

Zeitschrift:	Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri
Herausgeber:	Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe
Band:	47 (1969)
Heft:	1
Artikel:	Verhalten von Kabeln mit geschichtetem Aufbau bei Stossströmen
Autor:	Meister, Hans / Utz, W.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-874054

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: 14.02.2026

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

Verhalten von Kabeln mit geschichtetem Aufbau bei Stossströmen

Hans MEISTER und Willy UTZ, Bern

621.315.223:551.594.221

Zusammenfassung: In Gebieten mit hoher Blitzgefährdung werden Kabel benötigt, bei denen hohe Stossströme im Mantel nur kleine Längsspannungen bewirken. Der geschichtete Aufbau eines Kabelmantels, unter Verwendung ferromagnetischer Werkstoffe, erlaubt kleine Kopplungsimpedanzen des Mantels bei erträglichem Materialaufwand. Die Autoren zeigen einen Weg zur näherungsweisen Berechnung dieser Kabel und beschreiben Ergebnisse von Messungen an ausgeführten Anlagen.

Comportement des câbles avec gaine structurée en couches sous l'action des courants de choc

Résumé. Dans les régions fortement exposées aux coups de foudre, les courants de choc ne doivent produire dans la gaine des câbles que de faibles tensions longitudinales. La structure en couches de la gaine, avec emploi de matières ferromagnétiques, permet d'obtenir de faibles impédances de couplage de la gaine, sans utilisation exagérée de matière. Les auteurs indiquent un moyen de calculer approximativement les valeurs propres à ces câbles et publient les résultats de mesures exécutées sur des installations terminées.

Comportamento di cavi con rivestimenti a strati sotto l'influsso di sovrattensioni istantanee

Riassunto. Nelle regioni molto esposte ai pericoli delle scariche atmosferiche si devono impiegare cavi che, in caso di alte correnti impulsive, provochino solo piccole tensioni longitudinali. Il rivestimento del cavo con strati di materiale ferromagnetico permette di tenere bassa l'impedenza d'accoppiamento della guaina pur mantenendo i costi del materiale entro limiti ragionevoli. Gli autori descrivono un procedimento che permette di calcolare approssimativamente il cavo e pubblicano i risultati delle misurazioni di impianti in opera.

1. Einleitung

In früheren Arbeiten wurde gezeigt, dass der Längswiderstand eines Kabelmantels bei einer gegebenen Isolationsfestigkeit des Kabels einen bestimmten Wert nicht überschreiten darf, falls dieses einem Blitz von gegebener Amplitude und Halbwertzeit standhalten soll. Dabei ist die Bodenleitfähigkeit ein wesentliches Bestimmungselement. So entsteht zum Beispiel bei einem spezifischen Widerstand des Bodens von $10\,000\,\Omega\text{m}$ in einem Kabel mit einem Mantel von $1\,\Omega/\text{km}$ beim Einschlag eines Blitzes von $50\,\text{kA}$ Amplitude und $50\,\mu\text{s}$ Halbwertszeit in das Kabelende eine Spannung von über $30\,\text{kV}$ zwischen Mantel und Adern [1].

Man kann nun das Bündel des Kabels gegen den Mantel für diese Spannung isolieren [2]. Schwierigkeiten sind aber in den Spleißen und an den Kabelköpfen zu erwarten. Auch kann diese Spannung für die angeschlossenen Apparate nicht zugelassen werden; es müssten dort entweder Schutzübertrager oder dann Ableiter eingebaut werden. Bei einem Kabel ohne Abzweige sind diese Probleme allenfalls noch lösbar, wenn es auch nicht einfach ist, in einem Fernmeldekabel Spannungen von einigen $10\,\text{kV}$ zu beherrschen. Sobald aber unterwegs einzelne Paare abgezweigt werden, wie dies bei jedem Teilnehmerkabel der Fall ist, tritt die erwähnte Spannung zwischen den einzelnen Aderpaaren auf, falls nicht bei jedem Abzweig auch alle durchgehenden Adern mit Ableitern ausgerüstet werden.

Will man nun unter den genannten Bedingungen eine maximale Spannung von $1\,\text{kV}$ zulassen (was zwischen den Adern noch toleriert werden könnte), so muss der Mantel einen Längswiderstand von $30\,\text{m}\Omega/\text{km}$ haben, was einem Kupferquerschnitt von $585\,\text{mm}^2$ entspricht, das heisst $5,2\,\text{kg/m}$. Auch bei Aluminium ($935\,\text{mm}^2$, $2,5\,\text{kg/m}$) ergibt

sich eine unmögliche Konstruktion. Der Gedanke an ein Kabel mit kleinerem Aufwand, das wohl einen höheren Gleichstromwiderstand hat, sich aber trotzdem bei Stossströmen günstig verhält, ist deshalb naheliegend und zeigte sich schon 1938 [3].

Im Jahre 1957 wurde vom erstzitierten Verfasser das Verhalten von Kabeln mit kombinierter Band- und Flachdrahtarmierung bei Stossströmen untersucht [1], aber erst in den Jahren 1960/61 war man nach einem starken Ansteigen der Quote der Blitzfehler bereit, die Mehrkosten für einen Schutz exponierter Anlagen zu tragen und die Arbeiten an Kabel mit geschichtetem Aufbau wieder aufzunehmen [4, 5]. Die erste Versuchsausführung eines solchen Kabels mit Innenarmierung wurde im Jahre 1960 von der Abteilung Forschung und Versuche beim Kabelwerk Brugg bestellt.

