

Telephon- und Signalkabel mit erhöhter Blitzsicherheit

Von K. Berger, Zürich, H. Meister, Bern, G. Martin, Cossonay, G. de Montmollin, Cortaillod und G. Weissenberger, Brugg

621.315.2 : 621.395 : 621.316.933

1. Aufgetretene Kabelschäden

1.1 Kabelschäden an Erdkabeln

Im Netz der PTT treten pro Jahr etwa 150...200 Kabelfehler als Folge von Blitzschäden auf. In frühern Jahren waren die Fehler hauptsächlich auf die Anschlusskabel der Überführungsstangen konzentriert. Die auf den dort angeschlossenen Freileitungen auftretenden Überspannungen wurden durch die damals allgemein verwendeten Kohleableiter mit Stossansprechspannungen von 1300...2000 V nur ungenügend begrenzt. Die Folge davon waren Durchschläge zwischen den Adern in relativ kurzen Abständen vom Kabelende entfernt. Seitdem an den exponiertesten Stellen die Kohleableiter durch Gasableiter mit kleiner Stossansprechspannung ersetzt wurden, sind diese Störungen stark zurückgegangen.

Nun haben aber in den letzten zwei Jahrzehnten die Schäden als Folge direkter Einschlüsse in Kabel stark zugenommen, weil in diesem Zeitraum in zunehmendem Masse die Freileitungen in stark gewittergefährdeten Gebieten durch Kabel ersetzt wurden. Die Wahrscheinlichkeit eines Blitzeinganges ist bei einem Erdkabel in erster Näherung etwa gleich wie bei einer Freileitung. Ein direkter Blitz in ein Erdkabel braucht nun nicht unbedingt einen Fehler zur Folge zu haben; die Wahrscheinlichkeit eines Fehlers wächst bei gleichem Blitzstrom aber proportional mit dem Längswiderstand des Mantels und mit der Wurzel aus dem spezifischen Widerstand des Bodens. Da in Höhenlagen, und besonders im Tessin, sowohl die Blitzhäufigkeit wie auch der spezifische Widerstand des Bodens erhöht sind, so sind Anlagen in diesen Gebieten bedeutend stärker gefährdet als solche im Mittelland; für dünne Kabel wird die Gefahr noch durch den erhöhten Längswiderstand vergrössert.

Als typisches Beispiel einer gefährdeten Anlage sei das Anschlusskabel des UKW- und Fernsehsenders La Dôle auf dem Jura nördlich von Genf erwähnt. Der Sender steht auf einer Höhe von 1520 m ü. M. und ist mit einem bandarmierten Kabel von etwa 3,5 km Länge mit der Zentrale St. Cergue verbunden. Beim Sender ist das Kabel mit dem Sendernetz, das einen Erdungswiderstand von etwa 3Ω hat, verbunden. Auf einer Länge von 500 m sind vom Sender her zwei Schutzdrähte in ca. 30 cm Distanz vom Kabel verlegt worden. Im Laufe der ersten Jahre traten einige Blitzschäden auf, ein Teil davon bei Wintergewittern. Nachdem ein einzelner Blitz zu 14, auf einen grossen Teil der Länge verteilten Kabelfehlern führte, entschloss man sich, den offensichtlich am meisten gefährdeten obersten Kilometer in einen Zoreskanal mit Stossverbindern zu

verlegen. Man war sich der Unvollkommenheit dieser Massnahme bewusst und verzichtete aus wirtschaftlichen Gründen auf weitergehende Verbesserungen. Die Änderung schien sich vorerst gut zu bewähren, bis wieder in einem Wintergewitter ein Blitz in das tieferliegende ungeschützte Teilstück einschlug und einen neuen Betriebsunterbruch verursachte. Die Kabelanlage wird jetzt auf der ganzen Länge auf erhöhte Blitzsicherheit umgebaut, nachdem total 90 Fehlerstellen aufgetreten sind.

Man ist heute allgemein der Auffassung, dass die Blitzgefährdung derartiger Kabel zu den betriebsmässigen Beanspruchungen gehört und bei der Planung berücksichtigt werden muss. Auch genügt es keinesfalls, nur scheinbar stärker gefährdete Teilstücke zu schützen.

1.2 Kabeldefekte an Stollenkabeln

Schwere Schäden an Fernmeldekabeln durch Blitzeinwirkung entstanden nach dem 2. Weltkrieg im Kanton Tessin und im Kanton Graubünden, als der Bau von Wasserkraftwerken in den schweizerischen Alpen einen starken Aufschwung nahm. Diese Defekte traten zur Hauptsache an Fernmeldekabeln auf, die in Wasserstollen in den Zentralalpen verlegt wurden. Drei typische Fälle werden nachstehend in der Reihenfolge ihres Auftretens beschrieben (Fig. 1).

a) *Stollenkabel Peccia-Sambuco und Peccia-Erta.* Im Sommer 1956, ein Jahr nach der Verlegung, stellten die Maggia-Kraftwerke Defekte in der Kabelanlage fest, die sich in Isolationsfehlern und Unterbrüchen, aber auch darin äusserten, dass beim tiefer gelegenen Endverschluss im Wasserschloss Peccia Wasser aus den Kunststoffkabeln heraustropfte. Während eines Gewitters konnten Überschlüsse von den Kabeladern zum Endverschluss direkt beobachtet werden. Die Konstruktion der Kabel ist die folgende: Über den verseilten Vierern folgt ein doppelter Kunststoffmantel, bestehend aus 2,9 mm Polyäthylen (PE) und darüber 2,5 mm Polyvinylchlorid (PVC). Aderisolation aus PE. Im Stollen befindet sich nur dieses Kunststoffkabel ohne Metallmantel.

Das erste Kabel musste im Frühjahr 1958 teilweise ersetzt werden. Nachdem sich weitere Defekte einstellten, wurden 1960 neue Kabel mit Metallmänteln verlegt, welche für die Ableitung des durch das Gestein zudringenden Blitzstromes geeignet sind. Seither sind keine Defekte mehr aufgetreten.

Über die Fehleruntersuchungen berichteten *E. Foretay* und *R. Ruchet* im Bulletin des SEV 1961, Nr. 1, S. 33, dass am Kabel Peccia-Sambuco eine grosse Menge von Durchschlägen

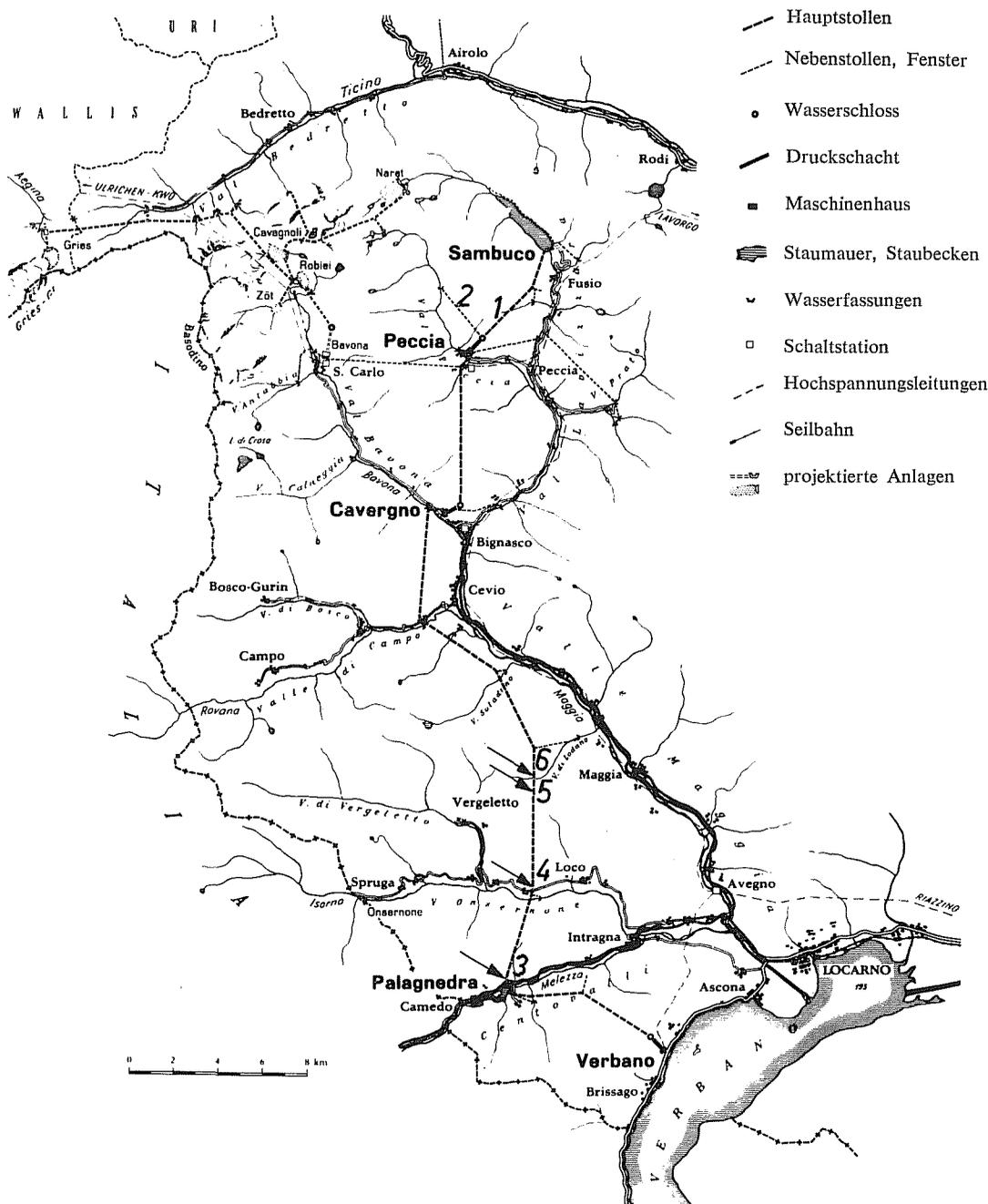


Fig. 1
Stollenkabeldefekte im Maggiatal
 Kunststoffkabel: 1 Peccia-Sambuco; 2 Peccia-Erta
 Papierbleikabel: 3 Kabelfehler 540 m ab E. V. Palagnedra; 4 Kabelfehler Stollenfenster Isorno; 5 Kabelfehler bei km 7,956; 6 Kabelfehler bei km 8,063

durch den doppelten Kunststoff-Mantel auf die Kabeladern, z. T. auch Unterbrüche der Adern, sowie mehrere cm lange Risse im PVC-Mantel aufgetreten sind. Am ausgebauten Kabel Peccia-Sambuco wurden über 40 Defektstellen gesichtet.

b) *Stollenkabel Palagnedra-Cavigno (Maggia)*. Die Kabellänge beträgt 24,35 km. Das Kabel wurde in den Jahren 1953 und 1954 hergestellt und im Wasserstollen des Kraftwerkes Verbano verlegt. Im Stollen befindet sich nur dieses Kabel.

Konstruktion: Bleimantel mit Papierisolation der klassischen Bauweise (500 V Prüfspannung zwischen den Adern, 2000 V zwischen Adern und Bleimantel). Über dem Bleimantel folgen zwei bitumierte Papiere, das Jutepolster und die Flachdrahtarmierung.

Im Sommer 1960 entstand eine plötzliche Häufung von Isolationsdefekten und von Unterbrüchen, so dass der Stollen geleert werden musste. Zunächst wurden 4 Fehlerstellen bestimmt, davon eine nahe beim Kabelende Palagnedra, eine zweite beim Stollenfenster Isorno und zwei weitere mitten in der Kabelstrecke, mehr als 2 km von den nächsten Stollenfenstern Isorno und Lodano entfernt. Ein weiterer Fehler erschien nur zeitweise; er verschwand beim Bewegen des Kabels.

Bei der näheren Untersuchung ausgebauter Kabelstücke zeigten sich z. T. Löcher im Bleimantel, sowie starke Brandspuren zwischen den Adern. Es war möglich, die Fehlerstellen zu reparieren, wobei ein Stück von 107 m und ein Stück von

16 m Länge neu eingesetzt wurden. Das Kabel ist heute noch in Betrieb.

c) *Stollenkabel Biasca-Pontirone-Malvaglia (Blenio)*. Die Kabellänge beträgt ca. 12,5 km. Das Kabel wurde 1959 verlegt und in Betrieb genommen.

