieferanten gefunden. Die Versuche, die an den Kabeln für die hier besprochene Anlage durchgeführt wurden, waren von der Bauleitung der Kraftwerke Oberhasli in enger Zusammenarbeit mit dem holländischen „Centraal Bureau“ vorgeschrieben worden.

Vorarbeiten in den Fabriklaboratorien, die der Abklärung verschiedener Fragen der Hochspannungskabelprüfung und speziell der Muffenuntersuchungen dienten, waren vor der Vergebung durch Herrn Oberingenieur A. Kleiner der K. W. O. angeregt und durchgeführt worden.

Da zum ersten Mal in der Schweiz auf so eingehende und erschöpfende Art Hochspannungskabel untersucht wurden, sei hier näher auf diese Versuche eingegangen. Dabei sei hauptsächlich dem Untersuchungsbericht, den der Abnahme-Ingenieur Herr de Zoeten, Arnhem, erstattet hat, gefolgt.

Untersuchungen an einer Probelänge von 125 m Länge.

Das Kabel wurde folgenden Prüfungen unterworfen:

a) Dielektrische Verluste,
b) Biegeprobe,
c) Zeit-Durchschlags-Charakteristik,
d) Erwärmung,
e) Verluste bei voller Belastung.

a) Dielektrische Verluste. Die dielektrischen Verluste wurden in Funktion der Spannung auf der ganzen Probelänge in der Brücke nach Prof. Schering für grosse Kabellängen bestimmt (Fig. 8). Als verlustfreier Kondensator wurde ein Luftkondensator nach Prof. Petersen mit einer Kapazität von 45 $\mu\mu$F verwendet. Als Nullinstrument diente ein Vibrationsgalvanometer von sehr hoher Empfindlichkeit. Die Spannung wurde bei allen Messungen in 9 gleichen Stufen von 20000 auf 65000 V erhöht und bei jeder Stufe die Verluste gemessen.

Die Kabelenden waren zum Schutz gegen Gleitentladungen mit einem speziellen, halbleitenden Anstrich versehen. Ausserdem verhüteten Schutzringe, dass die Endenverluste in die Messung eingingen. Die Spannungsmessung erfolgte mittels der Messvorrichtung nach Haefely, wo ein Präzisions-Milliampèremeter den Ladestrom eines aus zwei Kugelkalotten bestehenden Kondensators, unter Zwischenschaltung von zwei Glühkathodenröhren, misst. Diese Einrichtung wurde vor jeder Messreihe mittels der normalen Kugelfunkenstrecke nach den Normen von Peek geeicht.

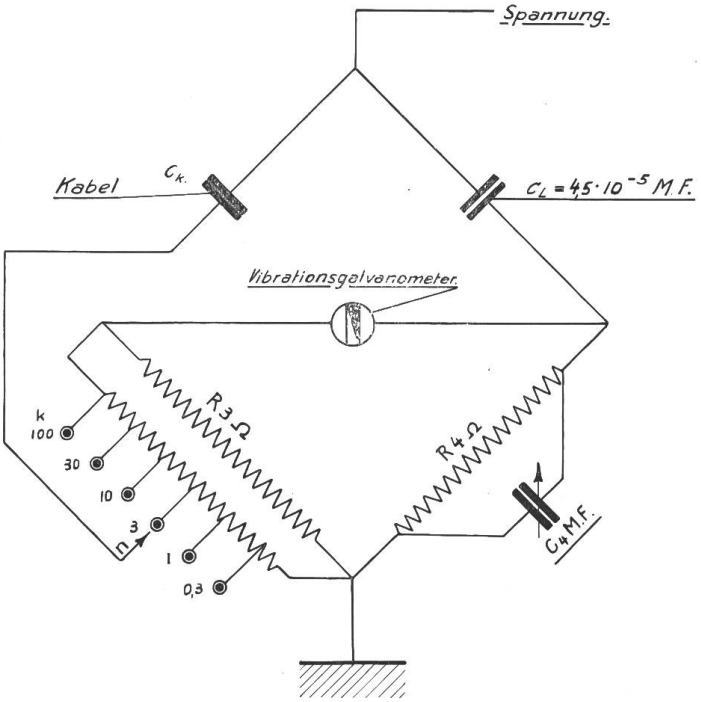

Fig. 8.
Scheringbrücke.

Bei einer Kabeltemperatur von 18 °C wurde vorerst die jungfräuliche Ionisierungs-Charakteristik aufgenommen.

Anschliessend an diese Versuche wurde das Kabel elektrisch durch Gleichstrom erwärmt und die Kupfertemperatur aus der Widerstandsänderung berechnet. Während der Erwärmungszeit bestimmte man die Verluste bei Betriebsspannung, um bei dieser Gelegenheit die Kurve der Verluste als Funktion der Temperatur zu erhalten. Der Heizstrom wurde nun während ca. 4 Stunden auf dem Kabel belassen und die Kabeltemperatur dadurch auf einen konstanten Wert von 43,5 °C gebracht. Bei dieser Temperatur wurde nochmals die Charakteristik der dielektrischen Verluste in Funktion der Spannung aufgenommen und anschliessend daran das Kabel in einem Wasserbassin auf ca. 17 °C abgekühlt. Nach 12stündiger Abkühlung erfolgte die Aufnahme der Verlustkurve zum dritten Mal. Der Vergleich der drei Kurven

(Fig. 9) zeigt uns eine sehr geringe Abhängigkeit der Verluste von der Spannung. Die Imprägnierung des Kabels lässt nichts zu wünschen übrig, denn speziell die nach der raschen Abkühlung von 43,5 °C auf 17 °C aufgenommene Kurve deutet auf keine Ionisationserscheinungen hin.