2. Grundsätzliche Arbeitsweise des geschichteten Aufbaus

Zunächst sei die Wirkung einer geschichteten Armierung einfach geschildert: Durch einen Leiter A mit einem Widerstand von $0,3\,\Omega/\text{km}$ fliesset ein Strom i_1 von $100\,\text{kA}$. Er bewirkt auf jedem Meter Länge einen Spannungsabfall von $30\,\text{V}$, auf $1\,\text{km}$ also $30\,\text{kV}$. Stellen wir uns diesen Leiter als Rohr vor (Kabelmantel), so tritt im Innern kein magnetisches Feld auf, der genannte Spannungsabfall wirkt also auf die Adern als Längsspannung. Nun stellen wir neben den Leiter A einen Eisenkern und führen einen Leiter B durch dessen Fenster (Fig. 1). Ohne den Leiter C wird die Spannung u_2 gleich der Spannung u_1 sein, denn durch das Fenster des Kerns fliesset in keinem Leiter Strom, der Kern wird nicht magnetisiert und hat deshalb keine Wirkung.

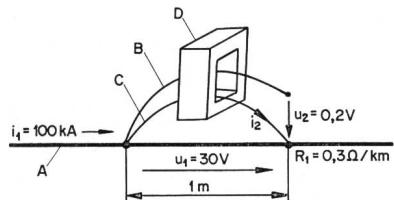


Fig. 1

Arbeitsprinzip der Kabel mit geschichtetem Aufbau
 A: äusserer Schirm (FF-Armierung und Bleimantel); B: Aderbündel;
 C: innerer Schirm (Cu-Bänder); D: Bandeseisenwinkel

(Wir vernachlässigen hier allerdings den induktiven Spannungsabfall im Leiter A, der vom Feld in der Schleife zwischen A und B herröhrt. In Wirklichkeit tritt er aber durch den später beschriebenen koaxialen Aufbau auch nicht auf.)

Bringen wir nun noch den Leiter C an, so fliesst in diesem ein Strom i_2 , der wegen der durch den Eisenkern bedingten, verhältnismässig grossen Induktivität nur langsam ansteigt. Durch geeignete Dimensionierung kann man erreichen, dass beim Abklingen des Stossstromes i_1 der Strom i_2 weniger als 1% von i_1 beträgt. Die Spannung u_2 ist als Spannungsabfall von i_2 am Widerstand des Leiters C nur ein kleiner Bruchteil der Spannung u_1 .

Dieses Prinzip wird nun auf ein Kabel in folgender Art angewendet: Über dem Bündel, das in Figur 1 als Leiter B dargestellt ist, wird ein Schirm als Leiter C angebracht, dessen Widerstand mit etwa $2\ldots 3\Omega/km$ genügend klein ist.

Es genügen daher zwei gegensinnig gewickelte Kupferbänder von etwa 0,2 mm Dicke.

Als Eisenkern erhält das Kabel darüber einige Lagen dünnes Bandeisen, ausserhalb dessen der Leiter A folgt, der einen kleinen Widerstand haben muss. Er besteht normalerweise aus dem Kabelmantel und einer doppelten Flachdrahtarmierung. Bei diesem Kabel ist die Längsspannung im Innern, die die Isolationsfestigkeit der Leiter beansprucht, nur ein kleiner Bruchteil des Spannungsabfalls, den man mit einem auf dem Kabel aufliegenden Draht messen würde.

3. Berechnung der Kopplungsimpedanz

Das Verhältnis zwischen Längsspannung (Aderspannung) und Mantelstrom, also die Kopplungsimpedanz, lässt sich einfach berechnen, wenn man voraussetzt, dass die einzelnen Lagen des Eisenkerns voneinander isoliert sind und dass auch der ganze Kern mit den übrigen Teilen des Kabels nicht in leitender Verbindung steht. Wir setzen ebenfalls die in der Praxis zutreffende Tatsache voraus, dass i_2 sehr klein gegen i_1 ist. Wir erhalten dann für den Spannungsabfall im Längswiderstand des äussern Mantels (Fig. 2):

$$u_1 = i_1 r_1$$

Mit

$$i_2 = \int H dl = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} \pi D$$

erhalten wir den Spannungsabfall im innern der Leiter mit dem Widerstand r_2 bei einem Querschnitt A der Eisenbandarmierung:

$$u_2 = i_2 r_2 = r_2 \frac{\Phi \pi D}{\mu_0 \mu_r A} \quad (1)$$

Aus dem Induktionsgesetz ergibt sich ferner:

$$i_2 r_2 - u_1 = - \frac{d \Phi}{dt}$$

und mit den Voraussetzungen

$$i_2 \ll i_1$$

und

$$i_2 r_2 = u_2 \ll u_1$$

wird

$$\Phi = \int_0^\infty u_1 dt$$

$$\Phi = r_1 \int_0^\infty i_1 dt$$

Durch Einsetzen von (2) in (1) erhalten wir:

$$u_2 = r_1 r_2 \frac{\pi D}{\mu_0 \mu_r A} \int_0^\infty i_1 dt \quad (3)$$

Aus (3) ergibt sich, dass die Längsspannung im Kabel bei konstantem μ_r linear mit der Ladung des Stossstromes wächst und sich proportional dem Produkt der Widerstände und umgekehrt proportional dem Eisenquerschnitt verhält.