Konstruktion (Stollenstrecke ca. 10 km): Papierisolation mit Bleimantel mit äusserem PVC-Überzug. Unter dem Bleimantel befindet sich eine Stützspirale aus zwei Eisenbändern $30 \times 0,5$ mm, welche den Wasserdruck aufnehmen soll. Im Stollen befindet sich dieses einzige Kabel.

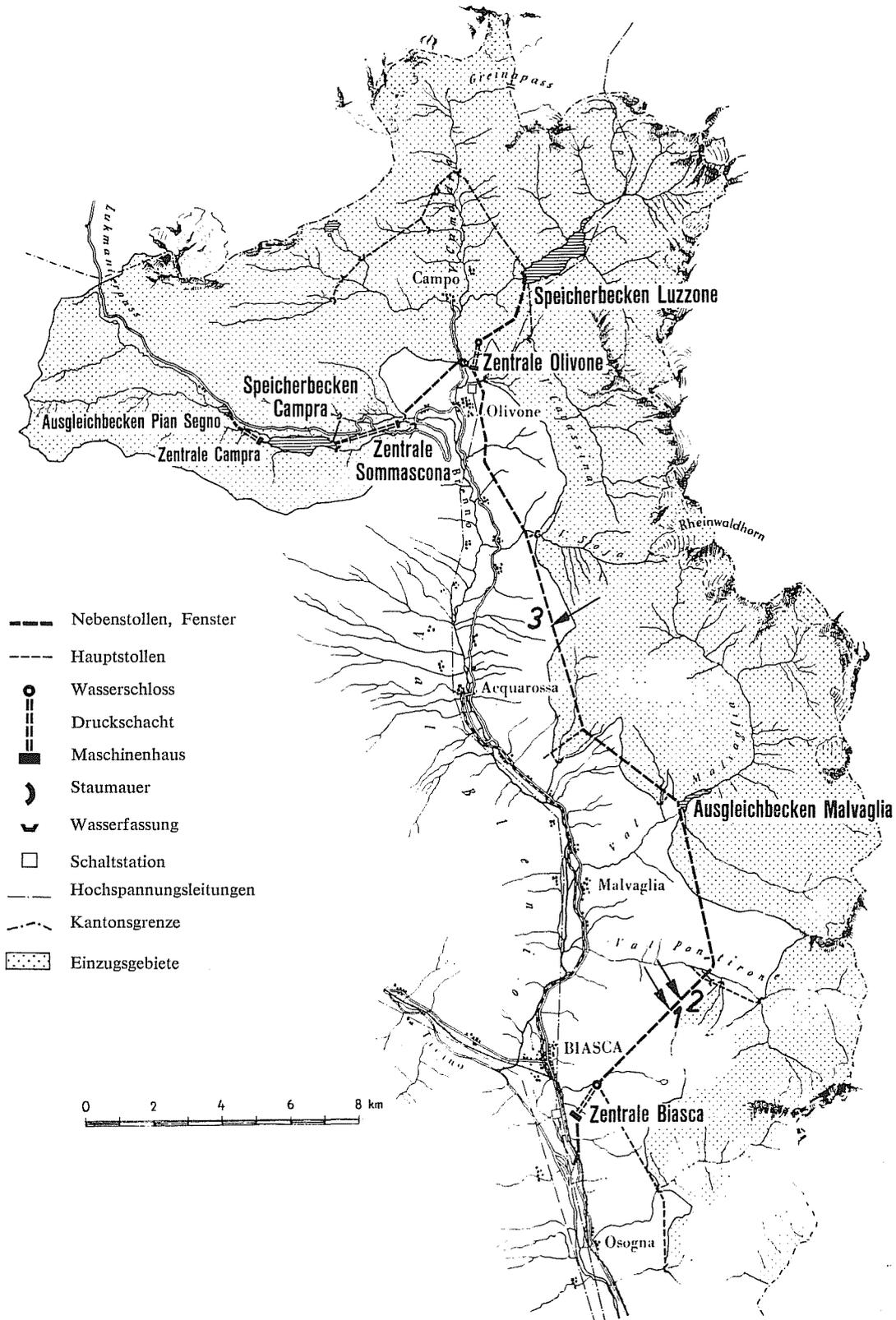


Fig. 2
Stollenkabeldefekte im Blenioal

Papierbleikabel: 1 Kabelfehler bei 3,9 km ab Wasserschluss; 2 Kabelfehler bei 4,2 km ab Wasserschluss; 3 Kabelfehler 6,8 km nördlich von Malvaglia

Bereits im Juli 1960 entstand ein Defekt in der Kabelstrecke Biasca-Pontirone. Durch ein kleines Loch im PVC und Bleimantel drang Wasser in das Kabel ein. Es wurden zunächst zwei Fehlerstellen ermittelt: 3,9 und 4,2 km oberhalb des Wasserschlosses. Der Wasserdruck im Stollen beträgt dort 5...8 atü. Die mikroskopische Untersuchung des Defektes durch Dr. *Vögtli* der PTT-Verwaltung ergab einwandfrei Schmelzspuren am Rand des feinen, ca. 1 mm grossen trichterförmigen Loches im Bleimantel. Es wurde versucht, ähnliche Fehler künstlich zu reproduzieren. Es war jedoch nicht möglich, mit einzelnen Stoss-Strömen kurzer oder langer Dauer gleiche Spuren im PVC und Bleimantel zu bekommen. Erst bei Anwendung von über 100 schwachen Stoss-Strömen durch das Loch im PVC zum Bleimantel liess sich die Erscheinung nachbilden.

Im Frühjahr 1961 wurden weitere Fehlerstellen gefunden, davon eine mit genau gleichen Spuren, nämlich Durchlöcherung sowohl des PVC- wie auch des Bleimantels in der Kabelstrecke Malvaglia-Olivone, ca. 6,8 km nördlich Malvaglia. In allen diesen Fällen mit Löchern im PVC- und Bleimantel wurden ca. 15...20 m Kabel mit Wasser durchtränkt und damit unbrauchbar.

Zwei weitere Fehler wurden in der unmittelbaren Nähe von zwei Wasserfassungen festgestellt, wobei aber der Mantel keine Spuren zeigte, sondern lediglich Adern verbrannten oder unterbrochen waren. Ende 1961 wurden bei einer weiteren Wasserfassung Fehlerstellen gefunden, wo Adern durchgeschmolzen oder angebrannt waren, ohne dass die Gürtelisolations Spuren aufwies (Leggiuna).

1.3 Bemerkungen zu den Defekten

Alle beschriebenen Defekte sind in Gebirgsstollen oder an deren Enden (Wasserfassungen) vorgekommen, wobei das Gestein spezifische Widerstände von 10000...20000 Ω m aufweist (Messungen der PTT im Maggital und am Sanetschpass).

In den Fällen a) und c) war es nötig, neue Kabel auf grosse Strecken zu verlegen. Die Defekte am Stollenkabel Biasca-Pontirone haben gezeigt, dass bei einem Blitzschlag im Gebirge feine Löcher im äusseren PVC-Mantel entstehen. Diese hätten wegen der Korrosion keine Bedeutung, führen aber bei jedem Blitzschlag in die Felsüberdeckung Strom, bis schliesslich der Bleimantel durchbohrt wird. Im Falle b) konnte bis jetzt vom Ersatz des Kabels abgesehen werden. Die 3 beschriebenen Fälle sind den Autoren durch das Entgegenkommen der Maggia- und Blenio-Kraftwerke in allen Einzelheiten bekanntgegeben worden.

In diesem Zusammenhang mag es interessant sein, noch einen Unfall beim Bau des Druckstollens Biasca-Pontirone vom 21. Juni 1957 kurz zu erwähnen. Während eines starken Gewitters in der Gegend von Biasca wurde an diesem Tage an der Baustelle im Pontirone-Tal nur Wetterleuchten wahrgenommen. Bevor der verantwortliche Bauleiter die im Stollen arbeitende Mannschaft warnen konnte, entstand eine vorzeitige Zündung der elektrischen Minenzünder in der Stollenbrust. Durch die Explosion erlitten mehrere Arbeiter Verletzungen, glücklicherweise meistens leichter Natur. Die Stollenlänge betrug damals 1400 m von Pontirone aus. Der Unfall ereignete sich somit ungefähr an der Stelle, wo 1962 zwei Kabeldefekte entstanden. Es wurden damals noch die klassischen, elektrisch ausserordentlich empfindlichen Minenzünder verwendet, die heute durch die hoch-unempfindlichen Zünder (HU-Zünder) abgelöst sind.

2. Ursachen der Kabeldefekte

2.1 Thermische Wirkungen bei direkten Blitzschlägen

Schlägt der Blitz in den Erdboden ein, so ist die elektrische Feldstärke E in der Nähe der Einschlagstelle gegeben durch:

$$E = \rho S \quad (1)$$

ρ spezifischer Widerstand des Erdbodens; S Stromdichte.

Überschreitet die elektrische Feldstärke den Grenzwert von 3 kV/cm, so kann die Stromstärke sehr stark anwachsen bei wenig ändernder elektrischer Feldstärke. Der Durchschlag wird bei Feldstärken von 3...20 kV/cm eintreten, während Längsüberschläge an der Oberfläche bei wenigen kV/cm möglich sind. Durchquert ein Kabel, dessen äusserer Schirm direkt mit dem Erdreich in Kontakt steht, den Spannungstrichter, so kann bei kleinen Entfernungen über die entstehende Gleitentladung auf der Erdoberfläche ein Durchschlag zum Kabelmantel eintreten. Die Überschlagsdistanz kann von wenigen Metern bei gut leitendem Boden bis zu mehreren 10 m bei sehr schlecht leitendem Boden variieren.

Bei einem Einschlag direkt in den Metallmantel des Kabels ist die thermische Energie proportional der Ladung Q und dem Anoden- bzw. Kathodenfall u des Mantelmaterials. Durch Versuche wurde festgestellt, dass durch eine Ladung von 1 Coulomb (C) 0,6 mm³ Blei verdampft werden. Ohne Berücksichtigung der Wärmeableitung und des Schmelzvorganges würde daher bei einem direkten Blitzeinschlag mit einer Ladung von 50 C ein 3 mm dicker Bleimantel perforiert (Fig. 3). Der Bleimantel muss deshalb durch eine thermisch widerstandsfähige Armierung (Stahl) geschützt werden.

2.2 Mechanische Wirkungen

Bei Durchschlägen zwischen Armierung und Bleimantel verbrennen die dazwischenliegenden Schutzschichten (Papier, feuchte Jute, Bitumen) schlagartig. Der Druckstoss, der beim Verdampfen der feuchten Jute auftritt, ist von sehr kurzer Dauer. In Anbetracht, dass eine Bandarmierung das Ausreten der Gase nach aussen stärker hemmt als eine Flachdrahtarmierung, ist bei diesem explosionsartigen Vorgang eine stärkere Beschädigung des Bleimantels zu erwarten als bei der Flachdrahtarmierung. Der Eindruck am Kabelmantel kann so ausgeprägt sein, dass das Aderbündel deformiert werden kann.

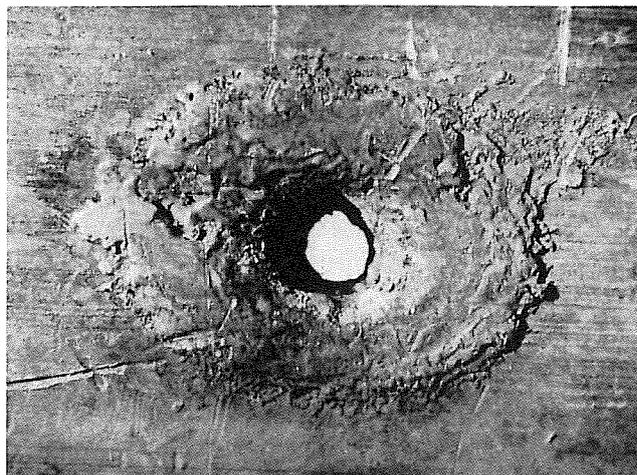


Fig. 3
Perforierter Bleimantel
Lochdurchmesser ca. 1 mm

Sehr empfindlich gegenüber mechanischen Einwirkungen sind die Koaxialkabel, denn Bleimantel-Deformationen verursachen Reflexionsstellen oder sogar Kurzschlüsse im Kabel. Eine ähnliche Wirkung wird auch bei unarmiert verlegten Kabeln im feuchten Erdboden beobachtet.

