

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 52 (1961)
Heft: 2

Artikel: Schutz von Kabeln in Wasserstollen gegen Blitzschäden
Autor: Foretay, E. / Ruchet, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916807>

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: 03.04.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Schutz von Kabeln in Wasserstollen gegen Blitzschäden

Von E. Foretay und R. Ruchet, Cossonay-Gare

551.594.221 : 621.316.93 : 621.315.21 : 627.842

Beschreibung von Blitzschäden an einem kombinierten Telefon- und Steuerkabel mit Polyäthylenisolierung in einem Wasserstollen. Untersuchungen über die Schutzmöglichkeiten und vergleichende Versuche mit verschiedenen metallenen Umhüllungen.

Description de l'endommagement par la foudre d'un câble combiné de téléphone et de signalisation à isolation polyéthylène posé dans une galerie d'amenée d'eau. Etude des moyens de protection et essais comparatifs de diverses gaines métalliques.

1. Einleitung

Seit einigen Jahren sind die Elektrizitätswerke dazu übergegangen, Telefon- und Signalkabel in Wasserführungsstollen zu verlegen. Zu den Isoliermitteln, die am besten den Beanspruchungen – Feuchtigkeit und Druck – bei dieser Verlegungs-

art genügen, ist das Polyäthylen zu zählen. Dieser Kunststoff erfüllt auf Grund seiner hervorragenden elektrischen Eigenschaften alle für ein Fernmeldekabel wesentlichen Anforderungen; er ist auch genügend dicht, um praktisch jeden Eintritt von Feuchtigkeit in das Kabel zu verhindern.

Eines der ersten dieser Kabel wurde im Juni 1955 im Stollen verlegt, der den Sambucco-See mit dem Maschinenhaus Peccia der Maggia-Kraftwerke verbindet (Fig. 1). Der Stollen ist etwa 5 km lang, die Überdeckung der Felsschicht schwankt zwischen 200 und 1000 m. Das Kabel besteht aus 48 Leitern, und zwar 4 geschirmten Telefon-Vierern und 8 Steuer-Vierern. Für die Adernisolation wurde Polyäthylen verwendet; die äussere Hülle setzt sich zusammen aus einem Polyäthylen- und darüber einem Polyvinylchlorid (PVC)-Mantel; eine metallene Umhüllung ist nicht vorhanden. Den Querschnitt zeigt Fig. 2.

Im Juli 1956, ein Jahr nach der Verlegung, stellten die Maggiawerke (OFIMA) an 12 Adern eine Abnahme der Isolation fest. Im Frühjahr 1958 waren bereits 31 Adern fehlerhaft. Da der Stollen nicht entleert werden konnte, musste man bis Ende März warten, um die Fehlerarten und -ursachen untersuchen zu können.

2. Beschreibung der Fehler

2.1 Fehlerarten

Die Untersuchung stellte 3 verschiedene Fehlerarten fest:

a) PVC-Mantel, Polyäthylenmantel und Isolation einer Ader sind am gleichen Ort durchlöchert (G + I),

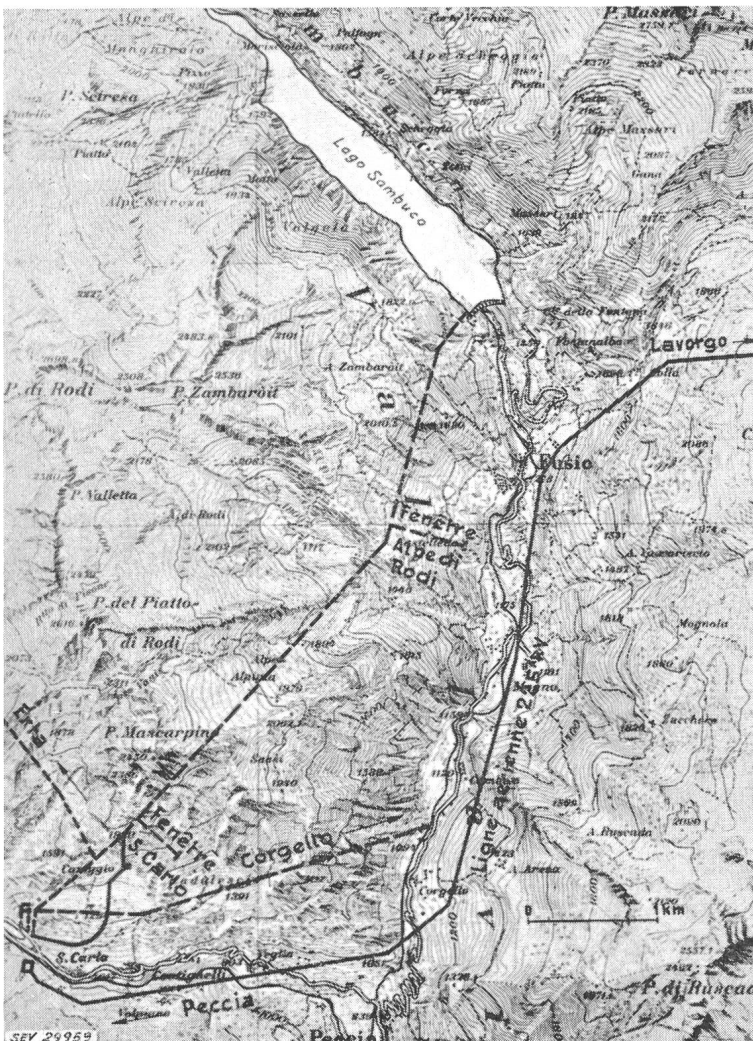


Fig. 1
Lageplan

b) Loch in der Isolation einer Ader (I),

c) Loch im PVC- und im Polyäthylenmantel (G). Charakteristische Fehlerstellen zeigt Fig. 3a...c. Das Loch im PVC-Mantel (Fig. 3a) hat einen Durchmesser von etwa 0,5 mm; in den meisten Fällen ist der Mantel über eine Länge von 6...8 cm gerissen (aufgeplatzt). Der Durchmesser des Loches im Polyäthylenmantel (Fig. 3b) beträgt ebenfalls etwa 0,5 mm. Um das Loch herum ist das Material geschwärzt; die Stärke und die Ausbreitung der Schwärzung ist bei den einzelnen Fehlerstellen unterschiedlich. Die Löcher in der Aderisolation (Fig. 3c) haben Kraterform; dazu sind bei den Telefonvierern an den Fehlerstellen die Schirmfolien geschwärzt. Die Leiter der Telefonvierer waren nicht beschädigt.