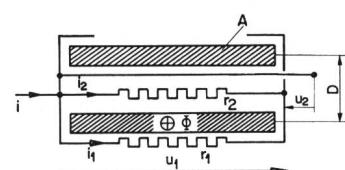


Fig. 2

Schematischer Aufbau des Kabels (s. Berechnung oben)
 r_1 : Widerstand des äussern Schirms; r_2 : Widerstand des inneren Schirms; u_1 : Spannungsabfall am äussern Schirm; u_2 : Längsspannung

D ist weitgehend durch den Aufbau des Bündels gegeben und daher kaum beeinflussbar.

Von grösserer Bedeutung für den Schutzwert des Kabels ist aber der Scheitelwert der Induktion, der durch (2) gegeben ist. Wir sehen, dass der Fluss im Eisen proportional dem Produkt von Längswiderstand des äussern Mantels r_1 und Ladung des Stossstromes ist. Da die Permeabilität bei Annäherung an die Sättigung des Eisens rasch sinkt, ist aus (2) erkennbar, dass ein Kabel mit geschichtetem Aufbau seinen hohen Schutzwert bis zu einer bestimmten Ladung des Stossstromes bewahrt, bei grösserer Ladung wird die Längsspannung verhältnismässig stark ansteigen. (2) zeigt uns aber auch, dass die Belastbarkeit dieses Kabels durch den Längswiderstand des äussern Mantels und den Eisenquerschnitt, das heisst die Dicke der Bandarmierung, gegeben ist.

In Wirklichkeit sind die Verhältnisse etwas komplizierter. Da die einzelnen Lagen des Bandeisenwendels nicht voneinander isoliert sind, sinkt wegen der beschränkten Eindringtiefe des Feldes die wirksame Permeabilität, was die Eigenschaften des Kabels verschlechtern würde. Nun ist aber das Bandeisenpaket in leitender Verbindung mit den übrigen Teilen des Kabelmantels. Es wird daher von einem Längstrom durchflossen und wirkt als allerdings unvollkommenes Eisenrohr. Dieses hat aber wegen der kleinen Eindringtiefe des Längstromes eine kleine Kopplungsimpedanz, was die Eigenschaften des Kabels verbessert. Diese beiden Wirkungen kompensieren sich weitgehend, so dass die Berechnung nach dem vereinfachten Modell ein Resultat ergibt, das gar nicht schlecht mit den tatsächlich erreichten Werten übereinstimmt.

4. Aufbau des Kabels

Es besteht bei der Dimensionierung eines Kabels für eine bestimmte Nennbelastung eine gewisse Freiheit; so kann man den Aussenleiter mit einem sehr kleinen Widerstand ausbilden bei einem kleinen Materialaufwand an der Bandarmierung oder umgekehrt. Von grossem Einfluss auf den Aufbau des Kabels ist die Leitfähigkeit des verwendeten Mantelmaterials und der Durchmesser des zu schützenden Bündels.

4.1 Armierung gegen thermische Einwirkung

Der wasserdichte Mantel des Kabels muss unbedingt gegen das Durchschmelzen an der Ansatzstelle des Blitzes geschützt werden. Besonders wärmeempfindlich sind Bleimäntel, wobei sich eine Kunststoffhülle über dem Blei katastrophal auswirken kann, eine Ladung von weniger als 1 C genügt dann zum Durchschmelzen des Mantels [6]. In Gebieten mit schlechter Bodenleitfähigkeit kann ein Einschlag in einer Entfernung von weit über 100 m vom Kabel zum Durchschlag des Thermoplastüberzuges und

zum Durchschmelzen des darunterliegenden Bleimantels führen. Wenn auch Mäntel aus andern Metallen thermisch widerstandsfähiger sind, so kann auch bei diesen nicht auf einen thermischen Schutz verzichtet werden. Dazu eignet sich zum Beispiel Eisen sehr gut. Sein Schmelzpunkt liegt bei 1530° (Blei 327°), auch ist seine spezifische Wärme etwa 3,5mal grösser als die von Blei, so dass man als grobe Schätzung damit rechnen kann, dass Eisen thermisch etwa 15mal unempfindlicher ist als Blei; überdies würde sogar ein Loch in der Armierung die Betriebssicherheit des Kabels nicht beeinträchtigen, während ein durchgeschmolzener Kabelmantel zu einem Kabelfehler führt.

Man wird nun diese Eisenarmierung so ausbilden, dass sie mithilft, den Längswiderstand des Kabelmantels zu reduzieren, wozu aber nur eine Armierung aus Flach- oder Runddrähten, keinesfalls aber eine Bandarmierung mit kleiner Steigung in Frage kommt.

Eine sogenannte Zugarmierung aus Flach- oder Runddrähten hat einen gewissen Drall, der den Gleichstromwiderstand erhöht. Bedeutend ungünstiger wird aber durch den Drall die Impedanz bei Stossströmen beeinflusst. Man kann daher kaum darauf verzichten, eine doppelte Armierung mit gegenläufiger Steigung vorzusehen. Auch dann ist es zweckmässig, die Steigung möglichst gross zu wählen. Die Impedanz dieser Armierung bei Stossströmen ist das Resultat verschiedener, einander zum Teil entgegengewirkenden Einflüsse, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann. Im Rücken des Stosses kann man in erster Näherung mit dem Gleichstromwiderstand rechnen, in der Front kann die Impedanz wesentlich höher sein. Sie wird minimal, wenn die beiden Armierungen voneinander unterschiedliche, angepasste Steigungswinkel aufweisen.