Die mechanische Beschädigung des Bleimantels kann durch folgende Massnahmen vermieden werden:

a) Kontinuierliche metallische Verbindung zwischen Armierung und Bleimantel.

b) Aufbringen eines Kunststoffmantels zwischen Bleimantel und Armierung, wobei die Stossdurchschlagfestigkeit U_D des Mantels folgende Bedingung erfüllen muss:

$$U_D > \frac{I}{2} \cdot \frac{R}{2} \quad (2)$$

I Amplitude des Blitzstromes; R Widerstand der äusseren Armierung zwischen zwei Spleisstellen.

Diese Formel gilt unter der Voraussetzung, dass bei jeder Muffe der Bleimantel mit der Armierung verbunden ist.

2.3 Durchschlag der äusseren Thermoplastmängel

Schützt man den Metallschirm durch einen Thermoplastmantel vor Korrosion, so wird diese Schutzhülle bei einem Blitzeinschlag in die Umgebung des Kabels elektrisch beansprucht.

Die Spannung U_p zwischen dem Metallmantel (Mantel ausserhalb des Spannungstrichters geerdet) und dem Erdreich beträgt:

$$U_p = I \frac{\rho}{2\pi a} \quad (3)$$

a Abstand des Metallmantels von der Einschlagstelle; I Blitzstromstärke; ρ spezifischer Widerstand des Erdbodens.

Ist die Stossfestigkeit des Kunststoffmantels kleiner als die Spannung U_p , so wird die Isolationsschicht durchschlagen. In der Regel haben die Fehlerstellen einen Lochdurchmesser von ca. 1 mm. Durch den perforierten Thermoplastmantel dringt Feuchtigkeit bis zum Metallmantel vor und kann im Laufe der Zeit die Korrosion desselben bewirken. Bei wiederholten Blitzeinschlägen, auch in grösseren Entfernungen, tritt der Strom jedes Mal durch die feinen Löcher im PVC-Mantel ein und führt mit der Zeit zur Verletzung oder Perforierung des Bleimantels.

2.4 Durchschläge im Kabelinnern

Mit zunehmendem Bodenwiderstand fliesst der Blitzstrom über längere Strecken im Kabelmantel und tritt erst allmählich ins Erdreich über. Die Spannung zwischen dem Metallmantel und den Kabeladern kann dann solche Werte annehmen, dass Isolationsdefekte auftreten.

3. Verhalten der Kabel bei direkten Einschlägen in den Kabelmantel

3.1 Längsspannung

Bei einem Einschlag direkt in das Kabel fliesst der Blitzstrom entlang des Kabelmantels und tritt je nach Bodenverhältnissen mehr oder weniger rasch in die Erde über. Bildet der Kabelmantel ein geschlossenes Rohr, so erzeugt der Blitzstrom im Innenraum kein magnetisches Feld (Faradaykäfig). Je nach der Steilheit des Stromes nimmt die Stromdichte von aussen nach innen ab (Fig. 4). Ist S_i die Stromdichte an der Innenhaut des Kabelmantels, ρ der spezifische Widerstand des Mantelmaterials und l die Kabellänge, so ist bei Vernachlässigung des Ohmschen Spannungsabfalles im Aderbündel nach dem Maxwellschen Gesetz im Stromkreis mit dem umfassten Fluss Φ_{res} :

$$\oint (\vec{E} \cdot d\vec{s}) = - \frac{d\Phi_{res}}{dt} \quad (4)$$

mit $\Phi_{res} = 0$ findet man für die Spannungsdifferenz zwischen Ader und dem Metallmantel:

$$\hat{U} = U_2 - U_1 = \rho \int_1^2 S_i dx \quad (5)$$

Bei den in Betracht kommenden Frequenzen ist für nicht ferromagnetische Materialien die Eindringtiefe wesentlich grösser als die Manteldicke, so dass man in erster Näherung die Stromdichte über dem ganzen Kabelmantel als konstant betrachten kann. In diesem Falle kann für die Längsspannung geschrieben werden:

$$\hat{U} = \int_1^2 R_M i_x dx \quad (6)$$

\hat{U} Längsspannung des Kabels; R_M Gleichstromwiderstand des Kabelmantels [Ω/km]; i_x Momentanwert des Stromes in der Entfernung x von der Einschlagstelle.

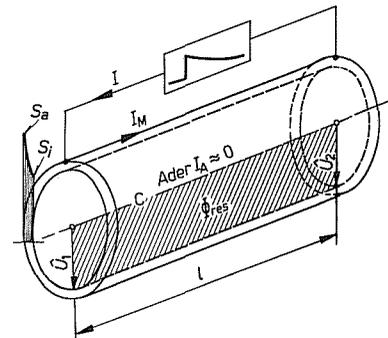
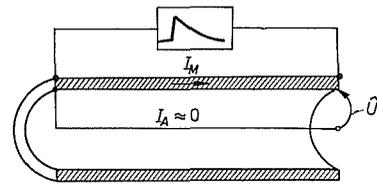


Fig. 4
Verlauf der Stromdichte im Kabelinnern bei Stoss
 I Blitzstrom (Messstrom); I_A Kabeladerstrom; I_M Kabelmantelstrom;
 $\hat{U} = I_M R_K$ Längsspannung; \hat{U}_1, \hat{U}_2 Aderspannung 1 bzw. 2; S_a Stromdichte aussen; S_i Stromdichte innen; C Kabelachse; l Länge der Messstrecke; Φ_{res} magnetischer Fluss im Kabelinnern

Überschreitet die Längsspannung die Isolationsfestigkeit der Gürtelisolations, so führt dies zum Durchschlag. Werden längs der ganzen Strecke keine Adern aus dem Kabel herausgeführt, so tritt bei langen Kabeln an der Einschlagstelle praktisch die volle Längsspannung zwischen jeder Ader und dem Mantel auf. Um einen Durchschlag zu verhindern, muss die Gürtelisolations entsprechend verstärkt werden. Führen jedoch unterwegs einzelne Adern aus dem Kabel heraus, so muss auch die Aderisolation der Beanspruchung mit \hat{U} standhalten.

Für den Fall, dass die Stromdichte nicht über dem Mantelquerschnitt konstant bleibt, ist nicht mehr der Gleichstromwiderstand R_M , sondern der sog. Kopplungswiderstand R_K massgebend. R_K ist definiert als das Verhältnis des an der Innenhaut auftretenden Spannungsabfalles \hat{U} zum Scheitelwert des gesamten Mantelstromes I_M :

$$R_K = \frac{\hat{U}}{I_M} \quad (7)$$

Bei tiefen Frequenzen ist der Kopplungswiderstand gleich gross wie der Gleichstromwiderstand R_M des Kabelmantels. Ist der Metallschirm ein geschlossenes Rohr, so sinkt der Kopplungswiderstand infolge der Stromverdrängung bzw. der Wirbelströme im Mantel mit steigender Frequenz. Für sehr schnelle Vorgänge wird daher bei gleichen Stoßströmen die Längsspannung kleinere Werte annehmen als bei Gleichstrom.

Aus Gl. (6) ist weiter ersichtlich, dass die Längsspannung umso kleinere Werte annimmt, je schneller der Strom in das Erdreich übertritt. In dieser Beziehung ist jede isolierende Umhüllung des Kabels gegen Erde unerwünscht.

Wie Fig. 5 zeigt, kann der Blitzstrom bei schlechter Bodenleitfähigkeit (z. B. Maggiatal 15 000 Ω m, Mittelland 50...300 Ω m) über beträchtliche Entfernungen auf dem Kabelmantel fließen, bis er endlich über die mit dem Erdreich in Kontakt stehende Stahlarmierung nach der Erde abgeleitet wird.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Längsspannung zwischen Kabelader und Metallmantel von der Amplitude des Blitzstromes, dem Längswiderstand des Kabelmantels, der allfälligen Stromverdrängung, dem spezifischen Widerstand des Erdreiches und der Halbwertzeit des Stossstromes abhängt.

Um die komplizierte Berechnung von *Sunde* [7] ¹⁾ zu umgehen, darf für kurze Stösse bis ca. 100 μ s Halbwertzeit folgende empirische Formel benützt werden:

$$U_{(x=0)} \approx K R_K \sqrt{\rho} \sqrt{T_H} \cdot I_M \quad (8)$$

U Spannung [V]; I_M Mantelstrom [A]; ρ spez. Erdbodenwiderstand [Ω m]; T_H Halbwertzeit des Mantelstromes [s]; R_K Kopplungswiderstand des Kabelmantels [Ω /km].

Mit den benützten Einheiten darf für die Konstante K die Zahl 1 gesetzt werden.

Annähernd dieselbe Spannung tritt zwischen Ader und Mantel in der kritischen Entfernung auf, wenn an der Einschlagstelle Ader und Mantel verbunden sind (s. Abschnitt 7.1).

3.2 Der Gütefaktor eines Kabels

Aus Abschnitt 3.1 ergibt sich, dass der Kopplungswiderstand einen bestimmten Wert nicht überschreiten darf, da sonst die Längsspannung grössere Werte als die Stossspannungsfestigkeit des Isolationsmaterials erreichen kann.

Bei Kabeln mit Mänteln aus nicht ferromagnetischem Material ist der Kopplungswiderstand bei den auftretenden Fre-

quenzen von einigen kHz praktisch gleich gross wie der Gleichstromwiderstand. Ist das Kabel mit einem Eisenrohr umgeben (Zoreskanal mit Stossverbindern), sinkt infolge der Stromverdrängung die Längsspannung auf $\frac{1}{2}$ bis $\frac{1}{5}$ des Wertes bei Gleichstrom [3].

Als Mass für die Widerstandsfähigkeit eines Kabels gegenüber Durchschlägen infolge von Stoßströmen definiert man daher zweckmässigerweise folgendes Verhältnis:

$$G = \frac{U_S}{R_K} \quad (9)$$

G Gütefaktor; U_S Stoss-Spannungsfestigkeit [kV] (Ader- oder Gürtelisolierung); R_K Kopplungswiderstand des Kabelmantels [Ω /km] (allenfalls strom- und frequenzabhängig).

Ein normales Fernmeldekabel mit einer Stossfestigkeit von ca. 3 kV und einem Gleichstromwiderstand von 1 Ω /km hat demnach einen Gütefaktor $G = 3$ kA \cdot km, d. h. es kann 30 kA auf 100 m oder 10 kA auf 300 m ohne Durchschlag führen.

3.3 Spezialkabel mit geschichtetem Aufbau

Der Gedanke, die Stromverteilung in einem Kabelmantel in Richtung eines «vergrösserten Skineffektes» zu steuern, tauchte erstmals 1938 auf [5]. Im Jahre 1957 wurden von der Abteilung Forschung und Versuche der PTT Untersuchungen über das Verhalten von Kabeln mit kombinierter Band- und darüberliegender Flachdrahtarmierung bei Stoßströmen durchgeführt. Diese Versuche zeigten, dass bei Stoßströmen bis zu einer gewissen Grösse eine ausgezeichnete Schutzwirkung möglich ist, dass aber bei Kabeln von kleinem Durchmesser ohne zusätzlichen Aufwand nicht auszukommen ist [3]. Die bis zu jenem Zeitpunkt aufgetretenen Schäden liessen einen Aufwand im erforderlichen Ausmass als nicht gerechtfertigt erscheinen.

Im Winter 1960/61 wurde ein Kabel (II) für extreme Beeinflussung hergestellt, von dem man bei induktiver Beeinflussung und naturgemäss auch bei Stoßströmen ein günstiges Verhalten erwartete. Der Aufbau des Kabels (Fig. 16) zeigt, dass es sich um ein reines Versuchskabel handelte. Das Verhalten des Kabels bei 50 Hz ist in Fig. 30 angegeben.

Ungefähr gleichzeitig wurde ein Kabel (I) mit geschichtetem Aufbau als Ersatz des Stollenkabels unter Ziff. 1.2 nach einem Vorschlag von *Berger* gebaut [6]. Bei dessen Aufbau wurde weniger Eisen verwendet, es enthält aber dünne Isolationschichten zwischen den einzelnen Metallagen. Das Kabel zeigt ähnliche Eigenschaften wie das bereits erwähnte, ist aber für eine kleinere Beanspruchung dimensioniert. Auf der Basis des geschichteten Aufbaus wurde später ein Kabeltyp entwickelt, der in gefährdeten Gegenden eingesetzt wird.

4. Messungen der Längsspannungen bei Stoßstrom auf dem Kabelmantel

Für diese Messungen standen Kabelmuster von 15...75 m Länge aller praktisch verwendeten Mantel- und Armierungsarten zur Verfügung, ferner zwei verschiedene Zoreskanalprofile und zwei Spezialkabel mit geschichtetem Mantel.