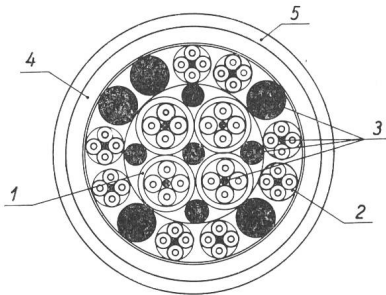


Fig. 2

Querschnitt des im Stollen Peccia-Sambuco verlegten Kabels
 1 4 abgeschirmte Telefonvierer (Isolation 1,2 mm dick);
 2 8 Signalvierer (Isolation 1 mm dick); 3 Polyäthylenbeiläufe;
 4 Polyäthylenmantel, 2,9 mm dick; 5 PVC-Mantel, 2,5 mm dick

Es ist gelungen, die Fehler im Laboratorium nachzubilden. Es wurde festgestellt, dass die Durchschlagsspannungen in der Größenordnung von 300 kV liegen (Durchschlag beider Mäntel und der Aderisolation). Ein Aufplatzen des PVC-Mantels trat ein, wenn das Kabelmuster in Wasser mit einer Temperatur von weniger als 10 C° lag, bei höheren Temperaturen konnte nur eine Perforation erzielt werden.

Es ist gelungen, die Fehler im Laboratorium nachzubilden. Es wurde festgestellt, dass die Durchschlagsspannungen in der Größenordnung von 300 kV liegen (Durchschlag beider Mäntel und der Aderisolation). Ein Aufplatzen des PVC-Mantels trat ein, wenn das Kabelmuster in Wasser mit einer Temperatur von weniger als 10 C° lag, bei höheren Temperaturen konnte nur eine Perforation erzielt werden.

2.2 Bestimmung des Alters und der Lage der Fehler. Geologische Formation

In der Zeit von Juli 1956 bis März 1958 wurde am erwähnten Kabel verschiedene Male an mehreren Leitern der Isolationswiderstand gemessen, wodurch annähernd die Zeit bestimmt werden konnte, in denen die Fehler auftraten. Danach traten die schwersten Schäden zwischen dem 1. August 1956 und dem 24. Januar 1957 auf (7 Fehler G + I und 7 Fehler I, das sind 39 % aller Fehler).

Die Fehlerstellen sind in Fig. 4 dargestellt. Zur Erklärung der Lage und der Ursachen der Fehler war es erforderlich, die geologische Struktur des Gebirgsmassivs zu kennen. Gemäss Fig. 4 wird der interessierende Bereich in erster Linie aus felsigem Urgestein gebildet, worin eine Zone von Verwerfungen nahe M5 und eine weitere bei der Alpe di Rodi eingeschlossen ist. Der spezifische Erdwiderstand in diesem Gebiet liegt zwischen 10^4 und $3 \cdot 10^4 \Omega m$.

Es ist bezeichnend, dass die Störzone in der Mitte des Trassenabschnittes liegt, in dem die meisten Fehler aufgetreten sind. Allein auf den beiden Längen zwischen M4 und M6 liegen 26 Fehlerstellen,

das sind 76 % aller Fehler auf dem Abschnitt Alpe di Rodi – San Carlo. Zwischen den beiden Punkten befindet sich eine grössere Zahl verhältnismässig starker Quellen.

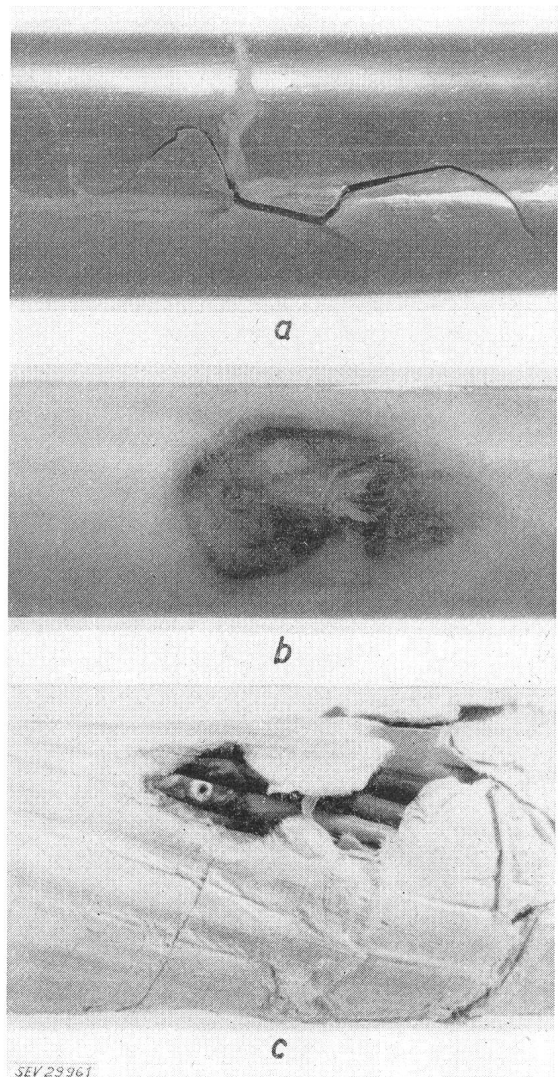


Fig. 3

Vergrößerungen der Fehlerstellen

a Durchschlag des PVC-Mantels; b Durchschlag des Polyäthylenmantels; c Durchschlag der Aderisolation

2.3 Fehlerursachen

Zur Erklärung der Vorfälle wurden als mögliche Ursachen ein Erdschluss auf der 225-kV-Leitung Lavorgo – Peccia oder atmosphärische Überspannungen in Betracht gezogen.