Um zu verhindern, dass ein Durchschlag zwischen der Armierung und dem darunterliegenden Kabelaufbau auftritt, der zum Beispiel zu einem Eindrücken des Kabelmantels [1] oder zu dessen Durchbruch führen kann, bestehen zwei Möglichkeiten:

- Man sorgt für einen lückenlosen Kontakt.
- Man isoliert die Armierung durch einen Thermoplastmantel mit genügender dielektrischer Festigkeit gegen den darunterliegenden Kabelmantel.

Man wird im allgemeinen der zweiten Lösung den Vorzug geben, da eine durchgehende Verbindung gewisse Probleme für den Korrosionsschutz bringt. An allen Spleissungen wird die Armierung mit dem Kabelmantel verbunden, so dass die Isolation nur den Spannungsabfall des halben Blitzstromes über die halbe Spleisslänge aushalten muss, was ohne Schwierigkeiten erreicht werden kann. Dieses Problem verdient jedoch Beachtung bei sehr langen Luftkabeln.

Von der Spleissung an fliesst ein Teil des Mantelstromes auf die übrigen Teile der Kabelumhüllung, die Armierung

trägt jedoch weiterhin dazu bei, einen kleinen Längswiderstand des Mantels ausserhalb der Bandarmierung und damit eine hohe Sättigungsgrenze bei der Beanspruchung durch Blitzströme zu erreichen.

4.2 Innenarmierte Kabel

Bei grösseren Kabeldurchmessern hat der Kabelmantel an sich einen verhältnismässig kleinen Längswiderstand. Es ist dann zweckmässig, ihn zur Reduktion des Außenleiterwiderstandes mitzuverwenden, was bedingt, dass die Bandarmierung unter den Kabelmantel zu liegen kommt. Der Widerstand des Innenleiters darf ohne weiteres etwa 2Ω erreichen, was erlaubt, zwei gegensinnig gewickelte Cu-Bänder von $0,15\ldots 0,2$ mm Dicke zu verwenden, was fabrikatorisch einfacher ist als gestreckte Bänder oder Drähte, welche eine bessere Materialausnutzung erlauben würden.

Ein Kabel mit erhöhter Blitzsicherheit in innenarmierter Ausführung würde daher zum Beispiel etwa folgenden Aufbau (Fig. 3) zeigen:

- Bündel mit normaler Isolation
- 2 gegensinnig gewickelte Cu-Bänder 0,2 mm
- 6...8 Fe-Bänder 0,25 mm
- Kabelmantel (Pb, Al oder Cu)
- Spannungsfester Thermoplast-Korrosionsschutz (beispielsweise 2 mm)
- 2 gegensinnige Flachdraht-Armierungen («FF-Armierung»), verzinkt.

Je nach Durchmesser des Kabels, Material des Mantels und Nennbelastung des Kabels kann es nötig sein, zwischen Bandarmierung und Mantel einen zusätzlichen Leiter in Form von möglichst ohne Drall angebrachten Al- oder Cu-Drähten einzufügen.

Die Flachdrahtarmierung steht direkt mit dem Boden in Kontakt, was dem Blitzstrom ermöglicht, auf einer verhältnismässig kurzen Strecke das Kabel wieder zu verlassen und dazu beiträgt, die Längsspannung klein zu halten. Wie wir aus den Messresultaten sehen werden, wäre allerdings bei diesem Kabeltyp auch dann keine grosse Spannung zu erwarten, wenn der Blitzstrom über mehrere Kilometer Kabellänge fliessen würde, solange die Ladung des

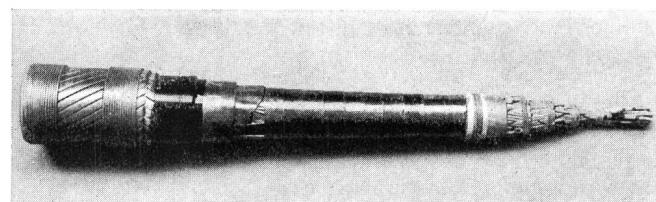


Fig. 3
Aufbau eines Kabels $100 \times 2 \times 0,8$ mm mit erhöhter Blitzsicherheit

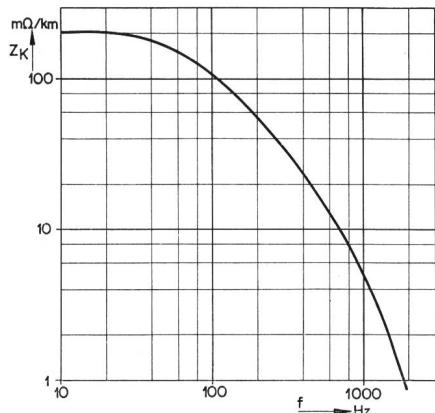


Fig. 4
Kopplungsimpedanz des Kabels nach Figur 3, bei Wechselstrom 10 A gemessen

Stossstromes innerhalb des Wertes bleibt, für den das Kabel dimensioniert wurde, also innerhalb der Nennbeanspruchung. Wird dieser Wert wesentlich überschritten, so steigt allerdings die Längsspannung innerhalb des übersättigten Abschnittes stark an. Durch einen guten Kontakt zwischen Kabel und Boden kann man nun die übersättigte Länge klein halten, so dass das Kabel im praktischen Einsatz Beanspruchungen erträgt, die wesentlich über dem Knick der $Z_K = f(Q)$ -Kennlinie liegen.

Die äussere Armierung ist natürlich der Korrosion ausgesetzt, doch wird sie durch eine Feuerverzinkung ausreichend gegen die in blitzgefährdeten Gebieten meist mässige Korrosionsgefahr geschützt. Liegt das Kabel aber teilweise in Sumpfgebiet, so wäre in den gefährdeten Zonen eine Umhüllung der Armierung durch einen leitenden Thermoplastmantel empfehlenswert. Das Problem der Alterung dieser Mäntel durch die Einwirkung von Gleichspannungen (starker Anstieg des Widerstandes) scheint allerdings noch nicht völlig geklärt.