Die Verluste sind in der neu eingeführten Einheit $\frac{W/m}{kV^2}$ ausgedrückt.

Die von einem Kabel aufgenommene Leistung ist durch die Gleichung $P = U\,I\cos\varphi$ bestimmt, wo U die Spannung, I den Ladestrom und $\cos\varphi$ die Phasenverschiebung zwischen den beiden Faktoren darstellt. Der Ladestrom ist bestimmt durch die Gleichung $I = U\,\omega\,C$, wo C die Kabelkapazität bezeichnet. Demnach kann der Wattverlust geschrieben werden:

$$P = U^2\,\omega\,C\,\cos\varphi.$$

Solange die Kapazität eines Kabels unverändert ist und die Wattverluste dem Quadrat der Spannung proportional bleiben, wird $\frac{P}{U^2}$ eine Konstante sein. Die Kurve dieser Verluste zeigt uns deutlich, wenn in einem Kabel Ionisierungserscheinungen auftreten. Die bis zu diesem Punkte annähernd horizontal verlaufende Linie wird gebrochen und steigt je nach dem Umfang des Glimmens stärker oder schwächer an.

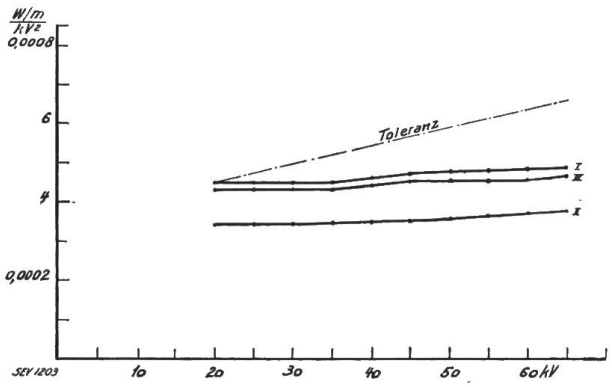

Fig. 9.
Dielektrische Verluste in Funktion der Spannung.
Kabel 1 × 180 mm²
I Jungfräuliche Kurve bei 18° C
II Nach Erwärmung auf 43,5° C
III Nach Abkühlung auf 17° C

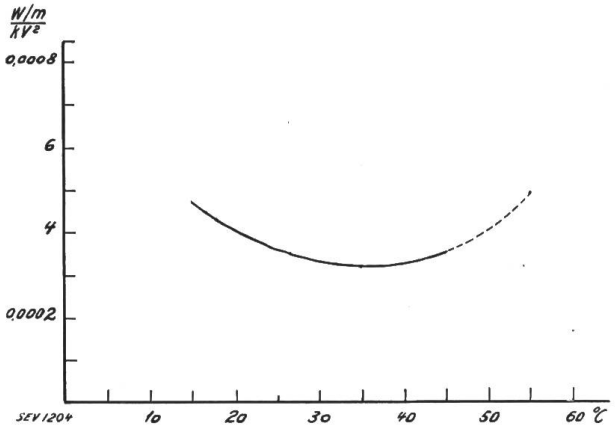

Fig. 10.
Dielektrische Verluste in Funktion der Temperatur bei 30 kV. Kabel 1×180 mm², 50 kV.

Der Verlauf der V-Kurve [Verluste in Funktion der Temperatur] (Fig. 10) ist in erster Linie abhängig von der Zusammensetzung der Imprägniermasse. Diese Kurve ist infolge ihres flachen Verlaufes als sehr günstig anzusprechen. Es ist augenscheinlich, dass eine flache V-Kurve, die auf eine gewisse Unabhängigkeit der dielektrischen Verluste von der Temperatur im Betriebe schliessen lässt, zu begrüssen ist.

b) Biegeprobe. An einem Kabelabschnitt von 15 m Länge führte man, um die Widerstandsfähigkeit des Kabels gegen mechanische Beanspruchungen zu untersuchen, die vorgeschriebene Biegeprobe durch. Das Kabel wurde dabei dreimal nacheinander in je drei vollständigen Windungen um einen Dorn gewickelt, dessen Durchmesser das dreissigfache des Kabeldurchmessers über Blei betrug. Hierauf wurde das Kabel einer Prüfung mit einer Wechselspannung von 90000 V zwischen Ader und Bleimantel während 4 Minuten unterworfen; dabei trat kein Durchschlag auf. Die Durchschlagsfestigkeit nach der Biegung liess nichts zu wünschen übrig und das Papier wies keinerlei Risse oder Stauchungen auf.

c) Zeitdurchschlags-Charakteristik. Ein Bild über die effektiven Durchschlagsverhältnisse gibt uns die Zeit-Durchschlagskurve. Für die effektiven Spannungen 230, 200, 150, 120, 100 kV wurden die Zeiten bis zum Durchschlag bestimmt. Die erhaltenen Resultate, in einer Kurve zusammengestellt, geben ein getreues Bild der elektrischen Festigkeit des Kabels. Diese Probe ist sehr wertvoll zur Feststellung, welche kurzdauernden Ueberspannungen die Isolation aushalten kann. Weiter ist es wichtig, zu wissen, ob die für alle Längen vorgeschriebene Spannungsprobe von 70 kV keine bleibende Beschädigung des Dielektrikums bewirkt. Diese Durchschlagsversuche wurden an 10 m langen Stücken durchgeführt. Die Versuche ergaben die in Fig. 11 dargestellten Resultate. Bei der Betrachtung der Kurve wird dem Leser auffallen, dass zwischen dem Aufnahmepunkt 150 kV und demjenigen von 200 kV eine scharfe Krümmung der Kurve konstatiert werden kann. Diese Erscheinung weist unserer Ansicht nach auf den Uebergang vom Wärmedurchschlag zum Durchschlag infolge Stossionisation hin. Die Untersuchung der Durchschlagsstellen zeigt deutlich bei Spannungen von 150 kV abwärts stärkere Verbrennungen mit den typischen Verästelungen. Ueber 150 kV ist die Durchschlagsstelle konzentriert, ohne dass in der Nähe Brandstellen konstatiert werden können.