Bei genauerem Studium scheidet die erste Möglichkeit gänzlich aus, da die induzierte Längsspannung im Kabel nur etwa ein Hundertstel seiner Durchschlagsspannung beträgt. Es verbleibt also nur die Möglichkeit der Beschädigung der Kabelisolation durch Blitzschlag. In Anbetracht der hohen Durchschlagsspannung ist allein diese Erklärung stichhaltig, was die Versuche mit Stoßspannungen zur Nachbildung der Fehler bestätigen.

Wie konnte nun der Blitzstrom das Kabel erreichen? Zur Klärung dieser Frage sind zwei Möglichkeiten in Betracht zu ziehen:

- a) direkter Blitzschlag in eines der Kabelende und
- b) Fortpflanzung des Blitzstromes durch den Fels.

2.3.1 Direkter Blitzschlag in ein Kabelende

Bei einem direkten Blitzschlag in ein Kabelende wird an der Einschlagstelle des Blitzes das Potential des Erdbodens wegen dessen schlechter Leitfähigkeit auf sehr hohe Werte angehoben; in homogenem Erdreich, in dem sich keine metallenen Leiter befinden, nimmt dieses Potential mit der Entfernung von der Einschlagstelle nach der Formel

$$U_P = I_Q / 2 \pi a$$

stark ab.

U_P Spannung zwischen einem Punkt P in der Entfernung a von der Einschlagstelle und einem unendlich weit entfernten Punkt; ρ spezifischer Widerstand des homogenen Erdreichs; I Blitzstromstärke.

ren 1957 und 1958 angeführt [9;10]¹⁾. In diesen Jahren mussten sich sowohl der Sicherheitsdienst der Electricité de France wie auch die Forschungscommissionen des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) mit wiederholten Unfällen beschäftigen, die durch ungewollt ausgelöste Sprengstoffzündungen an Baustellen von Stollen für Wasserkraftwerke verursacht wurden. Nach den französischen Untersuchungen entstanden die Unfälle alle unter ähnlichen Begleiterscheinungen: Heftige Gewitter in der Gegend, Stollen in Felsgelände von hohem spezifischem Widerstand, das aber meistens an eine Verwerfung aus feuchtem Erdreich grenzte. Es scheint, dass in solchen ungleichmässigen und von Störungen durchsetzten Formationen der

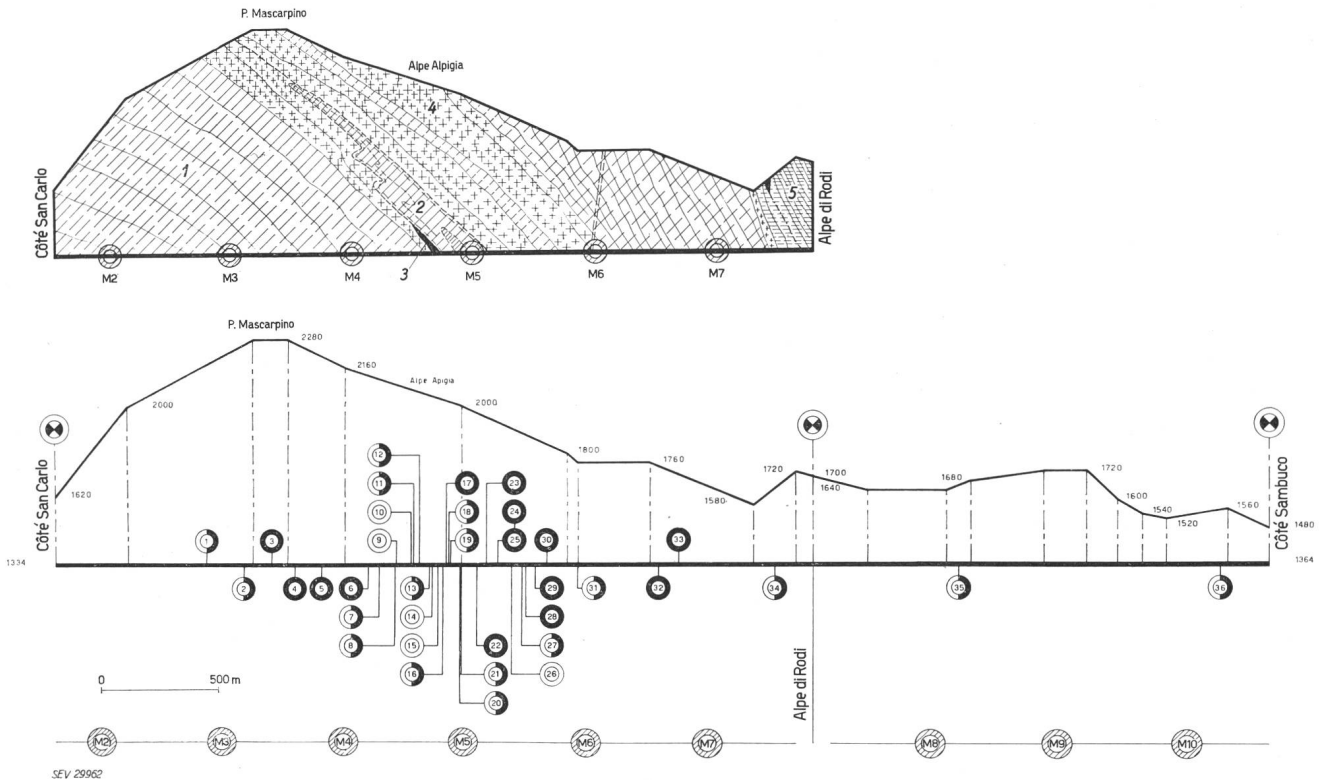


Fig. 4

Längsschnitt des Massivs durch den Stollen, mit Lageangabe der Fehler und der geologischen Struktur

1 heller Gneis; 2 Glimmerschiefer; 3 Kalkstein; 4, 5 Gneis und Schiefer mit Beimengungen von Glimmer u. a.