Besondere Sorgfalt ist darauf zu verwenden, dass der Füllfaktor der Bandeisenarmierung möglichst hoch wird. Durch paarweise Wicklung der Bänder lässt sich erreichen, dass an jedem Punkt wenigstens die Hälfte der Bänder vorhanden ist. Die Bedeutung des Füllfaktors zeigt sich darin, dass bei einer Wicklung mit 6 Bändern bei $F = 0,75$ an 40% des Querschnittes nur 4 Bänder vorhanden sind und an 12% sogar nur noch 3, während bei $F = 0,95$ die entsprechenden Zahlen um 2,5% und < 0,5% liegen, so dass dann der Sättigungseinsatz praktisch durch den 5 Bändern entsprechenden Querschnitt bestimmt wird (gegenüber 3 bei $F = 0,75$).

4.3 Aussenarmierte Kabel

Der Mantel von Kabeln mit kleinem Bündeldurchmesser hat einen derartigen Widerstand, dass er zur Verringerung des Aussenleiterwiderstandes nicht mehr viel beitragen würde. Es lohnt sich in diesem Fall nicht mehr, die Bandarmierung unter dem Kabelmantel anzubringen.

Es kann dann (besonders bei Bleimantelkabeln) zweckmässiger sein, das Bündel mit einem normalen Mantel zu versehen, darauf eine Bandarmierung mit verhältnismässig dünnen Bändern zu wickeln und über dieser den niederohmigen Aussenleiter anzubringen. Dieser besteht aus einem ausreichenden Querschnitt eines guten Leiters in Form von Al- oder Cu-Drähten, einem spannungsfesten Thermoplast-Korrosionsschutzmantel darüber und einer doppelten Flach- oder Runddrahtarmierung als äusseren Abschluss. Man verhindert so eine Elementbildung der Al- oder Cu-Drähte mit der Aussenarmierung. Bei bescheideneren Ansprüchen an die Belastungsgrenze kann unter Umständen auf einen zusätzlichen Cu- oder Al-Querschnitt verzichtet werden. Dann ist es auch möglich, in nicht besonders korrosionsgefährdeten Gebieten den Thermoplastmantel wegzulassen, da durch die verzinkte FF-Armierung auch die Bandarmierung kathodisch geschützt wird. Allerdings ist dann auch eine Verzinkung der beiden äussersten Eisenbänder ratsam.

Mit der Aussenarmierung verhindert man auch eine Gefährdung des mechanisch empfindlichen dünnen Aderbündels beim Aufwickeln der Bandarmierung. (Die elektrischen Eigenschaften von Aderbündeln mit wenigstens 15...20 mm Durchmesser werden durch die Bewicklung mit Stahlbändern von 0,25 mm Dicke nicht beeinflusst.)

5. Messergebnisse

5.1 Messtechnik

Da die Kabel nichtlineares Verhalten zeigen, müssen sie bei der interessierenden Belastung gemessen werden, man benötigt also einen Stossgenerator mit ausreichender Ladung. Falls man darauf verzichtet, mit aperiodischen Stössen zu arbeiten, sondern einen Stossstrom in der Form einer gedämpften Schwingung zulässt, so lassen sich die Kabel mit annähernd dem doppelten Wert der im Stosskondensator gespeicherten Ladung prüfen. Da die Längsspannung in einem Kabel mit geschichtetem Aufbau praktisch nur von der Ladung und nur sehr wenig vom zeitlichen Verlauf des Stossstromes abhängt, lässt sich die Kopplungsimpedanz des Kabels durch Auswerten des Maximalwertes der Spannung gut bestimmen.

Der für diese Messungen verwendete Stossgenerator hat eine Kapazität von $434 \mu\text{F}$, sie kann auf 9 kV aufgeladen werden und speichert daher eine Ladung von $3,9 \text{ C}$; bei Messungen mit gedämpften Schwingungen können etwa

$7,5 \text{ C}$ erreicht werden. Spannung und Kapazität sind so aufeinander abgestimmt, dass an Kabeln von 5 m Länge Ströme von etwa $80\ldots100 \text{ kA}$ Scheitelwert erreicht werden können, was einer äquivalenten Dauer von $70\ldots90 \mu\text{s}$ entspricht. Für Versuche mit längeren Stößen werden Zusatzinduktivitäten verwendet.

Die Messung der Stossimpedanz dieser Kabel, die höchstens einige $\text{m}\Omega/\text{km}$ beträgt, erfordert eine besondere Sorgfalt. Es ist zweckmässig, die Längsspannung an Kabeln von wenigstens etwa 5 m Länge zu messen, die eine Kopplungsimpedanz von beispielsweise $5\ldots10 \mu\Omega$ aufweisen. Bei 50 kA sind dann 0,5 V Längsspannung zu erwarten, was dem Spannungsabfall des gleichen Stromes an 1 cm Länge des Bleimantels eines Kabels mit einem Längswiderstand von $0,5 \Omega/\text{km}$ (Durchmesser des Aderbündels etwa 50 mm) entspricht.