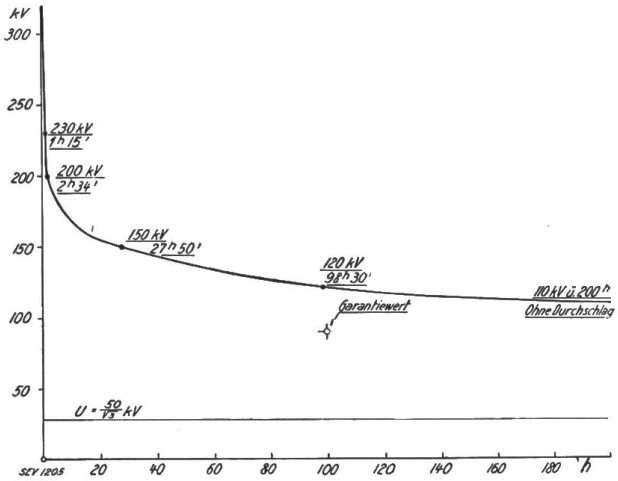

Fig. 11.
Zeit-Durchschlagskurve.
Kabel 1 × 180 mm². Betriebsspannung $U = \frac{50}{\sqrt{3}}$ kV.

d) Erwärmung. Um festzustellen, ob durch die vorgesehene Strombelastung die Temperaturerhöhungen im Kabel nicht zu hoch werden, waren auch Versuche in dieser Hinsicht angeordnet. Da im Maschinenhaus Handeck sowie in der Uebergangsstation Guttannen die Kabel einige Meter weit ohne Sandbedeckung auf Zementmauern und Boden gelegt werden, waren Versuche in ähnlicher Verlegungsart angeordet. Drei Kabel von je ca. 12 m Länge in achsialen Abständen von 15 cm, deren Bleimäntel an den Enden kurzgeschlossen waren, wurden mit Drehstrom belastet. Die Temperaturerhöhungen von Kupfer und Blei bestimmten sich aus den Widerstandsänderungen.

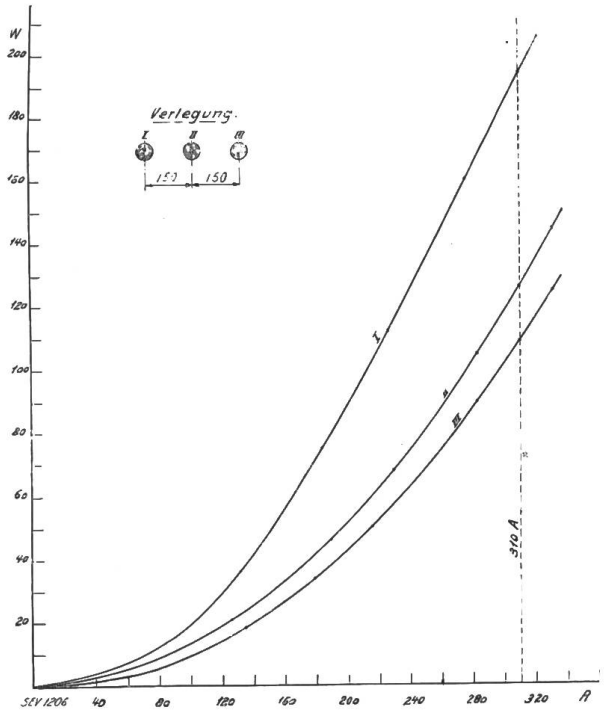

Fig. 12.
Stromwärmeverluste einer Drehstromschleife 3× (1×180) mm², 50 kV. Kabellänge 11,91 m.

Die Erwärmungsversuche wurden 19 Stunden lang mit einer Belastung von 340 A durchgeführt. Als Endresultat ergab sich eine maximale Uebertemperatur des Mittelleiters von 24,5 °C, während man für die Aussenleiter 20,5 °C erhielt. Die Bleimäntel zeigten bei den äussern Kabeln 12 und 14 °C Uebertemperatur, während das mittlere Kabel eine Mantelübertemperatur von 16 °C aufwies. Das Temperaturgefälle zwischen Leiter und Blei betrug im Mittel 8,1 °C.