- Durchschlag beider Mäntel und der Aderisolation; ● Durchschlag der Aderisolation; ⊙ Durchschlag beider Mäntel
- Die Punkte «M» bezeichnen die Lage der Verbindungsmuffen

Die Leiter des Kabels nehmen am Ende die Spannung der Umgebung, d. h. des Einschlagpunktes an. (Isolatorenüberschlag, Durchschlag usw.) Die Stoßspannung in den Kabeladern wird nur verhältnismässig schwach gedämpft; dagegen ist das Potentialgefälle im umgebenden Erdreich stark. In einer bestimmten Entfernung von der Einschlagstelle wird die Potentialdifferenz gross genug, um Durchschläge zu bewirken.

2.3.2 Fortpflanzung des Blitzstromes durch den Fels

Auf den ersten Blick erscheint es unmöglich, dass der Blitz ein Kabel erreichen könnte, das in Tiefen zwischen 200 und 1000 m verlegt ist. Diese Hypothese wird aber durch verschiedene wichtige Beobachtungen der letzten Jahre und verschiedene theoretische Abhandlungen unterstützt. Dazu seien vorerst zwei wichtige Beobachtungen aus den Jah-

Blitzstrom sich vorzugsweise in den Verwerfungen konzentriert, anstatt sich gleichmässig auszubreiten, und dass somit auch in grossen Tiefen – die Unfälle haben sich in Tiefen von ungefähr 1000 m unter Tag ereignet – beträchtliche Stromdichten auftreten können. Die Ähnlichkeit mit dem vorliegenden Fall der Kabelbeschädigung ist auffallend.

Im weiteren sind die Arbeiten von C. Dauzère [2;3] und von Prof. K. Berger [13] anzuführen. Gemäss der ersten Arbeit bieten die Berührungsflächen zwischen zwei verschiedenen Bodenarten einen guten Weg für das im Boden oder im Untergrund absickernde Wasser, das aus dem Gestein radioaktive Bestandteile herausgelöst hat. Man findet in der Tat entlang dieser Verwerfungsflächen häufig Quellen. Die mitgeführten radioaktiven Salze werden an diesen Flächen abgelagert. Der Einfluss der

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

unterirdischen Wasserläufe auf den Weg des Blitzstromes, der, entgegen der Meinung einer Reihe von Beobachtern, nicht der grösseren Leitfähigkeit dieser Schichten zuzuschreiben ist, wäre damit durch C. Dauzère erklärt. Diese Hypothese konnte bisher weder bestätigt noch widerlegt werden da die Zahl der bisherigen Beobachtungen viel zu gering ist [8; 9]. Prof. Berger hat nachgewiesen [13], dass bei einem Blitzschlag in homogenem felsigen Urgestein noch in mehreren hundert Metern Tiefe erhebliche Spannungen zwischen Kabeladern und dem sie umgebenden Wasser im Stollen auftreten können. Nimmt man nun an, dass ein Blitzstrom von 50 kA eine Strecke von 700 m von der Einschlagsstelle bis zum Kabel bei einem spezifischen Erdwiderstand von 10 Ω m durchlaufen muss, und wenn man sich die Verwerfungsspalte als leitende Ader vorstellt, die in einer verhältnismässig gut isolierenden Umgebung eingebettet ist, so lässt sich annähernd das Potential am Ort der Kabeltrasse berechnen. Man erhält dabei Werte in der Grössenordnung von 900 kV, Werte also, die weit über der Durchschlagsspannung des Kabels liegen.

Nach dem Durchschlag beider Mäntel und der Aderisolation pflanzt sich der Stoßstrom sowohl entlang der Schirmfolie der Telefon-Vierer wie auch durch die Leiter fort. Durch die unterschiedliche Dämpfung auf den beiden Leitwegen entsteht nach einer gewissen Strecke eine Potentialdifferenz, die ausreicht, um die Aderisolation zu durchschlagen. Bei einem Ohmschen Widerstand des Schirmes von 40 Ω /km und einer Stossdurchschlagsspannung von 50 kV, erreicht der Spannungsabfall bereits bei einem verhältnismässig geringen Strom den kritischen Wert.

Die Eigenart der unter 2.3.2 beschriebenen Durchschläge scheint die Verteilung der Fehler auf der Trasse Alpe di Rodi – San Carlo zu erklären; was besonders dadurch unterstützt wird, dass sich die meisten Fehler des Typs G + I und G in der Zone der Verwerfung, also zwischen den Punkten M4 und M6 befinden.

3. Möglichkeiten des Schutzes gegen Blitzschlag

3.1 Allgemeines

Auf Grund des Vorhergesagten ist ein Schutz der Kabel und ihrer Verbindungsstellen erforderlich. Der Schutz der Abschlusseinrichtungen und der an das Kabel angeschalteten Apparate soll hier nicht behandelt werden, da dafür herkömmliche Einrichtungen vorhanden sind (Überspannungsableiter, usw.). Es sollen dagegen verschiedene mögliche Schutzmassnahmen für das Maggia-Kabel wie auch für allgemeine Fälle untersucht werden.