Die Abmessungen und Baustoffe aller untersuchten Kabelmäntel sind in den Fig. 6...17 dargestellt.

Für die Bezeichnung der Kabelmäntel wurden in den Figuren die üblichen Abkürzungen benützt:

- Typ A: Bleimantel blank
- Typ B: Nicht armiert, Korrosionsschutz aus geteertem Papierband und Jutegarnumwicklung
- Typ AT: Nicht armiert, Korrosionsschutz aus Thermoplasthülle
- Typ C: Eisenbandarmierung mit geteeter Juteumwicklung

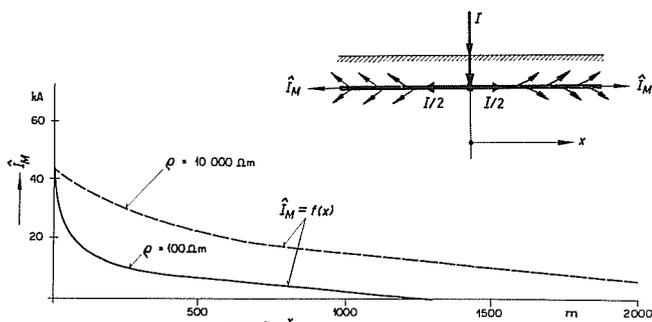


Fig. 5

Verlauf des Kabelmantelstromes entlang dem Kabeltrassé bei einem Blitzeinschlag an der Stelle $x = 0$

I Blitzstrom; I_M Kabelmantelstrom; x Entfernung vom Einschlag; ρ spezifischer Erdbodenwiderstand

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

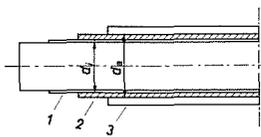


Fig. 6
Kabeltyp B
1 Gürtelpapier 0,75 mm; 2 Bleimantel 1,8 mm; 3 Jute 2,5 mm; d_i Innendurchmesser des metallischen Mantels; d_a Aussendurchmesser des metallischen Mantels

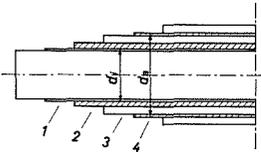


Fig. 7
Kabeltyp C
4 2 Lagen Eisenband $30 \times 0,5$ mm (Steigung 45 mm)
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 6

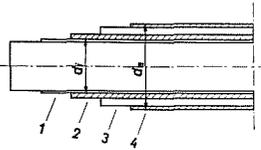


Fig. 8
Kabeltyp F
4 Flachdraht 1,2 mm
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 6

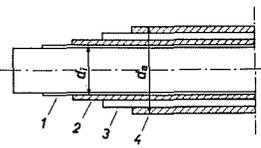


Fig. 9
Kabeltyp FF
4 2 Lagen Flachdraht $2 \times 1,2$ mm (kreuzweise)
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 6

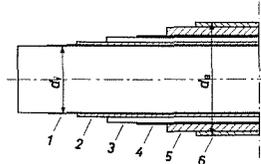


Fig. 10
Kabeltyp CF
4 $2 \times$ Eisenband $2 \times 0,5$ mm;
5 Jute 2,5 mm; 6 Flachdraht 1,2 mm
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 6

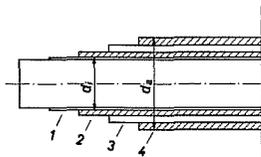


Fig. 11
Kabeltyp R
4 Eisendraht 1,8 mm ϕ
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 6

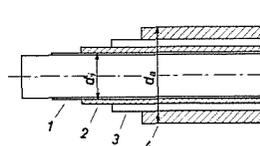


Fig. 12
Kabeltyp RR
4 2 Lagen Eisendraht 1,8 mm ϕ (kreuzweise)
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 6

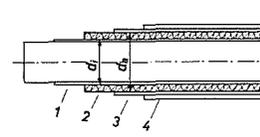


Fig. 13
Kabeltyp mit Cu-Wellmantel
1 Gürtelpapier; 2 Wellmantel, Cu 0,5 mm Dicke, $d_i = 15$ mm, $d_a = 20$ mm; 3 Polymer 1 mm; 4 PVC 1,4 mm

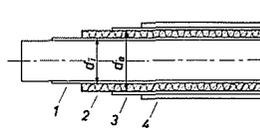


Fig. 14
Kabeltyp mit Stahl-Wellmantel
1 Gürtelpapier; 2 Wellmantel; Stahl 0,3 mm Dicke; $d_i = 15$ mm, $d_a = 20,3$ mm; 3 Polymer 1 mm; 4 PVC 1,4 mm

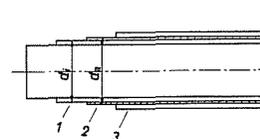


Fig. 15
Kabeltyp mit 2 Cu-Bändern
1 Gürtelpapier; 2 2 Lagen Cu-Band $2 \times 0,15$ mm Dicke, 3 mm Überlappung (kreuzweise); 3 PVC 1,6 mm

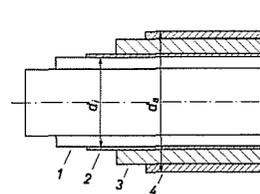


Fig. 16
Spezialkabel «II»
1 Gürtelpapier; 2 30 Cu-Drähte à 1 mm²; 3 8 Eisenbänder $20 \times 0,5$ mm, Steigung 24 mm, je 2 gleichsinnig; 4 Bleimantel 2,4 mm

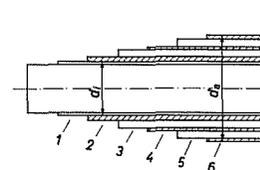


Fig. 17
Spezialkabel «I»
1 2 Cu-Bänder $30 \times 0,15$ mm und 1 Polyesterband 0,04 mm; 2 2 Lagen Eisenband $30 \times 0,5$ mm, dazwischen 1 Polyesterband 0,04 mm; 3 PVC 2 mm; 4 2 Cu-Bänder $30 \times 0,15$ mm und 1 metallisiertes Seidenband 0,25 mm; 5 Bleimantel 2 mm; 6 Flachdraht $1,7 \times 6,2$ mm

- Typ R: Runddrahtarmierung
- Typ RR: Doppelte, gegenläufige Runddrahtarmierung
- Typ F: Flachdrahtarmierung
- Typ FF: Doppelte, gegenläufige Flachdrahtarmierung
- Typ S: Spezialarmierungen

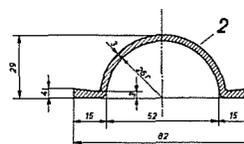
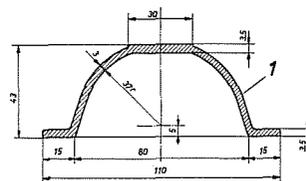
Kabel mit Thermoplasthülle erhalten zur Kennzeichnung zusätzlich das Symbol T, z. B. AT, TF, TC.

Die Zoresprofile sind in Fig. 18 dargestellt. Je zwei der dargestellten «Schalen» bilden zusammengefügt den Zoreskanal von 80 bzw. 52 mm innerem Durchmesser. Für die elektrische Längsverbindung des Zoreskanals wurden als Stossverbinder 5 mm starke Kupferdrähte verwendet, die an jedem Schalenecke hart angelötet und nach der Verlegung mit einer übergesteckten Hülse weich zusammengelötet wurden.

Zur Erzeugung des Stoßstromes dienten zwei fahrbare Stossgeneratoren mit einem Energieinhalt von 27 bzw. 42 kW. Damit liessen sich nach dem Schema von Fig. 19 folgende Formen des Stoßstromes erzeugen:

- Kurzer Stoss 8|18 ... 10|23 μ s bis 30 kA;
- Mittlerer Stoss 80|180... 98|220 μ s bis 15 kA;
- Langer Stoss 220|580...280|560 μ s bis 5 kA.

Die Stoßströme verlaufen in der Regel als gedämpfte Sinusschwingung. Ein Beispiel des Strom- und Spannungsverlaufs wird in Fig. 20 für das Versuchskabel 7 gegeben. Die vom Stromverlauf sehr verschiedene Spannungsform zeigt die nicht-lineare Wirkung des Eisens der doppelten Flachdrahtarmierung, besonders das verspätete Erscheinen der Spannung an der Innenseite des Mantels.



Aus der grossen Anzahl Oszillogramme wurden die Scheitelwerte des Mantelstromes und der Längsspannung für den kurzen und den mittleren Stoss (ca. 9|20 und 90|200 μ s) ausgewertet und in Tabelle I zusammengestellt.

Fig. 18
Zoresprofile
1 Profil 4, 80 mm lichte Weite;
2 Profil 5,2, 52 mm lichte Weite

Zusammenstellung der Versuchsergebnisse
Längsspannungen pro 1 km Kabel und 1 kA Stossstrom (spezifische Längsspannung V/km·kA) bei Stoss- und Gleichstrom

Tabelle I

Nr.	Prüfung	Metallmantel- durchmesser d_i/d_a	Länge des Kabels m	Gewicht der Abschirmung kg/m	Spezifische Längsspannung [V/km · kA]		
					bei Stoss 9[20 μ s, bis 30 kA	bei Stoss 95[215 μ s, bis 15 kA	Gleichstrom
1	Spezialkabel II (Fig. 16)	30/47	25,8	7,7	2,5	—	280
2	Spezialkabel I (Fig. 17)	22/38,5	14,4	4,5	4...6	5,5	335
3	Zoreskanal 4, elektrisch ver- bunden, mit Kabel B	Fig. 18	22	9,45	60...76	64...70	164
4	Zoreskanal 5,2, elektrisch ver- bunden, mit Kabel B	Fig. 18	75	6,75	—	38...54	147
5	Kabel CF	17,5/35,5	22	2,65	71...78	64...68	200
6	Zoreskanal 4, elektrisch nicht ver- bunden mit Kabel B	Fig. 18	75	2,75	—	36...43	185
7	Kabel FF	17,5/30,9	25	2,65	22...76	295...400	800
8	Kabel RR	17,5/32	25	3,2	57...97	—	1920
9	Halber (offener) Zoreskanal, elektrisch verbunden mit Kabel B	Fig. 18	75	2,75	—	220...450	1880
10	Kabel R	17,5/29	25	2,75	110...175	345...405	570
11	Kabel F	17,5/28,5	25	2,0	125...215	350...435	450
12	Kabel mit Kupfer-Wellmantel	15/20	22	0,28	290...380	—	290
13	Kabel B mit 70 ² -Cu-Seil parallel	17,5/28,1	25	1,9	295...425	690...785	765
14	Kabel C, kreuzweise bewickelt	17,5/28,1	25	1,75	500	685...765	870
15	Kabel C, gleichsinnig bewickelt	21,1/17,5	22	1,25	630...660	655...670	680
16	Kabel B,	20,7/21,9	25	0,205	980...1000	945...990	230
17	Kabel mit 2 Cu-Bändern	15/20,3	24,2	0,15	740...975	1200...1350	1520
18	Kabel mit Stahl-Wellmantel	15/20,3	24,2	0,15	1060...1080	1320...1380	1450
					1680...1740	1750...1800	1900
					1600...2600	2320...2630	2650
					8150...9050	8950...9100	2650

Tabelle I enthält ausserdem die wichtigsten Angaben über die untersuchten Kabelmäntel, nämlich den innern und äussern Durchmesser des metallischen Kabelmantels (d_i/d_a), ferner das Gewicht dieses Mantels bzw. der gesamten Abschirmung (Kabelmantel und Zoresisen, sofern ein Zores-Kanal benutzt wurde), in kg/m. Die Reihenfolge wurde im Sinn steigender Längsspannungen gewählt, was mit Ausnahme der Positionen mit Zoreskanälen im grossen ganzen der Reihenfolge sinken-

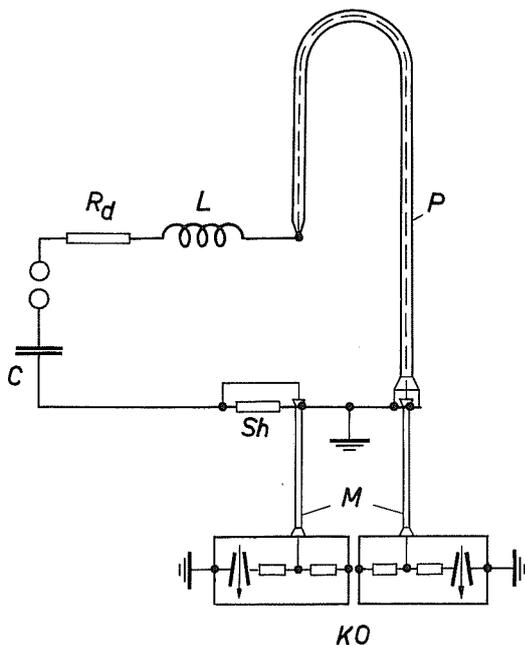


Fig. 19
Schema des Stosskreises

C Kapazität des Stossgenerators; R_d Dämpfungswiderstand; L Drossel-
spule; P Prüfobjekt; Sh Messhunt; M Messkabel; KO Oszillographen