Auf Anregung des Herrn Oberingenieur A. Kleiner der K.W.O. wurde die Möglichkeit geprüft, die Temperatur des Leiters von im Betriebe befindlichen Hochspannungskabeln zu messen, und zwar unter Verwendung eines Körpers, welcher die gleichen thermischen Eigenschaften besitzt, wie das Kabel selbst. Das Messprinzip ist dabei das folgende:

Das *„Thermische Abbild"* enthält eine Heizwicklung, welche von einem Strom durchflossen wird, der in unserem Falle proportional ist dem Strom im Hochspannungskabel. Den gewünschten Heizstrom kann man einem Stromwandler entnehmen, dessen Primär-Wicklung vom Kabelstrom durchflossen wird und welcher für dieselbe Prüfspannung wie diejenige des Kabels isoliert ist. Das „Thermische Abbild" besteht aus einem ca. 1 m langen Metallrohr, welches, in geeigneten Wärme-Isolierstoff eingebettet, eine Heizspule und ein Widerstandsmesselement aus Platinband enthält. Die Enden der Heizspule und des Messelementes führen zu einem wasserdicht verschliessbaren Klemmkopf, der einen Rohransatz mit Stopfbüchse besitzt, durch welchen das vieradrige Messkabel eingeführt werden kann. Der Effektverbrauch der Heizspule im „Thermischen Abbild" beträgt, bezogen auf Nennstromstärke ca. 1,3 W; bei einem Primär-Nennstrom von 300 A genügt daher ein Einleiter-Stromwandler zur Speisung von mehreren „Thermischen Abbildern", sofern mehrere Messtellen in Frage kommen. Das „Thermische Abbild" wird in der Nähe der Kabel im gleichen Medium eingebettet, wie die Kabel selbst. Um die Oberflächenableitung der Wärme derjenigen der Kabel gleichzumachen, ist das Rohr des „Thermischen Abbildes" mit imprägnierter Jute umwickelt (wie beim Kabel selbst).

Zur Messung der Temperatur kam das mit Wechselstrom gespeiste Widerstandsthermometer[2]) in Anwendung. Die gesamte Messapparatur sowie die erforderlichen Vorversuche wurden von der Firma Trüb, Täuber & Co., Zürich, ausgeführt.

e) Die Stromwärmeverluste bei Belastung wurden mit einem astatischen Duddell-Mather-Wattmeter in Verbindung mit Präzisionsstromwandlern gemessen. Die Verluste in den drei Kabeln zeigt Fig. 12. Bei 17 °C und 310 A Belastung betrugen sie

194 W für Kabel I,
125 W für Kabel II,
108 W für Kabel III,
Total 427 W für 3 × 11,9 m; die Verluste pro km betragen demnach 35,7 kW.

Diese Stromwärmeverluste zerfallen in die Kupfer- und Bleimantelverluste, wobei die ersten 27,7 kW und die letztern 8,0 kW, also 22,5 % ausmachen. Eingehende Untersuchungen zur Abklärung des Einflusses der räumlichen Anordnungen auf die Verluste, insbesondere der Bleimantelverluste, wurden im Laboratorium der Kabelwerke Brugg A.-G. durch die Materialprüfanstalt des S.E.V. durchgeführt. Der entsprechende Bericht ist von Ing. P. Schmid im Bulletin 1927 No. 11 veröffentlicht worden.

Nachdem die Versuche an der Probelänge den Beweis erbracht hatten, dass eine einwandfreie, den neuesten Erfahrungen der Hochspannungstechnik entsprechende Fabrikation zu erwarten war, konnte mit der Herstellung der Kabel begonnen werden.

An sämtlichen fertigen Kabellängen von je ca. 900 m Länge mussten die dielektrischen Verluste in Funktion der Spannung bis 60 kV bestimmt (Fig. 13) und anschliessend eine Spannungsprobe während 15 Minuten mit 70 kV_{eff} Wechselstrom durchgeführt werden. Bei 20 % aller Fabrikationslängen wurden auch bei 45 °C und nach Abkühlung die dielektrischen Verluste bestimmt.

Um die Gleichförmigkeit der Fabrikation weiter zu kontrollieren, waren Kupferwiderstand, Isolation und Kapazitätswerte mit Gleichstrom an allen Längen zu messen.

---

[2]) Siehe Täuber-Gretler: Ein Beitrag zur Messung der Wicklungstemperatur an elektrischen Maschinen und Apparaten. Bull. S.E.V. 1922, No. 6, S. 225.

Muffen und Endverschlüsse.

Die an die Kabel gestellten hohen Anforderungen waren sinngemäss auch auf die Muffen und Endverschlüsse zu übertragen.

Verbindungsmuffen. Die speziellen Umstände einer Muffenmontage im Stollen Handeck-Guttannen verlangten eingehende Untersuchung der Montagebedingungen an Ort und Stelle. Im Frühjahr 1928 wurden im Kabel-Stollen in der Nähe des Fensters „Stäubenden" diese Untersuchungen durchgeführt. Es wurden im Abstande von 50 m (1. Muffennische) und 500 m (2. Muffennische) die Arbeitsstellen eingerichtet. Die Montage in zwei verschieden gelegenen Nischen hatte den Vorteil, dass eventuelle Einflüsse des Abstandes von der Aussenluft studiert werden konnten.

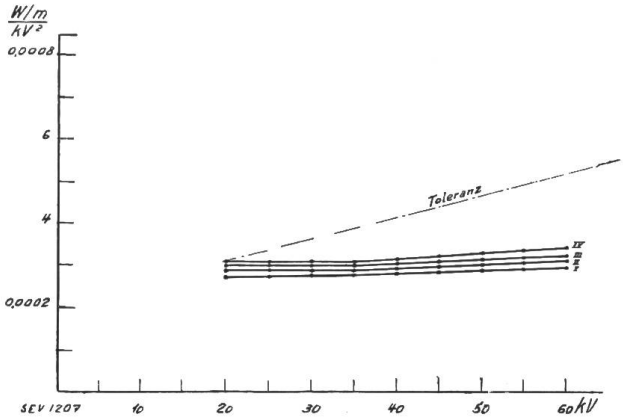

Fig. 13.
Dielektrische Verluste in Funktion der Spannung, gemessen an verlegungsbereiten Kabellängen.
I Kabellänge 927 m III Kabellänge 926 m
II Kabellänge 913 m IV Kabellänge 925 m