Anfangs sah man für das Maggia-Kabel ein System von 5 kupfernen Schutzdrähten von je 4 mm² Querschnitt vor, die gleichmässig um das Kabel angeordnet und in einen PVC-Mantel eingebettet werden sollten. Eine überschlägige Rechnung zeigte aber, dass die Stoßspannung einen Betrag von etwa 90 kV/km erreicht, wenn die Stromsteilheit di/dt der sich in den Drähten fortpflanzenden Welle 0,2 kA/ μ s beträgt. Angesichts der Unsicherheit des Wertes von di/dt muss man jedoch mit Spannungs-

differenzen zwischen 50 und 200 kV/km rechnen. Dieser Schutz bietet demnach nur eine geringe Sicherheitsmarge, da die Durchschlagsspannung des Kabels bei 300 kV liegt und die gefährdete Länge sich über 3,5 km erstreckt.

Die weiter unten beschriebenen vergleichenden Versuche mit verschiedenen metallenen Schutzhüllen gestatten es, eine Metallhülle mit den gewünschten Eigenschaften zu finden, die die Vorteile des geringen Gewichts und der Dichtigkeit des Kunststoffkabels (gegenüber dem Bleikabel mit Papierisolation) aufweist. Für die Bemessung der metallenen Schutzhüllen war es wichtig, die Grössenordnung des im Mantel fliessenden Stromes zu kennen. Es wurden deshalb für den Fall homogenen Gesteins Modellversuche durchgeführt, um die relativen Ströme in Abhängigkeit von der Verlegungstiefe des Kabels zu ermitteln. Nach den Angaben von Prof. Berger [13] fliesst je nach der Verlegungstiefe des Kabels, welche 500...100 m betragen kann, bei einem Blitzstrom von 60 kA im Metallmantel ein Strom von 6...30 kA, d. h. 10...50 %. Bei einem Strom von 30 kA mit 200 μ s Halbwertszeit errechnet sich die Erwärmung einer Kupferhülle von 10 mm² Querschnitt auf 10 °C.

3.2 Fortpflanzung des Blitzstromes auf einem Erdkabel

Bevor auf die vergleichenden Versuche eingegangen wird, erscheint es zweckmässig, die Ausbreitungseigenschaften des Blitzstromes in einem Erdkabel zu studieren. Eine Reihe von Verfassern [1; 13; 15; 16; 17] und besonders E. D. Sunde [14] haben diese Frage bereits behandelt. Der wesentliche Inhalt dieser Arbeiten lässt sich wie folgt zusammenfassen:

a) In einem Kabel, das nicht an der Eintrittsstelle des Blitzstromes durchschlagen wurde, nimmt die Spannung zwischen Leitern und Mantel mit wachsender Entfernung ab.

b) In einem Kabel, das an der Eintrittsstelle durchschlagen wurde nimmt die Spannung mit wachsender Entfernung zu.

c) die Stromwelle pflanzt sich entlang der Metallhülle fort und fliesst nach und nach in das umgebende Erdreich ab.

d) Die Spannungen zwischen Adern und Metallhülle sind proportional dem maximalen Strom, dem Widerstand des Mantels und den Quadratwurzeln aus der Halbwertszeit und dem spezifischen Erdwiderstand.

3.3 Schutzmöglichkeiten

Gegen die Einwirkung des Blitzes bieten sich folgende Schutzmöglichkeiten an:

a) Verstärkung der Isolation,

b) Erhöhung der Induktivität durch eine Metallumhüllung,

c) Verringerung des Ohmschen Widerstandes der Metallumhüllung.

Die Untersuchung der ersten Möglichkeit ergab, dass auch ein verstärkter Isoliermantel den zu erwartenden Spannungen nicht standzuhalten vermag.

Bei der Erhöhung der Induktivität durch eine Metallumhüllung wird das Kabel mit einer zusätz-

lichen Bandisenbewehrung umgeben oder in einem eisernen Rohr verlegt. Eine praktische Ausführungsart ist in [18] beschrieben.

Demnach besteht die Umhüllung des Kabels aus einem Bleimantel, einer Jute-Umspinnung, zwei Bandisen und einer Runddrahtbewehrung. Der Blitzstrom I verteilt sich in die Runddrähte vom Widerstand R und den Bleimantel vom Widerstand R_g . Die Bandisen bilden eine Induktivität L , die sich in Serie mit R_g befindet. Der hohe induktive Widerstand bewirkt eine wesentliche Reduktion des Stromes in diesem Zweig des Stromkreises; der Hauptanteil des Stromes fließt dann in der Runddraht-Bewehrung. Damit ergibt sich eine starke Reduktion der Spannung zwischen Adernbündel und Mantel. Der wichtigste Faktor ist jedoch zweifellos die Verringerung des Ohmschen Widerstandes der Metallumhüllung. Es wurde darum versucht, eine Schutzhülle einfacher Konstruktion mit einem möglichst niedrigen Ohmschen Widerstand zu finden; die Untersuchungen beschränken sich auf diese Aufgabe.