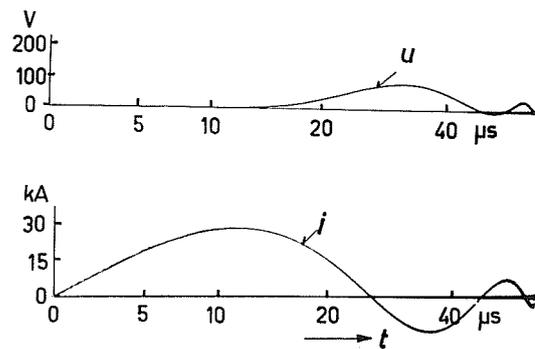


Fig. 20
Oszillogramm-Beispiele
(Kabeltyp FF)

u Längsspannung; i Mantelstrom; t Zeit

der Gewichte des Mantels entspricht. Die gegebenen Werte der Längsspannung sind auf 1 km Kanallänge und 1 kA Mantelstrom bezogen, sowohl für die beiden Stossformen wie schliesslich auch für Gleichstrom. Die Werte bei Stoss sind infolge der Sättigung des Eisens im Kabelmantel vom Mantelstrom mehr oder weniger abhängig; daher ist in der Regel der Bereich der Messwerte für Stoßströme bis 30 kA beim kurzen Stoss, und bis 15 kA beim mittleren Stoss eingetragen worden.

Um einen besseren Überblick zu bekommen, wurden die Tabellenwerte der Längsspannungen u in Kurvenform (Fig. 21) als Funktion des Stoßstromes i_{max} aufgetragen. Sättigungseffekte des Eisens äussern sich in dieser Darstellung durch das Ansteigen der Kurven mit zunehmendem Strom.

Im folgenden seien einige Beispiele aufgeführt, denen ein besonderes Interesse zukommt.

Fig. 22 zeigt die Längsspannung eines nicht armierten Bleimantelkabels (Typ B) mit 1,25 kg Blei pro Laufmeter (Nr. 16 von Tabelle I). Selbst beim kurzen Stoss ist die Längsspannung

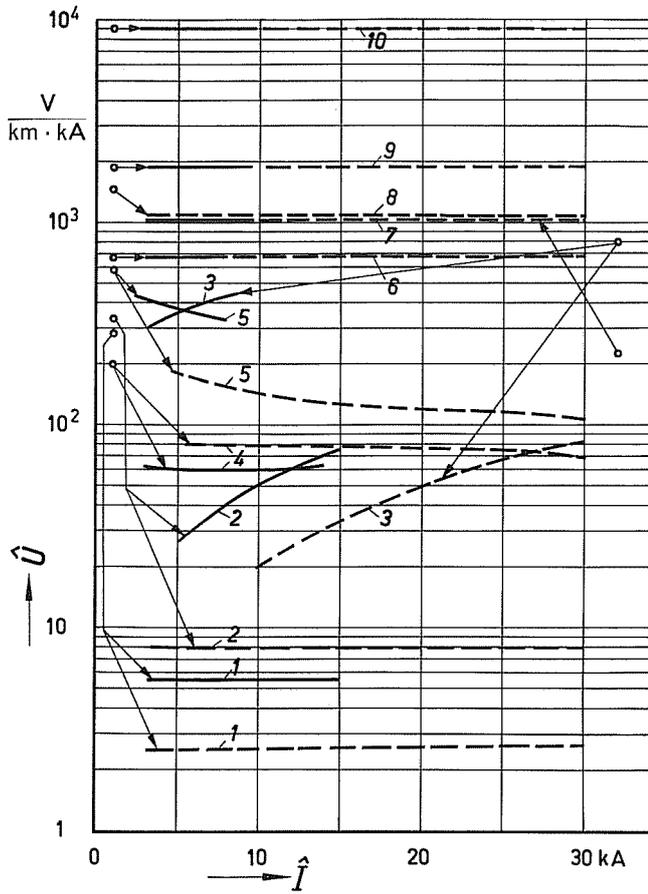


Fig. 21

Zusammenstellung der gemessenen Längsspannungen \bar{U} bei Stoss \bar{I} und Gleichstrom I

- Gleichstrom — Stoss ca. 10|20 μ s — Stoss ca. 90|200 μ s
- 1 Spezialkabel «II» (Fig. 16); 2 Spezialkabel «I» (Fig. 17); 3 Kabeltyp CF (Fig. 10); 4 Kabeltyp B in Zoreskanal, Profil 4 (Fig. 6 und 18); 5 Kabeltyp FF (Fig. 9); 6 Kabeltyp mit Cu-Wellmantel (Fig. 13); 7 Kabeltyp B mit 70 mm² Cu-Draht, parallel; 8 Kabeltyp C (Fig. 7); 9 Kabeltyp B (Fig. 6); 10 Kabeltyp mit Stahl-Wellmantel (Fig. 14)

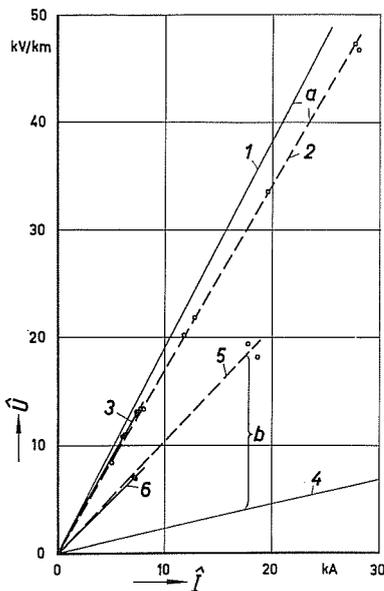


Fig. 22

Längsspannung \bar{U} eines nicht armierten Bleimantelkabels, Aufbau nach Fig. 6

(siehe auch Tabelle I, Nr. 16)

- a Kabel allein; b Kabel mit 70 mm² Cu-Draht parallel; 1 Gleichstrom; 2 Stoss 9|20 μ s; 3 Stoss 90|190 μ s; 4 Gleichstrom; 5 Stoss 8|18 μ s; 6 Stoss 88|190 μ s

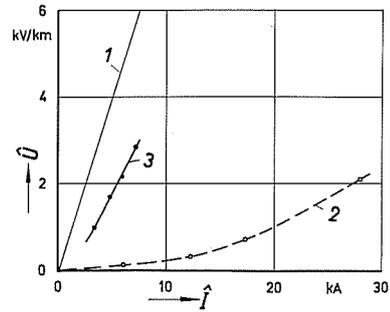


Fig. 23

Längsspannung \bar{U} eines Bleimantelkabels mit Bandeisen- und Flachdrahtarmierung

Aufbau nach Fig. 10 (siehe auch Tabelle I, Nr. 5)
1 Gleichstrom; 2 Stoss 9|20 μ s; 3 Stoss 85|185 μ s

praktisch gleich hoch wie bei Gleichstrom (oder 50-Hz-Strom); der Mantel verhält sich wie ein konstanter Widerstand.

In der Literatur findet man oft den Vorschlag, die Längsspannung bereits verlegter Kabel dadurch herabzusetzen, dass 1 oder 2 Kupferdrähte oder Stahlseile über dem Kabel im Kabelgraben verlegt werden. Fig. 21 zeigt, dass durch ein 70-mm²-Cu-Seil die Längsspannung bei Gleichstrom auf einen kleinen Bruchteil sinkt (ca. 1/8), dass dies aber bei weitem nicht der Fall ist bei Stoßströmen (Blitzströmen). Da die Stromverteilung zwischen Kabel und Cu-Seil bei Stoßstrom nicht nach dem Ohmschen Widerstand, sondern nach dem Wellenwiderstand oder der Induktivität geschieht, beträgt die Herabsetzung nur ungefähr 40%. Sie ist in weiten Grenzen unabhängig vom Ohmschen Widerstand des Schutzseiles.

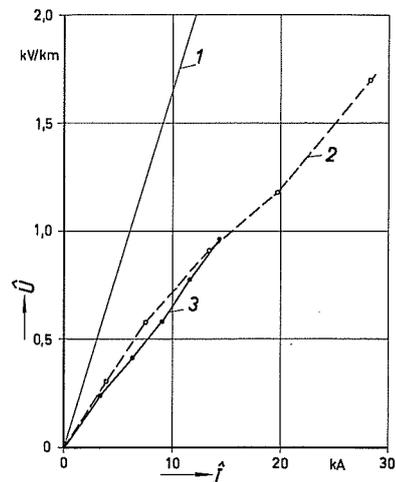


Fig. 24

Längsspannung \bar{U} eines nicht armierten Bleimantelkabels in einem durchverbundenen Zoreskanal Nr. 4

1 Gleichstrom; 2 Stoss 8|19 μ s; 3 Stoss 95|210 μ s

Fig. 23 zeigt das Verhalten einer der günstigsten üblichen Armierungen, nämlich eines mit Bandeisen und Flachdraht armierten Bleimantelkabels (Typ CF). Das Gewicht des Bleimantels und der Armierung beträgt ca. 2,65 kg/m (Nr. 5 von Tabelle I). Der Unterschied der Längsspannung bei kurzem und langem Stoss ist deutlich zu erkennen. Die Krümmung der Kurven ist im nicht linearen Verhalten des Eisens begründet (Sättigung).

Fig. 24 zeigt die Längsspannung eines nicht armierten Kabels (Typ B) nach Fig. 6, das in einem Zoreskanal (Nr. 4

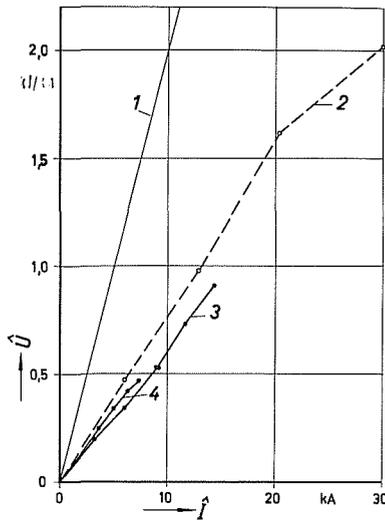


Fig. 25

Längsspannung \hat{U} eines nicht armierten Bleimantelkabels in einem durchverbundenen Zoreskanal Nr. 5,2

1 Gleichstrom; 2 Stoss 9 | 20 μ s; 3 Stoss 95 | 210 μ s; 4 Stoss 88 | 200 μ s;

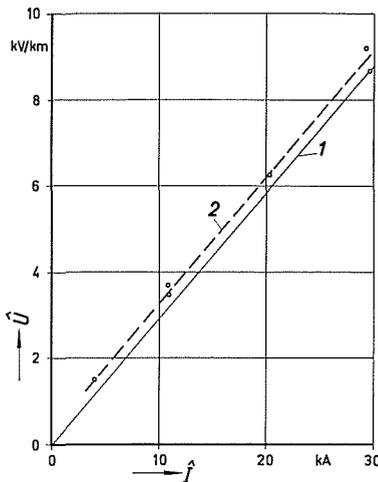


Fig. 26

Längsspannung \hat{U} eines nicht armierten Bleimantelkabels in einem durchverbundenen Zoreskanal Nr. 4, von dem jedoch nur die untere Hälfte verlegt wurde

1 Gleichstrom; 2 Stoss 8 | 19 μ s;

Fig. 17) verlegt wurde. Dabei sind obere und untere Schale des Zores-Kanals durch angeschweisste kurze Cu-Drähte von 5 mm Durchmesser praktisch widerstandslos überbrückt und durchverbunden. Es ist ersichtlich, dass sich diese Anordnung gegenüber Blitzstrom im wesentlichen durch die Verminderung des Ohmschen Widerstandes auszeichnet, weniger durch die Stromverdrängung. Die Längsspannung des Kabels allein beträgt z. B. bei 10 kA Gleichstrom ca. 19 kV/km, sie sinkt bei Verlegung in den Zoreskanal auf ca. 1,5 kV/km. Entsprechende Werte bei Stoss sind ca. 17 kV/km (Kabel allein) und 0,7 kV/km (mit Zoreskanal). Dies bedeutet eine Reduktion auf ca. 4%.