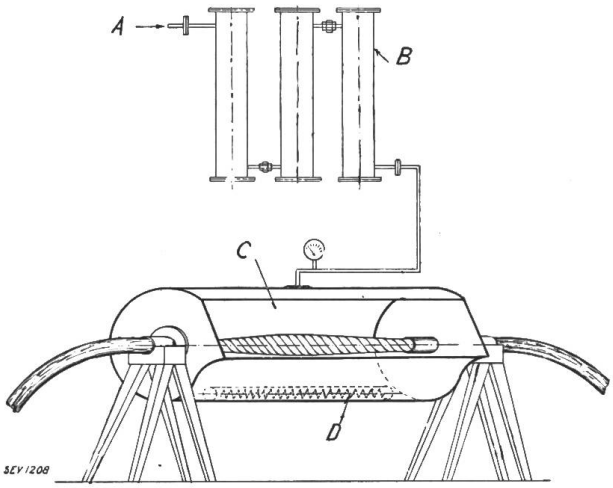

Fig. 14.
Apparatur zum Wickeln der Verbindungsmuffen.
A Eintritt der komprimierten Luft *C* Wickelkasten
B Trocken-Zylinder *D* Heizkörper

Die von den Kabelwerken Brugg (K. W. B.) angewandte Montagevorrichtung gewährleistet eine trockene Raumhaltung beim Wickeln der Muffen. Die Anordnung sei nachstehend näher beschrieben.

In Fig. 14 ist der Aufbau der Apparatur skizziert. Eine mit Elektromotor angetriebene Luftpumpe oder eine Druckluftflasche steht durch eine Trockenbatterie von drei Trockenflaschen in Verbindung mit einer Wickelkammer. Die Pressluft wird in der Trockenbatterie vollständig getrocknet. Die Wickelkammer lässt durch ca. 100 kleine Bohrungen die getrocknete und erwärmte Luft auf die Wickelstelle strömen. Durch eine vorgeschaltete Druckkammer wird dafür gesorgt, dass zwischen Wickelkammer und Aussenluft eine ständige Druckdifferenz von ca. 0,1 bis 0,2 Atm. besteht. Diese Druckdifferenz verhindert in vollkommener Weise jedes Zuströmen der kalten, feuchten Aussenluft zur Arbeitsstelle. Die Abmessungen der Wickelkammer sind so gehalten, dass der Monteur ohne Behinderung die Bewicklung durchführen kann. Diese Anordnung hat ferner den grossen Vorteil, dass nicht ein langes Stollenstück gut abgeschlossen werden muss, um durch stärkere Erwärmung etc. möglichst trocken gehalten zu werden, was ohnehin nur unvollkommen durchzuführen wäre. Ueberdies werden durch dieses Verfahren die Nachteile bei Arbeiten in überheizten Räumen vermieden.

Der Aufbau der Muffe selbst erfolgt in enger Anlehnung an die Theorie des Maxwellschen Kondensator-Modells. Eine eingehende Arbeit über dieses Problem findet der Leser im Archiv für Elektrotechnik, XVII. Band, 1927, von Dr. F. Loebner. Die Anwendung des Kondensator-Modells erlaubt für jeden beliebigen Punkt des Dielektrikums die entsprechende spezifische Beanspruchung zu bestimmen. Die elek-

trische Beanspruchung einer Muffe ist infolge der auftretenden Längsbeanspruchung nicht mehr so eindeutig bestimmt wie diejenige des Kabels. Im Kabel ist die Längsfeldstärke gleich Null. Anders verhält es sich in dieser Hinsicht bei Muffen. Durch das Abschneiden des Bleimantels und der deswegen entstehenden grossen Kapazitätsänderung erhalten wir eine sehr hohe Längsfeldstärke, welche ohne entsprechende Massnahmen zur Zerstörung der Verbindungsmuffe führen muss. Durch abrunden des kantigen Bleiabschnittes und durch langsame Ueberführung der Feldlinien in

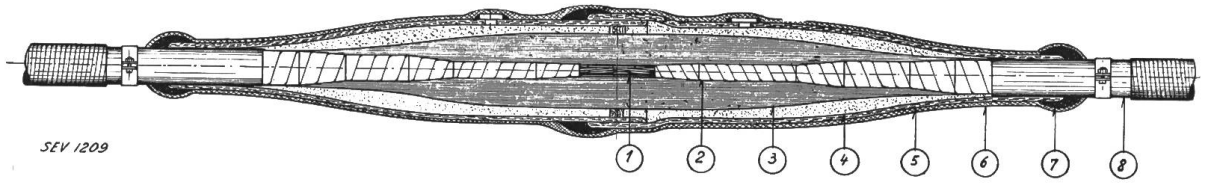

Fig. 15.
Verbindungsmuffe.

1 Cu-Verbinder
2 Kabelisolation
3 Wickelpapier
4 Füllmasse
5 Bleimuffe
6 Juteschutz
7 Verlötung
8 Bleimantel

einen planparallelen Teil erhalten wir unschädliche Beanspruchungen. Die in der Oberhasli-Anlage eingebauten Muffen sind in longitudinaler Richtung maximal mit 176 V/mm beansprucht. Die vertikale Komponente berechnet sich zu 940 V/mm. Diese niedrig gehaltenen Beanspruchungen bieten alle Gewähr für einen sicheren Betrieb.