3.4 Versuchsschaltungen

Das allgemeine Schema der Versuchsschaltungen zeigt Fig. 5. An dem mit dem Stossgenerator ver-

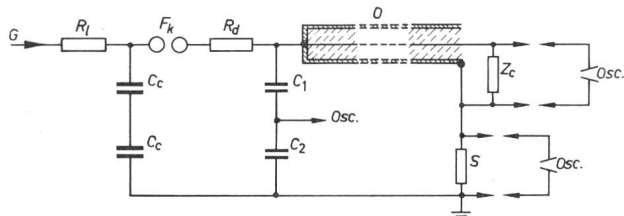


Fig. 5

Allgemeines Schema der Versuchsschaltung

G Gleichstromquelle (Gleichrichter, 200 kV); R_l Belastungswiderstand; C_c Kondensator, 4 μ F; F_k Kugelfunkenstrecke; R_d Begrenzungswiderstand; Z_c Wellenwiderstand des Versuchskabels; Osc. Einstrahl-Kathodenszillograph; C_1, C_2 kapazitiver Teiler für die Steuerung des Relais zur Strahlenauslösung; S induktionsarmer Shunt, 0,106 Ω nach Bellaschi [11]; O Versuchskabel

bundenen Ende des Versuchskabels sind Adern und Mantel kurzgeschlossen, während am anderen Ende nacheinander die Spannung zwischen Adern und Mantel und dem Mantelstrom oszillographiert werden. Die Spannung wird direkt an den Klemmen der Abschlussimpedanz Z_c gemessen oder zwischen

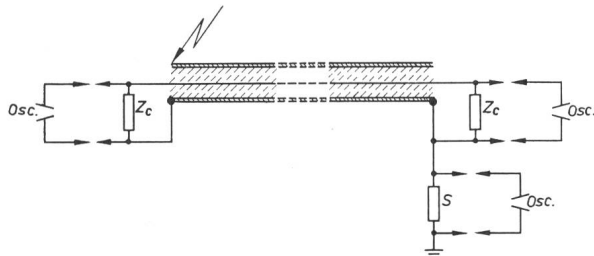


Fig. 6

Versuchsschema mit nicht geerdeten Kabeladern Bezeichnungen siehe Fig. 5

einer dieser Klemmen und einem dazwischenliegenden Abgriff, um so eine Spannungsteilung zu erreichen. Während der Spannungsmessung wird der Shunt S kurzgeschlossen. Die Strommessung erfolgt nachher an S.

Man mag einwenden, dass bei Kurzschluss an einem Ende nur der Fall des Blitzschlages am Kabelende oder des Durchschlages inmitten der Kabellänge nachgebildet wird, während der Blitzeintritt in die Kabelhülle ohne Durchschlag unberücksichtigt bleibt. Es wurde deshalb ein weiterer Versuch gemäss Fig. 6 durchgeführt. Die dabei erzielten Ergebnisse zeigen, dass die Summe der an jedem Ende gemessenen Spannungen ungefähr gleich der bei Kurzschluss an einem Ende gemessenen Spannung ist. Es genügt demnach der Versuchsaufbau nach Fig 5.

3.5 Prüfmuster

Um die Wirksamkeit verschiedener metallener Schutzhüllen zu untersuchen, wurden 10 Prüfmuster ausgewählt. Es handelt sich um ein koaxiales Kabel, das nacheinander mit 5 verschiedenen Umhüllungen versehen wurde (Prüflinge Nr. 1...5) ferner um drei Stücke des Maggia-Kabels, die man nach Entfernen des PVC-Mantels mit Kupferband umkleidet hatte (Prüflinge Nr. 6...8), sowie um zwei 1-kV-Kabel mit Papierisolation, davon das eine mit Cu-Wellmantel (Prüfling Nr. 9) und das andere mit Stahlwellmantel (Prüfling Nr. 10).

Die Metallhüllen sind im Einzelnen nachstehend beschrieben:

3.5.1 Koaxiales Kabel

(Durchmesser über Isolation: 22 mm)

- Prüfling Nr. 1** : Cu Band $25 \times 0,15$ mm, Schlaglänge = 22,5 mm, Überlappung = 2,5 mm.
- Prüfling Nr. 2** : Wie Nr. 1, jedoch mit einem zweiten Cu-Band von $25 \times 0,15$ mm, gegensinnig aufgebracht.
- Prüfling Nr. 3** : Flachdrahtbewehrung, Typ F, 1,2mm dick, Zahl der Drähte = 12, Schlaglänge (rechtssinnig) : 134 mm, Querschnitt eines Drahtes : 6,84 mm². Durchmesser über Bewehrung 25,5 mm.
- Prüfling Nr. 4** : Wie Nr. 3, jedoch mit einer Jute-Umspinnung und einer zweiten Flachdrahtbewehrung von 1,2mm, Zahl der Drähte = 14, Schlaglänge (linkssinnig) = 128 mm, Durchmesser über Bewehrung = 29,7 mm.
- Prüfling Nr. 5** : Bleimantel 1,7 mm dick,

3.5.2 Maggia-Kabel

(siehe Fig. 2)

- Prüfling Nr. 6** : 2 Kupferbänder, $25 \times 0,15$ mm, gegensinnig gewickelt,
 - 1. Band : Schlaglänge = 22 mm, Überlappung = 3 mm, Durchmesser über Band = 44,6 mm,
 - 2. Band : Schlaglänge = 21,6mm, Überlappung = 3 mm, Durchmesser über Band = 45,1 mm,

Prüfling Nr. 7 : 2 Kupferbänder, 25 × 0,15 mm, gleichsinnig aufgebracht mit Abstand zwischen den Schlägen, Schlaglänge = 27,5 mm, Durchmesser über Bänder = 44,9 mm.

Prüfling Nr. 8 : 2 Kupferbänder, 25 × 0,20 mm, gegensinnig aufgebracht,
 1. Band : Schlaglänge = 22 mm, Überlappung = 3 mm, Durchmesser über Band = 44,6 mm,
 2. Band : Schlaglänge = 21,6 mm, Überlappung = 3 mm, Durchmesser über Band = 45,0 mm,

3.5.3 Wellmantelkabel

Prüfling Nr. 9 : Cu-Wellmantel
 Innendurchmesser ≈ 21,5 mm, Aussendurchmesser = 28,8 mm, Dicke ≈ 0,6 mm.
 Dieser Mantel ist mit einer Schicht aus Spezialbitumen und einem PVC-Mantel umgeben (Durchmesser über PVC = 34,5 mm).