Der Oszilloskop für die Messung der Längsspannung muss über einen eingelöteten Koaxialstecker mit einem Koaxialkabel angeschlossen werden. Die Messungen erfordern also einige Vorsicht und Erfahrung. Der ganze Messaufbau einschliesslich des Oszilloskopfes muss darauf untersucht werden, dass bei den hohen Stossströmen keine Störspannungen in den Spannungsmesskreis eingekoppelt werden. Gewisse Oszilloskopfes sind auch empfindlich auf das starke Magnetfeld, das bei hohen Stossströmen entsteht. An die Bandbreite des Oszilloskopfes müssen im Gegensatz zu andern Stossmessungen keine besondern Anforderungen gestellt werden.

5.2 Eigenschaften ausgeführter Kabel

5.2.1 Innenarmierter Typ

Als Beispiel für Aufbau und Eigenschaften eines Kabels mit erhöhter Blitzsicherheit mit geschichtetem Aufbau sei herausgegriffen: Teilnehmerkabel $100 \times 2 \times 0,8 \text{ mm}$; Bündeldurchmesser 30 mm; Kabeldurchmesser 50 mm.

Aufbau:

– 2 Cu-Bänder	$2 \times 20 \times 0,2 \text{ mm}$
– 8 Fe-Bänder	$30 \times 0,25 \text{ mm}$
– 1 Lage Cu-Drähte	10 mm^2
– Bleimantel	$2,1 \text{ mm}$
– PVC-Mantel	$2,0 \text{ mm}$
– FF-Armierung	$1,2 \text{ mm}$

(Unter FF-Armierung versteht man eine doppelte, gegenläufige Flachdrahtarmierung mit verzinkten Eisendrähten $1,2 \times 5 \text{ mm}$.)

Eigenschaften:

Figur 5 zeigt die mit zwei verschiedenen Stossströmen gemessenen Kopplungsimpedanzen. Im Gebiet der höchsten Permeabilität werden folgende Werte erreicht:

$$\begin{aligned} \text{Äquivalente Stossdauer } 64 \mu\text{s } Z_K &= 0,9 \text{ m}\Omega/\text{km} \\ \text{Äquivalente Stossdauer } 275 \mu\text{s } Z_K &= 5,0 \text{ m}\Omega/\text{km} \end{aligned}$$

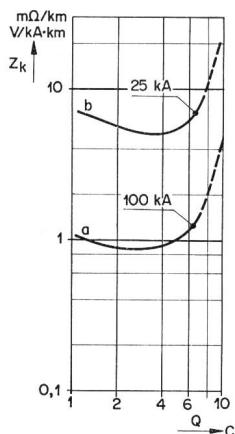


Fig. 5

Kopplungsimpedanz des Kabels nach Figur 3 bei Stossströmen (abklingende Schwingungen)
(a) $t_{aq} = 64 \mu s$ ($f = 5 \text{ kHz}$); (b) $t_{aq} = 275 \mu s$ ($f = 1,15 \text{ kHz}$)

(Als äquivalente Stossdauer wird die Ladung der ersten Halbwelle des Prüfstromes, dividiert durch den Scheitelwert, bezeichnet.)

Bei einer Ladung des Stossstromes von 7,5 C (entsprechend 115 kA Scheitelwert bei 65 μs oder 27 kA bei 275 μs) steigt die Kopplungsimpedanz etwa auf den doppelten Wert an. Damit würde ein Stossstrom von 115 kA ($t_{aq} = 65 \mu s$) eine Längsspannung von etwa 200 V erzeugen, wenn er ungeschwächt über einen ganzen km fliessen würde, was bei einem Erdkabel auch bei extrem schlechter Bodenleitfähigkeit nie auch nur angenähert der Fall ist. Erfolgt der Einschlag nicht in das Kabelende, so verteilt sich der Blitzstrom in beide Richtungen, so dass die genannten Spannungen bei 230 beziehungsweise 54 kA auftreten. Um eine einheitliche Sicherheit der ganzen Kabelanlage zu erreichen, wäre es daher angebracht, die Endlänge für die doppelte Ladung zu bemessen. Vielfach endet aber das Kabel in einer Anlage mit einem gut ausgebauten Erdungsnetz (Richtstrahl- oder Sendestation auf Bergen), das einen ansehnlichen Teil des Blitzstromes übernimmt, so dass in diesen Fällen darauf verzichtet werden kann.

Da es allein darauf ankommt, die in ein Kabel fliessende Ladung klein zu halten, schadet eine gewisse Restinduktivität des lokalen Erdungsnetzes, die während der steilen Stirn des Stossstromes hohe Spannungsspitzen zwischen Erdungsnetz und Bezugserde verursacht, nicht viel. Man darf daher in Gebieten mit schlechter Bodenleitfähigkeit ohne weiteres Erdbänder verwenden, die 100 m oder noch länger sind.

Unsere Messeinrichtung erlaubt nicht, die Kabel mit noch grösseren Ladungen zu testen; man kann aber die Kurve für die Kopplungsimpedanz über den Messbereich hinaus extrapoliieren und die Längsspannung bei höhern Stoss-

ladungen abschätzen. Berücksichtigt man, dass die Dämpfung des Stossstromes längs des Mantels eines Erdkabels verhältnismässig gross ist, so erkennt man, dass auch bei wesentlich grösseren Stossströmen das Kabel nur über eine kleine Länge im Sättigungsbereich arbeitet. Auch in diesem Bereich des steilen Anstieges der Kopplungsimpedanz verhält sich das Kabel noch rund eine Größenordnung günstiger als ein Kabel ohne geschichteten Aufbau mit demselben Gleichstromwiderstand. Die wirkliche Beanspruchung des Kabels darf daher viel höher sein als die für die Dimensionierung geltende Nennbelastung.