Nach beendigter Bewicklung wird ein metallischer Belag auf die Muffe gebracht. Derselbe besteht in erster Linie aus einem Cellonlackanstrich, in welchen ein Stanniolband eingewickelt wird. Dadurch ist das elektrische Feld geometrisch bestimmt. Eine Bleimuffe dient als Schutz gegen Feuchtigkeit und mechanische Beanspruchungen. Aehnlich wie das Kabel wird diese Bleimuffe gegen chemische Agentien durch einen Metallack und eine reichliche Bewicklung mit getränktem Band geschützt (Fig. 15).

Ein weiterer Schutz durch ein Metallgehäuse ist in Anbetracht der Verlegungsart in Sand, wo die Muffe mechanischen Verletzungen nicht mehr als das Kabel ausgesetzt ist, nicht notwendig. Der enge Kontakt zwischen feuchtem Sand und Bleimantel der Wickelmuffe ist auch thermisch äusserst günstig und vorteilhaft.

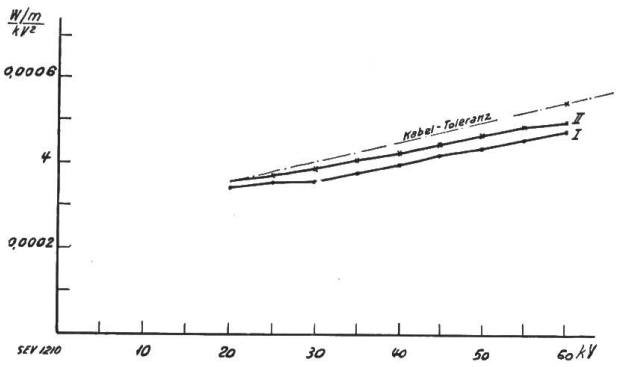

Fig. 16.
Dielektrische Verluste in Funktion der Spannung, gemessen an einer im Kabelstollen hergestellten Probemuffe.
I Erste Messung II Zweite Messung

Messungen an Muffen. Aehnlich wie beim Kabel suchte man durch Messungen Einblick in die dielektrischen Verhältnisse der Muffe zu erhalten. Eine einfache Anordnung liess ein fehlerfreies Messen der dielektrischen Verluste der Muffen mit der Scheringbrücke zu.

Der die Profilkurve bestimmende leitende Belag (kaschierte Folie) wurde bis auf einige mm an den Bleimantel geführt. Eine direkte Verbindung war nicht vorhanden. Dieser leitende Belag wurde nun an den einen Brückenzweig der Scheringbrücke gelegt und die Bleimäntel der beiden Kabel, welche gemufft waren, geerdet. Durch diese Schaltung ist es möglich, ohne die Verluste des Kabels in die Messung einzubeziehen, eine genaue Prüfung der Muffen durchzuführen.

Die Probemuffen, welche, wie bereits oben vermerkt, im Stollen montiert wurden, konnten in Guttannen geprüft werden. Zwei transportable Schering-Brücken in

Verbindung mit Presskondensator und Minosflaschen, ein Hochspannungs-Trocken-Transformator 500/200000 V, sowie die nötigen Spannungs-Strom- und Frequenz-Messinstrumente liessen eingehende Messungen zu.

Dieselben sind, um Messfehler möglichst auszuschalten, doppelt durchgeführt worden, d. h. jede Muffe wurde mit beiden Brücken gemessen. Die Spannungsmessung erfolgte mittels Kugelfunkenstrecke nach den amerikanischen Normalien, unter Berücksichtigung der relativen Luftdichte.

Die Messtemperaturen lagen zwischen 15 und 20° C, sind aber infolge der grossen Temperaturschwankungen in Guttannen ungenau. Zum Vergleich mit den Verlustkurven der Kabel ist das Messresultat von einer Muffe in Fig. 16 dargestellt. Dasselbe zeigt deutlich, dass die befürchteten Feuchtigkeits- und Lufteinschlüsse nicht grossen Einfluss auf das rekonstruierte Kabeldielektrikum haben können. Wenn auch gegenüber dem Kabel eine wesentlich stärkere Steigung der $\frac{W/m}{kV^2}$-Werte zu konstatieren ist, so gibt die Kurve doch ein günstiges Bild über die elektrischen Eigenschaften der Muffen. In Anbetracht der sehr geringen spezifischen Beanspruchungen ist ein Versagen im Betrieb trotz der gegenüber dem Kabel etwas ungünstigeren Verlustkurve nicht zu befürchten.

An weiteren Versuchsmuffen im Laboratorium wurden Verlustkurven in Funktion der Muffentemperatur sowie Zeitdurchschlagskurven aufgenommen. Ferner konnten Erwärmungsversuche an der Verbindungsklemme durchgeführt werden. Die letztere ist so konstruiert, dass eine Erhöhung des Leiterdurchmessers nicht erfolgt und infolgedessen das rein spannungstechnische Verhalten recht günstig wird. Ansätze und Kanten treten bei dieser Konstruktion nicht auf. Der Ohmsche Widerstand der Leiterverbindung ist etwas geringer als der des Leiters selbst und es ist infolgedessen eine zusätzliche Temperaturerhöhung in belastetem Zustand nicht zu erwarten.