Prüfling Nr. 10 : Stahlwellmantel
 Innendurchmesser = 23,5 mm, Aussendurchmesser = 30,2 mm, Dicke ≈ 0,5 mm.

Dieser Mantel ist mit einer Schicht aus Spezialbitumen und einem PVC-Mantel umgeben (Durchmesser über PVC = 35,0 mm).

Die ersten 8 Prüflinge waren etwa 50 m lang, die beiden letzten etwa 100 m. Ausser Prüfling Nr. 1, der vollständig abgerollt war, befanden sich alle anderen Kabel zu 80 % ihrer Länge auf Trommeln.

3.6 Versuchsergebnisse

Alle Ergebnisse sind in Tabelle I zusammengefasst.

3.6.1 Messungen am Koaxialkabel

Es ist allgemein festzustellen, dass bei Koaxialkabel die Impedanz mit steigendem Strom abnimmt. Die niedrigste Impedanz hat das doppelte Cu-Band (Prüfling Nr. 2), ihr Wert stimmt praktisch mit dem Gleichstromwiderstand überein; das Gleiche trifft für den Bleimantel (Prüfling Nr. 5) zu. Die Umhüllungen aus flachen Stahldrähten (Prüflinge Nr. 3 und 4) zeigen wesentlich ungünstigere Ergebnisse. Es zeigt sich hier der Einfluss des Phasennasses, der für die Kupfer- und Bleiumhüllungen praktisch Null ist, wogegen der Strom in den Flachdrahtbewehrungen eine Verschiebung von — 12... 16 μs erfährt. Der Gleichstromwiderstand des einfachen Cu-Bandes (Prüfling Nr. 1) ist ungefähr gleich dem bei einem Stoßstrom von 4 kA gemessenen Wert, aber immer noch 5 mal so gross wie der des doppelten Cu-Bandes (Prüfling Nr. 2).

Vergleichende Versuche an verschiedenen metallenen Umhüllungen

Tabelle I

Prüfling Nr.	Aufbau der Umhüllung	Scheitelwert des Stromes	Spannungsabfall pro km (Scheitelwert)	Widerstand der Metallhülle bei Stoss \dot{U}/\dot{I} (gemessene Werte)	Widerstand der Metallhülle bei Gleichstrom (gemessene Werte)	Widerstand eines Hohlzylinders der gleichen Dicke wie die Metallhülle (berechnete Werte)	Widerstand von abgewickelten isolierten Metallbändern (berechnete Werte)
		\dot{I} kA	\dot{U} V	R_a Ω/km	R_c' Ω/km	R_c Ω/km	R_n Ω/km
1	Cu, 25 × 0,15, \varnothing 22	1	7 000	7	5,14	1,68	14,46
		2	13 000	6,5			
		3	17 800	5,93			
2	2 × Cu, 25 × 0,15, gegensinnig, \varnothing 22	1	1 100	1,1	1,02	0,84	7,12
		2	2 200	1,1			
		3	3 300	1,1			
3	Fe-Flachdraht, 1,2 mm, \varnothing 22	1	6 500	6,5	2,02	1,38	1,77
		2	10 600	5,3			
		3	15 100	5,03			
4	2 × Fe-Flachdraht, 1,2 mm, gegensinnig, \varnothing 22	1	1 760	1,76	0,85	0,64	0,85
		2	3 300	1,65			
		3	4 500	1,5			
5	Pb-Mantel 1,7 mm dick, \varnothing 22	1	1 600	1,6	1,59	1,65	—
		2	3 240	1,62			
		3	4 840	1,61			
6	2 × Cu, 25 × 0,15, gegensinnig, \varnothing 44	1	1 100	1,1	1,2	0,42	14,8
		2	2 140	1,07			
		3	3 200	1,06			
7	2 × Cu, 25 × 0,15, gleichsinnig, ohne Überlappung, \varnothing 44	1	4 600	4,6	3,06	0,42	12,1
		2	7 600	3,8			
		3	9 700	3,23			
8	2 × Cu, 25 × 0,20, gegensinnig, \varnothing 44	1	1 320	1,32	0,58	0,32	11,1
		2	2 440	1,22			
		3	3 200	1,07			
9	Cu-Wellmantel, \varnothing 25	1	540	0,54	0,53	—	—
		2	1 100	0,55			
10	Stahlwellmantel, \varnothing 27	1	16 000	16,0	5,22	—	—
		2	33 600	16,8			

3.6.2 Messungen am Maggia-Kabel

Die günstigsten Schutzhüllen sind jene aus zwei gegenseitig aufgetragenen Cu-Bändern (Prüflinge Nr. 6 und 8).

3.6.3 Messungen an Wellmantelkabeln

Der Cu-Wellmantel ergibt ausgezeichnete Resultate. Man bemerkt wiederum den Einfluss des Stahles auf den Stosswiderstand. (Das Phasenmass ist von der gleichen Grössenordnung wie bei den Prüflingen Nr. 3 und 4).

3.6.4 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Für ein unmagnetisches Material ist die Spannung zwischen den Leitern und der metallenen Hülle praktisch gleich dem Produkt aus Gleichstromwiderstand der Hülle und Stoßstrom.

Die mit zwei gleichsinnig aufgetragenen Cu-Bändern erzielten Ergebnisse, lassen offensichtlich nicht auf den Einfluss einer wesentlichen induktiven Komponente schliessen (gemäss [12] beträgt diese etwa 2,5 % des Ohmschen Anteils); die grössere Rolle spielt dabei der Kontaktdruck zwischen den beiden Bändern. Bei zwei gegenseitig gewickelten Bändern heben sich die Induktivitäten gegeneinander auf und auch die Zahl der Berührungspunkte ist grösser.