5.2.2 Aussenarmierter Typ

Das nachstehend beschriebene Kabel $40 \times 2 \times 1,0 \text{ mm}$ führt auf einen Felskopf von annähernd 2700 m ü. M. Es liegt neben einem 16-kV-Kabel; die Mäntel beider Kabel sind miteinander verbunden. Es ist also damit zu rechnen, dass jedes Kabel nur den halben Blitzstrom führt. Wir dimensionierten daher dieses Kabel nur für eine Ladung von 2,5 C. Für dieses verhältnismässig dünne Kabel und den reduzierten Schutz eignet sich ein Kabel mit Aussenarmierung besser. Es hat folgenden Aufbau:

– Bündeldurchmesser	25,5 mm
– Bleimantel	2,0 mm
– Jutepolster	
– Fe-Bänder	6 \times 0,25 mm
– Cu-Drähte 0,8 mm	27 mm^2
– PVC-Mantel	2,0 mm
– FF-Armierung	1,2 mm

Figur 6 zeigt das Beispiel eines Oszilloskopbildes, auf dem der Stossstrom als gedämpfte Schwingung ($f \approx 1,1 \text{ kHz}$,

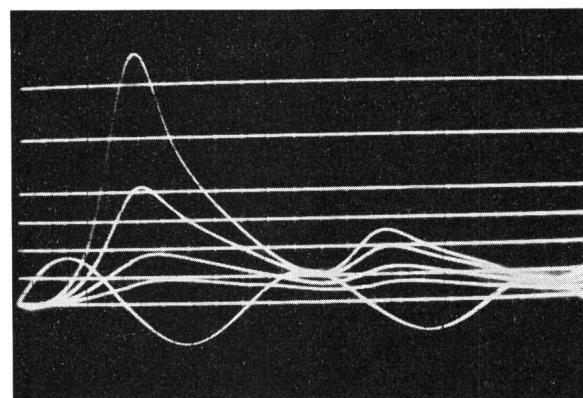


Fig. 6

Beispiel einer Kopplungsimpedanzmessung an einem Kabel $40 \times 2 \times 1 \text{ mm}$ (aussenarmiert, Nennbelastung 2,5 C)
i: Stossstrom ($t_{aq} = 293 \mu s$, $f = 1,1 \text{ kHz}$), gedämpfte Schwingung;
u: Längsspannung bei einem Scheitelwert des Stromes von 4,1/8,2/10,3/16,4 kA, entsprechend einer Ladung von $Q = 1,2 \dots 4,8 \text{ C}$; Kabellänge 5 m; Spannungseichung: 0/0,25/0,5/0,75/1,0/1,5/2,0 V

$t_{\text{aq}} \approx 300 \mu\text{s}$) mit den Längsspannungen bei vier verschiedenen Scheitelwerten übereinander aufgenommen sind. Man erkennt deutlich den Einsatz der Sättigung zwischen dem zweiten und dem dritten Wert des Stossstromes.

Die oszillographischen Messungen sind in *Figur 7* für Stossströme von unterschiedlicher Dauer ausgewertet. Der Anstieg der Kopplungsimpedanz setzt bei einer Ladung des Stossstromes von etwa 3 C ein (Nennwert 2,5 C).

6. Verwendung der Kabel

Blitzschäden an Kabelanlagen im Mittelland sind sehr selten; Massnahmen, die über die heute üblichen hinausgehen, lohnen sich nicht. Die Kabel mit erhöhter Blitzsicherheit werden nur in Gebieten mit hoher Blitzgefährdung verwendet; vorwiegend im Tessin und in Kabelanlagen für den Anschluss von Sendern auf exponierten Bergen. Diese Anlagen stellen aber nur einen sehr kleinen Bruchteil des gesamten Kabelnetzes dar, so dass die Mehrkosten erträglich sind. Man erreicht dafür eine sehr hohe Betriebssicherheit der Anlage, was sich auf die Unterhaltskosten günstig auswirkt.

Die Kabel mit geschichtetem Aufbau können auch für andere Fälle mit extremer elektrischer oder elektromagnetischer Beeinflussung verwendet werden, zum Beispiel wenn eine Anlage gegen sehr starke impulsartige magnetische Felder geschützt werden soll. Da die Sättigung des Eisens erst bei hohen Mantelströmen auftritt, zeichnen sich die Kabel auch durch einen sehr günstigen Reduktionsfaktor bei 50 Hz aus (*Fig. 8*). Wesentlich ist vor allem, dass der Anstieg des Reduktionsfaktors erst bei einer induzierten Spannung von etwa 1500 V/km einsetzt. Durch einen minimalen Mehraufwand (Verbesserung der Leitfähigkeit des

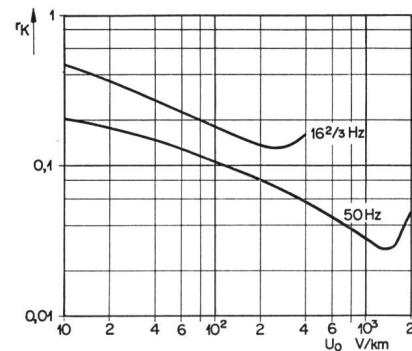


Fig. 8

Reduktionsfaktor des Kabels $100 \times 2 \times 0,8$ bei $16 \frac{2}{3}$ Hz und 50 Hz. Der Absolutwert des Reduktionsfaktors lässt sich mit kleinem Aufwand stark senken (besser leitender innerer Schirm). Beachtlich ist der hohe Sättigungseinsatz bei $U_0 > 1500$ V/km (50 Hz)

inneren Schirms) ist es möglich, den Reduktionsfaktor im ganzen Bereich noch wesentlich zu verbessern. Einen beträchtlichen Mehraufwand würde es aber erfordern, die Sättigungsgrenze zu erhöhen.