Endverschlüsse. Da sich die beiden Endpunkte der Kabel in geschlossenen Räumen befinden, wurde als günstigste Konstruktion von den K. W. B. Endverschlüsse mit Hartpapierisolatoren verwendet. Der Endverschluss besteht zur Hauptsache aus dem Aluminiumgehäuse, in welches das Kabel eingeführt wird, dem Flansch, welcher den Hartpapierisolator trägt und der Aluminium-Verschlusskappe. Die Konstruktionsdetails gehen aus Fig. 17 hervor. Die maximalen Beanspruchungen im Endverschluss werden wie in der Muffe durch eine Konusbewicklung auf unschädliche Werte gebracht. Die den Konus bestimmende Profilkurve verläuft ähnlich wie diejenige der Wickelmuffe und dementsprechend sind auch die Teilbeanspruchungen. Um auch den Isolator (Hartpapier) möglichst zu entlasten, sind die letzten Erfahrungen des Durchführungsbaues berücksichtigt worden. Das nachstehend beschriebene Verfahren nach A. Imhof zur Vermeidung von Glimmerscheinungen am Flansch, als der am stärksten elektrisch beanspruchten Stelle, wurde vorteilhaft angewandt.

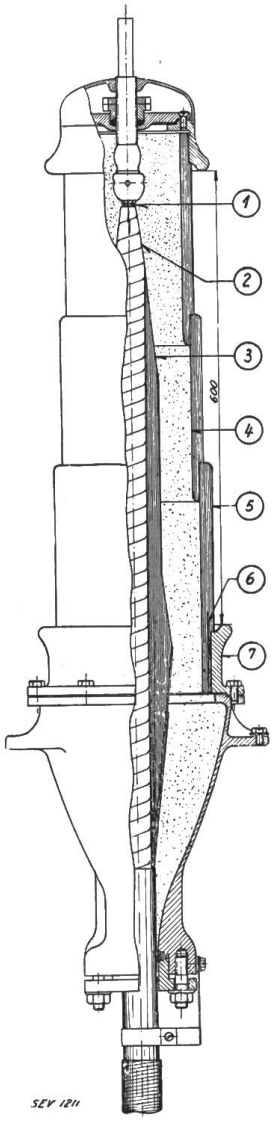

Fig. 17.
Endverschluss.

1 Cu-Leiter
2 Kabelisolation
3 Wickelkonus
4 Füllmasse
5 Hartpapierisolator
6 Glimmschutz nach Imhof
7 Aluminium-Gesimse

In den Hartpapierzylinder wird ca. 2 mm vom äusseren Rand ein leitender Belag eingewickelt, welcher mit dem Flansch verbunden bleibt. Dadurch, dass die Glimmkante statt in Luft in ein hochwertiges Dielektrikum eingebettet wird, werden unzulässige, die Isolation schädigende Beanspruchungen verhindert und auch die

Ueberschlagsspannung des Endverschlusses erhöht. Von Seiten der Bauleitung der K. W. O. wurde Wert auf eine möglichst hohe Ueberschlagsspannung gelegt. Diese liegt bei der ausgeführten Endverschlusstype bei ca. 170 kV_{eff} Wechselstrom.

Verlegung und Montage.

Das nicht einfache Problem der Verlegung dieser Kabel musste so gelöst werden, dass eine Beschädigung und Strapazierung der Kabel nicht zu befürchten war.

Ende August 1928 konnte mit den Verlegungsarbeiten der 50 kV Kabel Guttannen-Handeck begonnen werden. Die je ca. 10000 kg schweren Kabel wurden bis Innertkirchen per Bahn transportiert. Ab Innertkirchen erfolgte der Transport mittels Lastwagen in Verbindung mit einem von den K. W. O. konstruierten Spezial-Anhänger (Fig. 19).

Die Grimselstrasse liess ohne besondere Schwierigkeiten den Transport der Trommel von total 3,2 m Durchmesser zu. Alle Strassentunnel waren genügend hoch, so dass die Transporte von Innertkirchen nach Guttannen resp. „Stäubenden" anstandslos verliefen. Die von den Kabelwerken Brugg ausgeführte Transportpritsche hat sich sehr gut bewährt und wurde nicht nur für den Bahntransport, sondern vorteilhaft auch für den Strassentransport gebraucht.

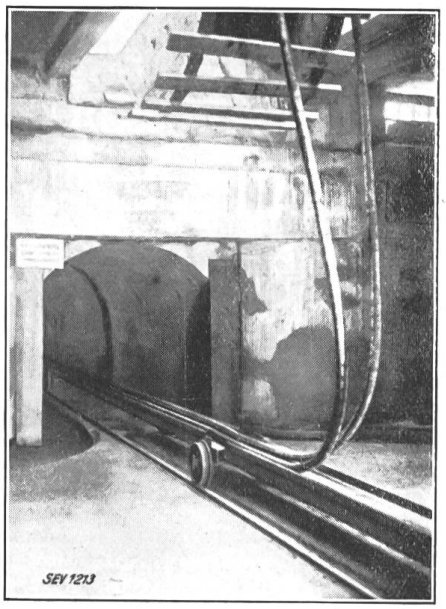

Fig. 18.
Einfahren der Kabel in den Stollen.

Die Verlegung geschah mittels eines Wagenzuges (Fig. 18), bestehend aus 151 Wagen von 6 m Länge. Durch eine Motorwinde war man in der Lage, den ganzen Zug an die richtige Stelle im Stollen zu befördern. Hierauf wurden die mittels des Wagenzuges an den Verlegungsort gefahrenen Kabel sorgfältig abgelegt und eingesandet.