Fig. 25 gibt die entsprechenden Messwerte für den etwas kleineren Zoreskanal Nr. 5.2 (Fig. 17). Die Gewichte dieser Kanäle sind in Tabelle I angegeben (9,45 bzw. 6,75 kg/m). Es ist offensichtlich, dass die mit den Zoreskanälen erreichten sehr guten Resultate durch entsprechende Eisengewichte bezahlt werden müssen.

Fig. 26 wird hier reproduziert, um zu zeigen, dass es wesentlich ist, dass der Metallschirm das Kabel vollständig umschliesst.

Wird nämlich nur die obere oder nur die untere Schale des Zores-Kanals verlegt und elektrisch durchverbunden, so tritt im Gegensatz zum vollen Zoreskanal nach Fig. 18 keine Stromverdrängung auf. Mit andern Worten heisst dies, dass weitaus die beste Schutzwirkung durch den das Kabel umschliessenden Faradaykäfig erhalten wird.

Das Verhalten der beiden untersuchten Spezialkabel (Fig. 16 und 17) für kleine Längsspannung ist in den Fig. 27 und 28 dargestellt. Der Aufwand ist mit 7,7 bzw. 4,5 kg/m kleiner als beim Zoreskanal.

Die Längsspannungen erreichen vor allem beim schwereren Kabel noch wesentlich tiefere Werte als beim Zoreskanal. Bei leichteren Spezialkabeln (Fig. 17) besteht ein grosser Unterschied zwischen kurzem und langem Stoss: Beim kurzen Stoss sind die Längsspannungen extrem klein, beim langen werden sie bereits etwa gleich gross wie mit dem Zoreskanal. Die Ursache

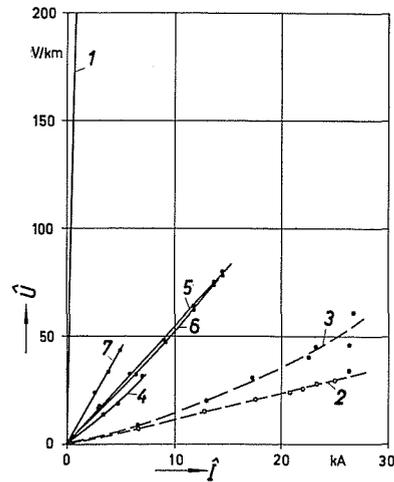


Fig. 27

Längsspannung \hat{U} des Spezialkabels II, Aufbau nach Fig. 16 (siehe auch Tabelle I, Nr. 1)

1 Gleichstrom; 2 und 3 Stoss 9 | 20 μ s; 4 Stoss 88 | 185 μ s; 5 und 6 Stoss 95 | 210 μ s; 7 Stoss 280 | 560 μ s

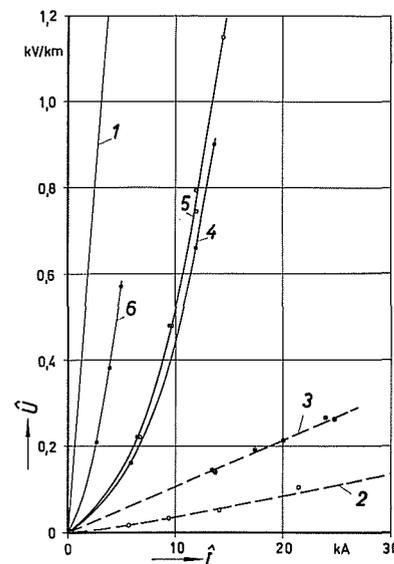


Fig. 28

Längsspannung \hat{U} des Spezialkabels I, Aufbau nach Fig. 17 (siehe auch Tabelle I, Nr. 2)

1 Gleichstrom; 2 und 3 Stoss 8 | 18 μ s; 4 Stoss 98 | 220 μ s; 5 Stoss 95 | 215 μ s; 6 Stoss 260 | 580 μ s

ist klar ersichtlich; je grösser der Eisenquerschnitt des Stromverdrängungsmantels, desto grösser ist die Mantelstromstärke, die bei der Sättigung eintritt.

Mit der Sättigung verschwindet die günstige Wirkung des Eisens mehr und mehr, bis im Grenzfall der Kopplungswiderstand nicht mehr tiefer ist als der Mantelwiderstand bei Gleichstrom.

Schliesslich zeigten die Messungen auch den Einfluss der *Remanenz des Eisens* im Kabelmantel. Der Effekt entspricht durchaus demjenigen beim Schalten leerlaufender Transformatoren, indem bei der ungünstigen Polarität der Remanenz das Eisen bereits bei einem kleinen Magnetisierungsstrom in das Sättigungsgebiet gelangt. Ein quantitativer Unterschied besteht lediglich in der Eisenqualität bei Transformatorenblech und bei Kabelarmierungen. Der Effekt muss bei der Konstruktion von Spezialkabeln beachtet werden.

5. Verhalten der Kabel bei Erdschlüssen auf Höchstspannungsleitungen

Bei Erdschlüssen auf benachbarten Hochspannungsleitungen können in Fernmeldeleitungen unter ungünstigen Verhältnissen Spannungen von mehreren Tausend Volt induziert werden. Es ist dabei gleichgültig, ob sich die Leitung über oder unter der Erdoberfläche befindet. Hat das beeinflusste Kabel einen metallischen, leitenden Schirm, so ist der Spannungsabfall auf der Innenseite des Mantels gleich der Längsspannung. Das Verhältnis der Spannung, die im Innern eines Kabels auftritt (Längsspannung), zu der Spannung in einer Freileitungsschleife mit Erdrückleitung wird als Reduktionsfaktor bezeichnet. Der Reduktionsfaktor ist umso kleiner (also günstiger), je kleiner der Kopplungswiderstand R_K des Mantels und je grösser die Induktivität des Mantels mit seiner Rückleitung durch die Erde ist. Diese kann durch eine Bandarmierung stark erhöht werden. Der Reduktionsfaktor wird dann aber abhängig vom durchfliessenden Strom oder auch von der induzierten Spannung, da der Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke und Induktion nicht linear ist. Bei Eisenkanälen, deren Teilstücke durch Verbinder mit vernachlässigbarem Widerstand unter sich verbunden sind, (Zoreskanäle mit Stossverbindern) und bei Kabeln mit geschichtetem Aufbau mit viel Eisen kann sich die Stromverdrängung sehr günstig auswirken.

Trotzdem das Verhalten der Kabelmäntel bei 50 Hz nicht zum Thema dieser Arbeit gehört, wird das Prinzip der Reduktionsformmessung (Fig. 29) und der Reduktionsfaktor einiger Kabeltypen in Funktion der induzierten Spannung pro km bei 50 Hz angeführt (Fig. 30, 31).

Bei Kabeln mit Eisenarmierung hängt der Reduktionsfaktor mehr oder weniger stark von der auf die Länge bezogenen in-

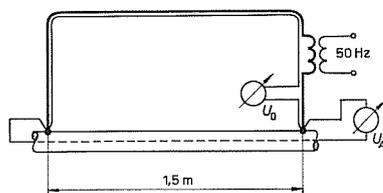


Fig. 29
Principalschaltbild für die Messung des Reduktionsfaktors r_K
 \hat{U}_0 Mantelspannung; \hat{U}_A Aderspannung

$$r_K = \frac{U_A}{U_0} = \frac{R_K}{\sqrt{R_K^2 + \omega^2 L^2}}$$

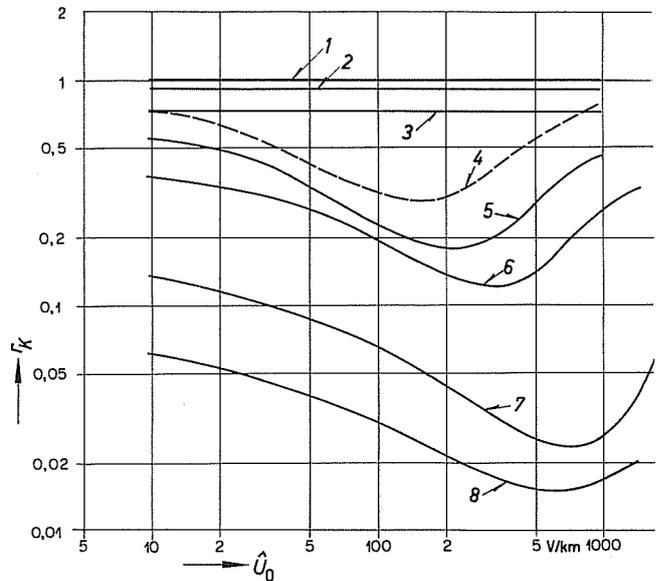


Fig. 30
Reduktionsfaktor r_K in Funktion der induzierten Spannung \hat{U}_0 pro km bei 50 Hz
1 PVC mit Cu-Band; 2 Blei; 3 Cu-Wellmantel; 4 Blei, bandarmiert «C»; 5 Blei, band- und flachdrahtarmiert «CF»; 6 Spezialkabel «I»; 7 Spezialkabel «II»; 8 Zoreskanal Nr. 4 mit widerstandsfreien Stossverbindern

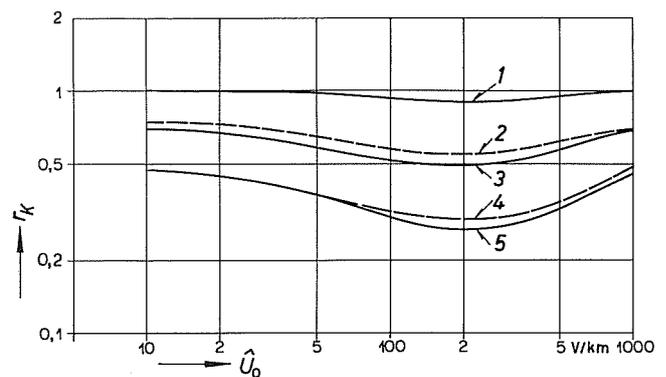


Fig. 31
Reduktionsfaktor r_K in Funktion der induzierten Spannung \hat{U}_0 pro km bei 50 Hz für übliche Papierbleikabel
1 Stahlwell; 2 Blei, runddrahtarmiert «R»; 3 Blei, flachdrahtarmiert «F»; 4 Blei, 2 × Runddraht «RR»; 5 Blei, 2 × Flachdraht «FF»

duzierten Spannung ab. Es ist relativ einfach, ein Kabel mit einem guten Reduktionsfaktor bei einer induzierten Spannung von 200...300 V/km herzustellen; der Aufwand wächst aber sehr stark, wenn es sich um eine Spannung von 1000 V/km handelt. Der Reduktionsfaktor wird natürlich nicht nur bei induktiver Beeinflussung, sondern auch beim Überbrücken irgendwelcher Spannungen im Boden, z. B. bei einer Kraftwerkeinführung, wirksam.

Der Vergleich zeigt, dass Kabel mit einem kleinen Mantelwiderstand im allgemeinen auch einen günstigen Reduktionsfaktor aufweisen. Umgekehrt hat ein kleiner Reduktionsfaktor nicht unbedingt eine hohe Blitzsicherheit zur Folge. Dies kommt davon, dass bei der Blitzgefährdung der dem Kabelmantel eingepreßte Strom gegeben ist, bei der Induktionsgefährdung dagegen die in der Schleife Kabel-Erde induzierte Spannung. Da die Gefährdung des Kabels stets vom Mantelstrom abhängt, kann eine hohe Mantelimpedanz gegenüber induzierten Spannungen nützen, weil sie den Mantelstrom re-

duziert. Beim Blitzeinschlag dagegen fließt zunächst der volle Blitzstrom durch den Kabelmantel.

6. Stossfestigkeit des Thermoplastmantels

Zum Schutz des Kabelmantels gegen Korrosion dient der Kunststoffmantel zwischen der Flachdrahtarmierung und dem Bleimantel. Wie bereits im Abschnitt 2.2 erwähnt wurde, muss die Stossdurchschlagfestigkeit U_D der Isolationshülle folgender Beanspruchung genügen:

$$U_D > \frac{I}{2} \cdot \frac{R}{2}$$

Die Widerstandsfähigkeit der Schutzhülle gegenüber Stossbeanspruchung (Welle 1/50 μ s) wurde an 5 m langen Kabelstücken geprüft. Die Prüflinge hatten folgenden Aufbau:

Über dem Bleimantel vom Durchmesser d_i nach Tabelle II wird der Thermoplastmantel von der gewünschten Dicke δ aufgespresst. Das Halbleiterband über dem Kunststoffmantel verhindert Entladungen zwischen der Isolationschicht und dem Erdbelag (Durchmesser d_a).