Man erkennt, dass die metallenen Umhüllungen aus zwei gegenseitig aufgetragenen Cu-Bändern oder in der Form des Kupferwellmantels die besten elektrischen Eigenschaften aufweisen. Die Schirmbänder werden gegen mechanische Einflüsse durch einen äusseren Kunststoffmantel geschützt.

Es verbleibt die Tatsache, dass bei einem Blitzschlag der Stoßstrom, um seinen Weg über die metallene Schutzhülle nehmen zu können, den äusseren Mantel durchdringen muss. Wenn dieser aus isolierendem Material besteht, wird er durchschlagen und das Stollenwasser kann bis zum Kupferschirm vordringen; in Anbetracht der guten Beständigkeit des Kupfers ist die Korrosionsgefahr in diesem Fall jedoch vernachlässigbar.

4. Zusammenfassung

Die Beschädigungen des Kabels Peccia—Sambuco beweisen, dass ein Kabel selbst in grossen Tiefen nicht vor Blitzschlägen sicher ist; die Gefahr von Durchschlägen nimmt erheblich zu, wenn der Boden eine geringe Leitfähigkeit und eine heterogene Formation aufweist, weil in diesem Fall die Blitzströme sich in Verwerfungsspalten fortpflanzen können, statt sich gleichmässig auszubreiten.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die besten metallenen Schutzhüllen die gegenseitig gewickel-

ten Kupferbänder oder der Kupferwellmantel sind. Die Ohmschen Widerstände der Schutzhüllen liegen zwischen 0,4 und 1 Ω /km und damit in der gleichen Grössenordnung wie die der Bleimäntel; diese Werte sind in den meisten Fällen ausreichend.

Die Verfasser möchten nicht versäumen, der Direktion der Maggia-Kraftwerke für ihr Einverständnis zur Veröffentlichung dieses Artikels und für die ihnen entgegengebrachte Unterstützung zu danken.

Literatur

- [1] Meister, H.: Blitzschutz an Telephonanlagen. Techn. Mitt. PTT Bd. 36(1958), Nr. 1, S. 13...32.
- [2] Dauzère, C.: Sur la localisation des coups de foudre dans certaines régions. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 6. Session 1931, Bd. 3, Rapp. 25.
- [3] Dauzère, C.: Sur la localisation des coups de foudre. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 7. Session 1933, Bd. 3, Rapp. 74.
- [4] Couvreur, H. E.: Orage et foudre. Etude physique de leur formation et de leurs effets sur les réseaux électriques. Moyens de protection. Bull. Soc. belge Electr. Bd. 72(1956), Nr. 3, S. 173...194, Nr. 4, S. 287...295; Bd. 73(1957), Nr. 1, S. 13...22, Nr. 2, S. 107...119.
- [5] CCIF 1938: Directives concernant la protection des lignes de télécommunication contre les actions nuisibles des lignes électriques industrielles.
- [6] Viel, G.: Détermination des zones exposées à la foudre au moyen de mesures de la conductibilité électrique de l'air. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 8. Session 1935, Bd. 3, Rapp. 307.
- [7] Gibrat, R.: Etude statistique sur les relations entre la conductibilité électrique de l'air et le danger provenant de la foudre. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 8. Session 1935, Rapp. 314.
- [8] Berger, K.: Etat actuel des questions techniques dans le domaine de la foudre et des surtensions. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), 12. Session 1948, Bd. 3, Rapp. 327.
- [9] Laurent, P.-G.: Considérations sur la foudre et sur la protection des bâtiments contre ses effets. Bull. Soc. franç. Electr. 7. Ser., Bd. 8(1958), Nr. 87, S. 154...172.
- [10] Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH): Bericht über das Geschäftsjahr 1957 der FKH. Bull. SEV Bd. 49(1958), Nr. 17, S. 808...809.
- [11] Foitzik, R.: Versuche mit grossen Stoßströmen. Elektrotechn. Z. Bd. 60(1939), Nr. 4, S. 89...92, Nr. 5, S. 128...133.
- [12] Arrighi, R.: Etude du comportement des écrans métalliques des câbles à isolation solide soumis à des courants de courts-circuits. Bull. Soc. franç. Electr. 7^e sér., Bd. 9(1959), Nr. 107, S. 649...665.
- [13] Berger, K.: Notwendigkeit und Schutzwert metallischer Mäntel von Sekundärkabeln in Höchstspannungsanlagen und in Hochgebirgsstollen, als Beispiel der Schutzwirkung allgemeiner Faradaykäfige. Bull. SEV Bd. 51(1960), Nr. 11, S. 549...563.
- [14] Sunde, D.: Earth Conduction Effects in Transmission Systems. New York: Van Nostrand 1949.
- [15] Griesinger W., E. Popp und E. Schulz: Über die Verteilung der Blitzströme in der Erdungsanlage eines Funkturmes. ETZ-A Bd. 79(1958), Nr. 15, S. 526...529.
- [16] Coleman, B. L.: The Direct Lightning Stroke to a Buried Cable. The Electrical Research Association (ERA), Techn. Rep. S/T71. The British Electrical and Allied Industries Research Association. Leatherhead: 1951.
- [17] Zapletal, M.: Schutz von Fernmeldekabeln gegen direkten Blitzschlag. (= tschech.) Elektrotechn. Obz. Bd. 48(1959), Nr. 8, S. 401...406.
- [18] Anonym: Über den Einfluss von Blitzschlägen auf Luftkabel. Bull. SEV Bd. 30(1939), Nr. 12, S. 308...309.

Adresse der Autoren:

E. Foretay, ingénieur-conseil und R. Ruchet, ingénieur, S. A. des Câbleries et Tréfileries de Cossonay, Cossonay-Gare (VD).