Das Abrollen der Kabel auf den Wagenzug erfolgte von zwei Stellen, erstens von der Uebergangsstation Guttannen und zweitens von dem Baufenster „Stäubenden" aus. Es ist selbstverständlich, dass im Anfang grosse Schwierigkeiten zu überwinden waren, sei es beim Transport oder bei der Verlegung selbst. Die Verlegungsarbeiten, von denen Fig. 20 einen Moment festhält, waren Mitte Oktober beendet. Im ganzen waren in sechs Sektionen folgende Längen verlegt worden: 3×862 m, 3×905 m, 3×886 m, 3×907 m, 3×906 m, 3×545 m. Nach Verlegung der Sektion I und II wurde sofort mit der Montage der Muffen begonnen. In Schichten von je zwei Mann wurde Tag und Nacht gearbeitet, damit die heikle Wickelarbeit ununterbrochen vor sich ging. Die nähern Details der Muffenkonstruktion sind bereits oben skizziert. Die Muffen wurden mit grösster Sorgfalt unter möglichster Vermeidung störender Faktoren (Feuchtigkeit etc.) montiert (Fig. 21). Die K. W. O. stellten an jeder Muffenstelle elektrisches Licht und Kraft zur Verfügung. Dadurch war es möglich, die Wickelkasten zu heizen und zu beleuchten, was für die Ausführung dieser Arbeiten von grossem Vorteil war.

Die Muffenmontage begann Mitte September 1928 und war Mitte Oktober 1928 beendet. Vorschriftsgemäss mussten die 3 Bleimäntel alle 50 m miteinander durch Briden verbunden werden. Die Briden wiederum sind an das elektrisch durchverbundene Geleise mittels 8 mm Kupferdraht angeschlossen. Nach Verlegung und Montage sämtlicher 4×3 Kabel wird eine Erdverbindung zwischen dem Maschinenhaus Handeck und der Uebergangsstation Guttannen von, wie schon oben vermerkt, ca. 5000 mm^2 Bleiquerschnitt und 2110 mm^2 Eisenquerschnitt zur Verfügung stehen. Anschliessend an die Muffenmontage begannen die Arbeiten an den Endverschlüssen

(Fig. 22). Die näheren Konstruktionsdaten derselben sind ebenfalls weiter oben beschrieben worden. Die gesamte Montage war am 2. November 1928 beendet und die Anlage von diesem Zeitpunkt an betriebsbereit.

Fig. 19.
Transport der Kabel auf der Grimselstrasse.

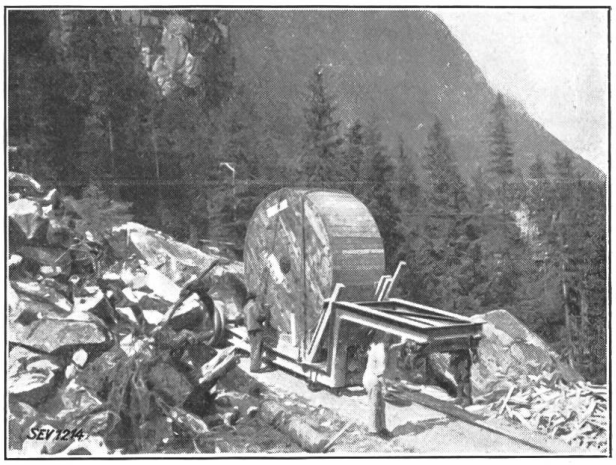

Fig. 20.
Verlegungsarbeiten.

Fig. 21.
Herstellung der Verbindungsmuffen.

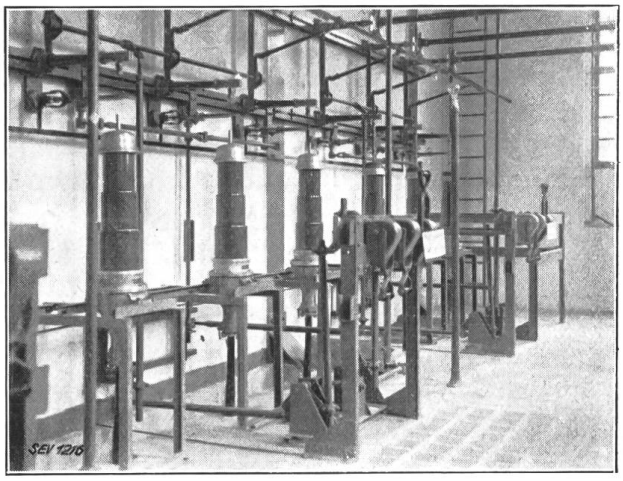

Fig. 22.
Montierte Endverschlüsse in der Uebergangsstation Guttannen.

Prüfung nach Verlegung.

Nach den Vorschriften des Pflichtenheftes musste die fertigmontierte Anlage mit 110 kV Gleichspannung während einer Stunde geprüft werden. Diese Prüfung wurde mittels einer transportablen Röhrengleichrichter-Anlage durchgeführt.

Vorgängig der Spannungsprobe wurden die Ohmschen Widerstände der einzelnen Phasen, sowie die Kapazitätswerte bestimmt. Die garantierten Werte waren in jeder Hinsicht eingehalten. Die Messungen basierten auf einer mittleren Kabeltemperatur, deren Wert einem aufgenommenen Stollen-Temperatur-Diagramm entnommen wurde.

Nach Inbetriebsetzung des Kraftwerkes Handeck sollen eingehende Messungen an den Kabelanlagen durchgeführt werden.

Es sei dem Verfasser hier gestattet, dem Besteller den Kraftwerken Oberhasli A.G. und in erster Linie Herrn Direktor Kaech und Herrn Oberingenieur Kleiner, für die tatkräftige Unterstützung der Arbeiten, sowie für die mannigfaltigen Anregungen bestens zu danken. Diese 50 kV-Kabelanlage wird für weitere Hochspannungskabel-Anlagen wertvolle Unterlagen schaffen.