Einfluss der Kabelmasse auf die Feldstärke

Tabelle II

Bleimantel-durchmesser d_i mm	Dicke des Thermoplast-mantels δ mm	Durchmesser der Isolationschicht und des Erdbelages d_a mm	Feldstärke $\frac{E_{max}}{E_{med}}$
21	1,3	24,1	1,08
45	1,8	49,1	1,03
60	2,5	65,5	1,02

Das Verhältnis der maximalen Feldstärke E_{max} am Bleimantel zur mittleren Feldstärke E_{med} folgt aus der Beziehung:

$$\frac{E_{max}}{E_{med}} = \frac{\delta}{r_i \ln \left(\frac{r_i + \delta}{r_i} \right)} \quad (10)$$

$2r_i$ Durchmesser über dem Bleimantel; δ Isolationsdicke.

Zur Entlastung der elektrisch stärker beanspruchten Randpartien dient der gewickelte Konus aus Kunststoffbändern (Fig. 32). Längsüberschläge vom Erdbelag zum Bleimantel werden bei der Prüfung durch das Eintauchen der Endabschlüsse in Öl verhindert.

Die Stossversuche wurden jeweils mit einem Spannungswert begonnen, der einer mittleren Feldstärke $E_{med} = 25$ kV/mm entsprach. Die Spannungssteigerung um 20 kV erfolgte nach der Beanspruchung des Prüflings mit 10 Stößen positiver und negativer Polarität. Eine Abhängigkeit der Stossdurchschlagsspannung von der Polarität war nicht feststellbar. Die Fig. 33,34 zeigen den Verlauf der Durchschlagsspannung in Funktion der Isolationsdicke für gebräuchliche PVC- und Polyäthylen (PE)-Kabelisolationen.

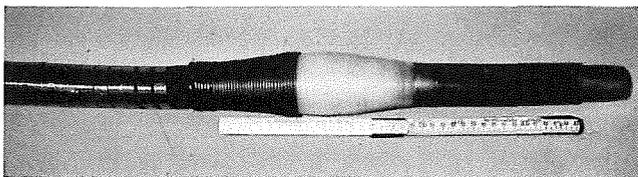


Fig. 32
Endabschluss, der Längsüberschläge vom Erdbelag zum Bleimantel verhindern soll

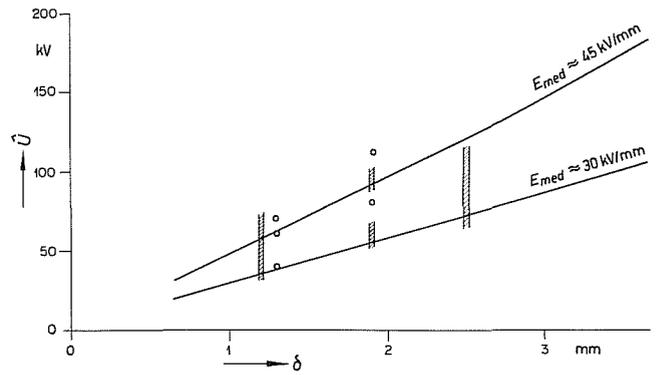


Fig. 33
Stossdurchschlagsspannung U in Funktion der Isolationsdicke δ einer normalen PVC-Kabelmischung
Stossweite 1/50 μ s

Aus den Abbildungen tritt deutlich die starke Streuung der Durchschlagswerte für ungeschichtete Kunststoffe in Erscheinung. Auf Grund dieser Messungen genügt in der Regel eine 3 mm dicke PE-Isolation, um eine Stossfestigkeit von 100 kV zu erreichen.

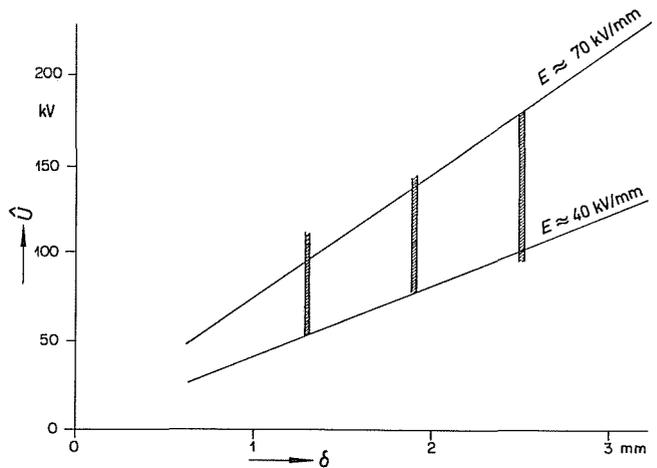


Fig. 34
Stossdurchschlagsspannung U in Funktion der Isolationsdicke δ eines gebräuchlichen Polyäthylenmantels
Stossweite 1/50 μ s

7. Massnahmen zur Erhöhung der Blitzsicherheit von Telefon- und Signalkabeln

7.1 Allgemeines

Die grundsätzlichen Massnahmen zur Erhöhung der Blitzsicherheit in einem Kabel bestehen in einem kleinen Mantelwiderstand und einer hohen Isolationsfestigkeit. Beide Massnahmen tragen in gleicher Weise zur Blitzsicherheit der Kabel bei.

Die bei einem Blitzeinschlag auftretende Spannung in einem Kabel zwischen Aderbündel und Mantel wird durch den Ohmschen Spannungsabfall des Blitzstromanteils auf der Innenseite des Mantels verursacht. Sie ist zunächst an der Einschlagstelle am grössten. Erfolgt dort ein Durchschlag, dann steigt die Spannung mit der Entfernung vom Durchschlagspunkt bis auf ein Maximum und sinkt dann mit grösserer Entfernung wieder. In grösseren Entfernungen von der Einschlagstelle können daher Sekundär-Durchschläge zwischen Adern und Mantel entstehen.

7.2 Kleiner Mantelwiderstand

Der nächstliegende Schutz des Kabels und der angeschlossenen Apparate besteht darin, dass man das Auftreten hoher Spannungen im Kabel vermeidet. Bei Papierkabeln sollten womöglich 1000 V zwischen benachbarten Aderpaaren nicht überschritten werden. Das dürfte auch die obere Grenze für Fernmeldeausrüstungen sein, an die keine besonderen Forderungen in Bezug auf Stossfestigkeit gestellt werden, die aber auch keine besonders empfindlichen Bauteile (z. B. Transistoren) enthalten.

Bei einem spezifischen Widerstand des Bodens von $15000 \Omega\text{m}$, einem Blitzstrom mit einer Amplitude von 50 kA und einer Halbwertzeit von $100 \mu\text{s}$ bedingt dies einen Kabelmantel mit einem Kopplungswiderstand von etwa $15 \text{ m}\Omega/\text{km}$. Mit normalen Kabelmänteln ist diese Lösung wirtschaftlich nicht tragbar. In solchen Fällen drängt sich daher eine Lösung mit einer verstärkten Isolation oder einem Kabel mit geschichtetem Aufbau auf.

7.3 Verstärkte Isolation und Überspannungsableiter

Der Durchschlag im Kabel kann durch eine entsprechende Gürtelisolation verhindert werden. Diese Methode bedingt jedoch folgende Massnahmen:

a) Um die angeschlossenen Anlageteile (Apparate, andere Kabel usw.) zu schützen, muss man zwischen den Adern und dem Kabelmantel Überspannungsableiter vorsehen.

b) Werden auf der Strecke einzelne Adern oder Gruppen von Adern herausgeführt (Fig. 35), wie dies z. B. bei den Teilnehmerkabeln der PTT und zum Teil auch bei Signalkabeln von Elektrizitätswerken der Fall ist, und nur diese Adern mit Überspannungsableitern geschützt, so würden die herausgeführten Adern beim Ansprechen der Überspannungsableiter mit dem Mantel verbunden. Sie würden gegen die durchgehenden, nicht geschützten Adern eine grosse Spannung erreichen, die zu Durchschlägen zwischen Adern führen. Darum muss man an jeder Abzweigstelle sämtliche Adern des Hauptkabels mit Überspannungsableitern ausrüsten oder die Isolation zwischen den Aderpaaren auf den Wert der Gürtelisolation erhöhen. Es ist selbstverständlich, dass die Spleissungen das gleiche Isolationsniveau erreichen müssen wie die Kabel.

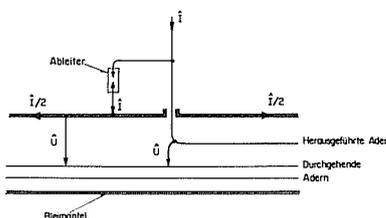


Fig. 35

Elektrische Beanspruchung der Ader- und Gürtelisolation für den Fall, dass herausgeführte Adern durch Überspannungsableiter geschützt werden

Überspannungsableiter sind ein ausgezeichnetes Mittel, um an einem bestimmten Punkt einer Anlage gefährliche Überspannungen zu vermeiden, also z. B. beim Übergang einer Freileitung auf ein Kabel oder an der Anschlußstelle eines Kabels hoher Spannungsfestigkeit an ein Normkabel oder an Apparate. Dabei ist natürlich entscheidend, dass die Stossansprechspannung der Ableiter mit der zu schützenden Isolation koordiniert ist, d. h. dass die Ansprechspannung der Überspannungsableiter tiefer liegt als die Durchschlagspannung zwischen zwei Adern.

Leider ist es nicht möglich, normale Kabel auf der ganzen Länge mit Überspannungsableitern zu schützen. Auch wenn der Einschlag zufällig an einer mit Überspannungsableitern ausgerüsteten Stelle erfolgt, kann trotzdem in einem Abstand wegen des Spannungsabfalles im Mantel gegenüber dem praktisch stromlosen Aderbündel wieder ein Durchschlag erfolgen. Der Abstand der Überspannungsableiter ist gegeben durch die Strecke, auf der die Längsspannung die Isolationsfestigkeit erreicht (s. 7.1). Mit Überspannungsableitern erreicht man den Schutz nur, wenn sie periodisch überprüft und defekte Überspannungsableiter rechtzeitig ausgewechselt werden.

7.4 Schutzdrähte

Eine wesentliche Reduktion der Längsspannung ist durch Schutzdrähte bei Stoss nicht zu erwarten, denn die Stromverteilung Kabelmantel-Schutzdraht ist durch die Impedanzen der einzelnen Stromkreise gegeben. Die Versuche unter Abschnitt 4 zeigen deutlich, dass durch das Parallelschalten eines 70 mm^2 Kupferseiles zum Bleimantel ($1,9 \Omega/\text{km}$) die Längsspannung bei Gleichstrom 8 mal kleiner ist, bei Stoss dagegen nur um 40% abnimmt. Eine stärkere Senkung der Längsspannung ist nur dann erreichbar, wenn das Kupfer des Schutzleiters unter oder über dem Bleimantel als Schirm verwendet wird (Herabsetzung des Mantel- bzw. Kopplungswiderstandes).

7.5 Zoreskanal

Trotzdem die Zoreskanäle nicht einen extrem tiefen Kopplungswiderstand aufweisen, werden sie von der PTT in blitzgefährdeten Gegenden mit Erfolg angewendet. Beim elektrisch durchverbundenen und mechanisch geschlossenen Zoreskanal ist die Längsspannung bei Stoßströmen 2...5 mal kleiner als bei Gleichstrom. Der Unterschied in den Wirkungen zwischen Zoreskanaltypen 4 und 5,2 bei Stoss ist klein. Die Vergleichsmessungen mit offenem und geschlossenem Zoreskanal zeigen sehr gut den Einfluss der Stromführung des Zoresmantels. Im magnetisch offenen Zoreskanal (Luftspalt sehr gross) wird die Längsspannung nie kleiner als der Gleichstromwert, d. h. hier ist keine Stromverdrängung durch magnetische Felder vorhanden.

Aus den Messungen folgt ferner, dass bis zu 30 kA (kurzer Stoss, keine Sättigung) bzw. 15 kA (langer Stoss) der elektrisch durchverbundene Zoreskanal sich günstiger als alle untersuchten Normkabel verhält.