Bei der Anwendung der Kabel ist zu beachten, dass die hohe Sicherheit gegen Blitzströme ausschliesslich auf der kleinen Kopplungsimpedanz und nicht auf einem hohen Isolationspegel beruht. Das setzt voraus, dass überall beim Übergang auf Kabel mit normaler Ausführung und auf Freileitungen die herausgeführten Adern mit Ableitern versehen werden.

7. Eisenkanäle als Blitzschutz

Wenn mehrere Kabel im gleichen Graben verlegt werden (etwa Teilnehmerkabel mit Fern- und Bezirkskabel zusammen), so kann es wirtschaftlicher sein, an Stelle von Kabeln mit geschichtetem Aufbau einen Eisenkanal vorzusehen, in den die Kabel in normaler Ausführung gemeinsam verlegt werden. Unter der Voraussetzung, dass die Wandstärke des Kanals wenigstens 3,5 mm beträgt, ist die Kopplungsimpedanz bis zu Stossströmen mit einer Ladung von mehr als 10 C in der Grössenordnung von $1 \text{ m}\Omega/\text{km}$, falls die Fugen widerstandsfrei verschweisst sind. Meistens ist man aber aus bautechnischen Gründen gezwungen, Drahtverbinder zu verwenden. Lötet man diese beidseitig auf, so wird bei einer freien Länge von höchstens 50 mm und einem Drahtdurchmesser von 5 mm die Kopplungsimpedanz eines aus 6 m langen Teilstücken bestehenden Kanals etwa bei $10 \dots 15 \text{ m}\Omega/\text{km}$ liegen. Sehr wichtig ist es aber, bei den Spleiessungen eiserne Schutzmuffen zu verwenden, die ebenfalls über kurze Verbinder mit den Kanälen zusammen in den Strompfad des Blitzstromes einbezogen werden. Schon kurze Unterbrüche des Eisenkanals entwerten den

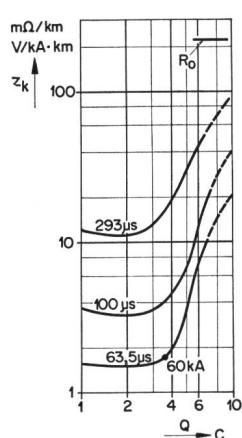


Fig. 9

Kopplungsimpedanz des Kabels $40 \times 2 \times 1,0 \text{ mm}$, 2,5 C-Typ, unter anderem Auswertung von *Figur 6*. R_0 : Gleichstromwiderstand

Blitzschutz der ganzen Anlage weitgehend, auch wenn diese durch Leiter mit grossem Querschnitt überbrückt werden.

Die Kopplungsimpedanz der Kanäle ist auch bei kurzen Verbindern bedeutend höher als die der Kabel mit geschichtetem Aufbau, hingegen liegt der Sättigungseinsatz bei Wandstärken von 3,5 mm höher als 10 C. Unsere Kabelschutzkanäle (Zoreskanäle) bilden daher bei sachgemäßem Bau und ausreichender Wandstärke (3,5 mm) einen sehr guten Blitzschutz für die Kabelanlagen. Vorzuziehen wären «Gasrohre», wie sie für Wasserversorgungen verwendet werden. Für sie bestehen aber in unserem Baumaterialsortiment keine Teile für Abzweigungen, auch ist die Reparatur von Kabeln in durchgehenden Rohren äusserst schwierig. (Ein Kabel kann auch ohne Einwirkung eines Blitzes schadhaft werden!) Die Verwendung von «Gasrohren» wird daher voraussichtlich auf Sonderzwecke – Schutz von Kabeln in Antennenmasten, Bachunterführungen usw. – beschränkt bleiben.

Werden im Zuge von blitzgeschützten Anlagen in eisernen Kabelkanälen mit Stossverbindungen Luftkabel zur Überquerung von Tobeln verwendet, so sind dazu Kabel mit

kleiner Kopplungsimpedanz (geschichtetem Aufbau) zu verwenden. Man muss sich jedoch bewusst sein, dass die Beanspruchung dieser Kabel durch das schlechteste Element – die Verbinder der Kanäle – bestimmt wird.

Bibliographie

- [1] *H. Meister*. Blitzschutz an Telephonanlagen. Techn. Mitt. PTT 36 (1958) Nr. 1, S. 13...32
- [2] *E. Popp* und *E. Schulz*. Blitzfeste Kabel für Funktürme. Siemens-Zeitschrift 37 (1963) Nr. 3, S. 166...170
- [3] *W. Wild*. Der Schutz selbsttragender Luftkabel gegen Beschädigung durch Blitzschlag. VDE-Berichte 10 (1938), S. 177-179
- [4] *K. Berger*. Blitzsichere Schwachstromkabel. Bull. SEV 53 (1962) Nr. 3, S. 101...105
- [5] *K. Berger*, *H. Meister*, *G. de Montmollin*, *G. Weissenberger*. Telephon- und Signalkabel mit erhöhter Blitzsicherheit. Bull. SEV 56 (1965) Nr. 13, S. 493...507
- [6] *H. Meister* und *W. Utz*. Wie brennt der Blitz Löcher in die Kabelbleimäntel? Techn. Mitt. PTT 45 (1967) Nr. 5, S. 269...275