Es versteht sich von selbst, dass die gute Schutzwirkung nur dann dauernd erreicht wird, wenn die Teilstücke des Zoreskanals in Längsrichtung mit Kupferverbindungen verschweisst werden. Fehlen oder korrodieren diese Verbindungen, so ist die Schutzwirkung in Frage gestellt. Hinsichtlich Korrosion der Zoresisen muss erwähnt werden, dass nach den Erfahrungen der letzten Jahrzehnte selten durchlöchernte Zoreskanäle anzutreffen sind.

Eine korrekte Verlegung der Zoreskanäle ist nur dann möglich, wenn der Boden des Kabelgrabens planiert ist. Aus diesem Grunde ist bei der Anwendung des Zoreskanals der Verlauf des Kabeltrasses und die Gesteinart von grosser Wichtigkeit, damit die Erdarbeiten nicht übermässige Kosten zur Folge haben.

7.6 Spezialkabel mit geschichtetem Aufbau

Es ist theoretisch möglich, Kabel mit geschichtetem Aufbau für jeden beliebigen Blitzstrom zu bauen, wobei der Materialaufwand für die Abschirmungen durch die geforderte Schutzwirkung gegeben ist. Praktisch besteht aus wirtschaftlichen Gründen natürlich eine gewisse Grenze. Der Aufbau kann bei gleicher Schutzwirkung stark variiert werden. Für Stoßströme mit Ladungen bis 10 C ist bei Kabeln mit nicht zu kleinem Durchmesser folgende Lösung wirtschaftlich:

Auf die Gürtelisolation wird ein dünner Kupferschirm aufgebracht, auf den eine mehrlagige Schicht von Eisenbändern gewickelt wird. Der darüberliegende Kabelmantel (Pb, Cu oder Al) soll einen sehr kleinen Längswiderstand aufweisen. Dieser Mantel wird durch einen Thermoplastmantel gegen Korrosion geschützt. Die zu äusserst aufgebrachte doppelte Flachdrahtarmierung muss so bemessen sein, dass sie den Blitzstrom vom

Einschlagspunkt bis zu den benachbarten Muffen ohne Durchschlag des Thermoplastmantels führen kann. Von dort an trägt sie zur Reduktion des Mantelwiderstandes bei und bildet zugleich einen thermischen Schutz bei direkten Einschlägen. Die feuerverzinkte Flachdrahtarmatur hält sich im Boden relativ gut, und da Kabel mit erhöhter Blitzsicherheit vorwiegend in trockenen, felsigen Gegenden verlegt werden, kann im allgemeinen auf einen zusätzlichen Korrosionsschutz (z. B. durch einen halbleitenden Thermoplasten) verzichtet werden.

Dank der grossen Reaktanz des innern Schirmes wird der grösste Teil des Stromes in den Kabelmantel verdrängt. Der kleine Magnetisierungsstrom im innern Schirm ergibt auch bei grossen Mantelströmen eine kleine Längsspannung. Der Längswiderstand der äussern Hülle und die Dicke der darunterliegenden Bandedeisenschicht müssen so aufeinander abgestimmt sein, dass bei der grössten angenommenen Beanspruchung (Scheitelwert und Dauer des Blitzstromes) die Sättigung des Eisens nicht erreicht wird.

7.7 Zusammenschalten verschiedener Kabeltypen

Wird ein Kabel mit geschichtetem Aufbau, in dem bei einem Blitzschlag nur eine kleine Längsspannung entstehen kann, mit einem Kabel normaler Ausführung verbunden, so kann das Spezialkabel bei einem Einschlag in ein Normalkabel ebenfalls zerstört werden, denn seine dielektrische Festigkeit ist ja nicht erhöht. Das Spezialkabel muss daher an der Verbindungsstelle mit Überspannungsableitern geschützt werden. Da es sehr problematisch ist, eine Kabelanlage in Teilstrecken mit unterschiedlicher Blitzgefährdung zu unterteilen, so wird der Ersatz kurzer Abschnitte eines blitzgefährdeten Kabels durch Spezialkabel kaum zu einer entscheidenden Verbesserung der Betriebssicherheit führen.

8. Empfehlungen für die Auswahl verschiedener Kabeltypen

Die Auswahl eines Kabeltyps für einen bestimmten Zweck richtet sich einerseits nach den zur Verfügung stehenden Kabeltypen, wie sie bereits beschrieben wurden, andererseits nach der verlangten Betriebssicherheit und der Bedeutung, die einem Kabeldefekt zukommt. Die Betriebssicherheit des Kabels hängt von dessen Konstruktion, von der Häufigkeit und der Intensität der Blitzeinschläge und der dadurch bewirkten Gefährdung des Kabels ab.

Der Aufwand für den Blitzschutz eines Kabels steht in direktem Zusammenhang mit der geforderten Betriebssicherheit und dem Standort der Kabelanlage. Beispielsweise ist im Mittelland die Blitzgefährdung so klein, dass ein Aufwand für den Blitzschutz wirtschaftlich nicht vertretbar ist. In Anlagen, in denen mit Blitzschäden gerechnet werden muss, sind Mehrkosten für eine erhöhte Blitzsicherheit gerechtfertigt. Ist die Reparatur mit aussergewöhnlichen Kosten verbunden (Betriebsunterbruch bei Reparatur eines Stollen-Kabels), so sind auch beträchtliche Mehraufwendungen ohne weiteres tragbar.

Die Gefährdung ist vor allem im Gebirge und in Gebieten mit schlecht leitendem Gestein gross. Die Verwendung von Spezialkabeln dürfte sich daher im allgemeinen auf diese Gegenden beschränken. Sofern Spezialkabel in Frage kommen, wird die günstigste Lösung zwischen folgenden Grenzfällen zu suchen sein:

- a) Kabel mit hoher Gürtelisolierung (Kunststoffisolierung) und reduziertem Mantelwiderstand;
- b) Kabel mit normaler Isolierung und besonders kleinem Mantelwiderstand bzw. Kopplungswiderstand (geschichteter Aufbau).
- c) Verlegung der Kabel in Zoreskanal mit Stossverbindern.

Im Fall a) muss der Einbau von Überspannungsableitern in allen Adern vorgesehen werden, während in Falle b) bis zu einer bestimmten Grenzstromstärke und Zeitdauer des Mantelstromes überhaupt keine gefährlichen Spannungen im Kabel auftreten können.

Wenn mehrere Kabel im gleichen Graben gegen Blitz geschützt werden müssen, ist es zweckmässig, sie in einen gemeinsamen Zoreskanal zu verlegen.

Auf Grund der Blitzmessungen auf dem Monte San Salvatore [8; 9] setzen sich in der Regel die negativen Blitze aus mehreren Teilblitzen zusammen, während der positive Blitz nur einen Teilblitz enthält. Die elektrische Beanspruchung der Kabel ist daher bei positiver Polarität bedeutend grösser als bei negativen Blitzen, bei denen sich die Ladung auf mehrere Teilblitze verteilt. An exponierten Punkten (Bergabhänge, Seen) sind nach den heutigen Untersuchungen direkte Einschläge in Kabel durch Blitze von positiver Polarität möglich. Da besonders im Gebirge die Blitzladung bedeutend höhere Werte erreichen kann als im Mittelland, sind Kabel, die zu diesen exponierten Punkten führen, am stärksten gefährdet. Es ist kaum möglich, den Schutz für die sehr selten auftretenden extremen Blitzentladungen durch einen geschichteten Aufbau des Mantels zu erzielen. Also ist es für diese Beanspruchung auch nicht möglich, das Auftreten jeder Überspannung in den Anlagen zu vermeiden.

Man muss sich also entscheiden, ob man bei äusserst selten auftretenden Beanspruchungen Schäden zulassen will oder ob dieses Risiko untragbar ist. Die PTT nimmt für ihre Anlagen eine Beschädigung für Stoßströme mit einer grösseren Amplitude als 50 kA bei einer Dauer von 100 μ s in Kauf. Da z. B. alle Sendeanlagen auf Bergen, für deren Anschluss solche Kabel oft verwendet werden, mit Erdnetzen ausgerüstet sind, übernimmt das Kabel bei Einschlag in das Kabelende nur einen Teilstrom. Man erwartet, dass in derartigen Anlagen in 20...30 Jahren mit einem Fehler zu rechnen ist.

Wie bereits erwähnt, sind grössere Mehrkosten für Stollenkabel tragbar. Damit eine Kabelstörung mit einer an Sicherheit grenzenden Wahrscheinlichkeit vermieden wird, ist es ratsam, die Adern gegen den Mantel auf alle Fälle für eine Stossspannung von 50...100 kV zu isolieren. Werden nun einzelne Adern unterwegs aus dem Kabel herausgeführt, z. B. zu Wasserfassungen oder Stollenfenstern, so ist an der Abzweigstelle das Hauptkabel zu unterbrechen und alle (auch die nicht benützten) Adern des Haupt- und Zweigkabels mit Überspannungsableitern auszurüsten. Auf diese Weise werden unzulässige Spannungen zwischen den schwächer isolierten Adern vermieden. Da nun aber eine derart extreme Beanspruchung in einer Kabelanlage äusserst selten, in vielen Fällen während der ganzen Lebensdauer nie auftreten wird, so ist eine Lösung wünschenswert, bei der für die relativ häufig auftretenden mittleren und kleineren Ströme im Kabel überhaupt keine nennenswerten Überspannungen auftreten können.

Diese Forderung führt zu einem Kabel mit geschichtetem Aufbau, das für einen Stoßstrom von 100 kA und 100 μ s Dauer dimensioniert ist (Bündelisolierung 50...100 kV). Daneben besteht natürlich auch die Möglichkeit, ein Kabel von Typ a) anzuwenden. Man nimmt dann bewusst hohe Spannungen in Kauf, denen aber das Kabel gewachsen ist. Ihre Auswirkungen auf die angeschlossenen Apparate verhindert man mit Überspannungsableitern, die dann auch schon bei relativ kleinen Mantelströmen ansprechen.

Die Bedeutung eines Defektes ist eine Ermessensfrage, die vom Besteller des Kabels zu beurteilen ist. Dieser wird sich beim Entscheid über den für den Blitzschutz zu treffenden Aufwand von der geforderten Betriebssicherheit und den bei einer Reparatur entstehenden Kosten leiten lassen. Lediglich als Richtlinie mag folgende Darstellung gelten, welche einige Fälle im Sinne abnehmender Bedeutung eines Defektes enthält:

- a) Stollenkabel von Kraftwerken;
- b) Steuer- und Fernmeldekabel von Kraftwerken;
- c) Steuer- und Fernmeldekabel von Sendeanlagen und andere wichtige Nachrichtenkel im Gebirge;
- d) Bezirks- und Ortskabel im Gebirge;
- e) Bezirks- und Ortskabel im Tiefland.

Literatur

- [1] *W. C. Royal*: Modified Tape Armor and Lepeth Sheath Cable. Bell. Lab. Rec. 28(1950)6, S. 241...244.
- [2] *D. W. Bodle*: Crushing of Buried Cable by "Cold" Lightning. Bell. Lab. Rec. 34(1956)3, S. 93...97.

- [3] *H. Meister*: Blitzschutz und Telephonanlagen. Techn. Mitt. PTT 36(1958)1, S. 13...32.
- [4] *E. Popp* und *E. Schulz*: Blitzfeste Nachrichtenkel für Funktürme. Siemens Z. 37(1963)3, S. 166...170.
- [5] *W. Wild*: Der Schutz selbsttragender Luftkel gegen Beschädigung durch Blitzschlag. VDE-Berichte 10(1938)–, S. 177...179.
- [6] *K. Berger*: Blitzsichere Schwachstromkel. Bull. SEV 53(1962)3, S. 101...105.
- [7] *E. D. Sunde*: Earth Conduction Effects in Transmission Systems. Van Nostrand New York 1949.
- [8] *K. Berger*: Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1947...1954 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 46(1955)5 und 9.
- [9] *K. Berger* und *E. Vogelsanger*: Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 56(1965)1, S. 2...22.

Adressen der Autoren:

Prof. Dr. *K. Berger*, Versuchsleiter der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen, Seefeldstrasse 301, 8008 Zürich; *H. Meister*, Techn. Beamter, Abt. Forschung und Versuche der Generaldirektion der PTT, Speichergasse 6, 3000 Bern; *G. Martin*, S. A. des Câbleries et Tréfileries de Cossonay, 1303 Cossonay; *G. de Montmolin*, Société d'Exploitation des Câbles Electriques, 2016 Cortaillod; Dr. *G. Weissenberger*, Kabelwerke Brugg AG, 5200 Brugg.