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: 36 (1958)

Heft: 1

Artikel: Blitzschutz an Telephonanlagen = Protection des installations téléphoniques contre la foudre

Autor: Meister, Hans

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-874408

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: 09.01.2026

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

HANS MEISTER, Bern

Blitzschutz an Telephonanlagen

Protection des installations téléphoniques contre la foudre

621.316.98

Zusammenfassung. *Die Arbeit zeigt, auf welche Art die Blitzschäden an Telephonanlagen entstehen und welche Möglichkeiten gegeben sind, um sie zu verhüten. Sie will kein abschliessendes Bild über den ganzen Fragenkomplex geben, da sowohl in der Schweiz wie auch im Ausland die Arbeit weitergeführt wird. Der heutige Stand der Erkenntnis ermöglicht jedoch eine gute Beurteilung der Probleme des Blitzschutzes von Fernmeldeanlagen und zeigt auch, welcher Erfolg von den verschiedenen Schutzmassnahmen erwartet werden kann. Auf die Wiedergabe des mathematischen Teiles wird zugunsten der besseren Verständlichkeit für den Praktiker weitgehend verzichtet und dafür auf die einschlägige Literatur verwiesen.*

Résumé: *Le présent article montre de quelle façon la foudre endommage les installations téléphoniques et quelles sont les possibilités de les protéger. Il n'aspire pas à être un exposé définitif de l'ensemble d'une question aux aspects parfois complexes et dont l'étude se poursuit tant en Suisse qu'à l'étranger. Dans l'état actuel des connaissances, il est néanmoins possible d'apprécier correctement le problème de la protection d'installations de télécommunication ainsi que l'efficacité des divers dispositifs protecteurs disponibles. Afin de mieux répondre aux besoins des praticiens, l'auteur a renoncé à reproduire les développements mathématiques de base. Le lecteur que cette question intéresse trouvera les compléments nécessaires dans la littérature spécialisée.*

A. GRUNDLAGEN

1. Allgemeines, Eigenschaften der Blitzströme

Blitzströme mit Amplituden von 10...200 kA und Fernmeldeanlagen vertragen sich leider gegenseitig äusserst schlecht. Schon bald nach Einführung des Telegraphen versuchte man durch primitive Schutzeinrichtungen an den Leitungen die Gefahren für Menschen und Material zu vermindern. Während vieler Jahrzehnte wurden die Schutzmassnahmen mehr gefühlsmässig getroffen und im allgemeinen mit diesem Vorgehen noch zufriedenstellende Ergebnisse erzielt. Es zeigte sich jedoch, dass in gewissen Gebieten mit hoher Gewitterhäufigkeit und besonderen geologischen Verhältnissen das Ausmass an Betriebsunterbrechungen und kostspieligen Schäden als Folge von Gewittereinflüssen unerträglich hoch ist. Das führte in letzter Zeit zur systematischen Untersuchung jener Vorgänge, die sich unter dem Einfluss von Gewittern in unsern Anlagen abspielten.

Dieser Arbeit stellen sich nun aber verschiedene Schwierigkeiten in den Weg. Die grösste ist vielleicht die Mannigfaltigkeit der Blitzströme sowohl in Amplitude als in zeitlichem Verlauf. Die dürftigen Kenntnisse, die man noch vor wenigen Jahrzehnten vom Blitz hatte, sind durch zahlreiche in- und ausländische Untersuchungen [1] so erweitert worden, dass man jetzt einen recht guten Überblick über die auftretenden Blitzströme gewonnen hat.

Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass es für uns aus wirtschaftlichen Gründen kaum möglich ist, während Gewittern Oszillogramme von Strömen und Spannungen in unsern Anlagen aufzunehmen. Wir sind deshalb gezwungen, mit kleinen Stoßströmen, die jedoch den gleichen zeitlichen Verlauf wie die Blitze haben, zu messen. Die oben zitierten Messungen zeigten, dass die Blitze im allgemeinen aus einer Anzahl kurzer Stromstösse bestehen, die in höchstens einigen μs das Maximum erreichen und deren Intensität nach 20 bis 200 μs auf die Hälfte sinkt. Ihre Amplitude erreicht sehr häufig 10 kA und überschreitet 50 kA relativ selten. Es sind jedoch schon Blitze

A. PRINCIPES FONDAMENTAUX

1. Généralités, caractéristiques des courants d'éclairs

Les courants d'éclairs dont les amplitudes varient de 10 à 200 kA et les installations de télécommunication sont très difficilement conciliables. A peine le télégraphe avait-il fait son apparition que l'on s'efforçait de diminuer les dangers auxquels étaient exposés les hommes et le matériel en montant des dispositifs de protection primitifs sur les lignes. Pendant plusieurs décennies, les mesures de protection ont été prises empiriquement et cette façon d'agir a généralement donné des résultats encore satisfaisants. Mais il s'est révélé que, dans certaines régions où les orages sont particulièrement nombreux et les conditions géologiques spéciales, la fréquence des interruptions du service et des dommages coûteux dus aux méfaits des orages était extrêmement élevée. Cet état de choses a conduit ces derniers temps à étudier systématiquement les phénomènes qui se produisent dans les installations téléphoniques sous l'influence des orages.

Mais ce travail se heurte à de nombreuses difficultés dont la plus grande est certainement la diversité des amplitudes et des formes des courants d'éclairs. Les connaissances rudimentaires que l'on possédait encore de la foudre il y a quelques dizaines d'années ont été approfondies par de nombreuses recherches en Suisse et à l'étranger [1], au point que l'on est parvenu à se faire une idée assez précise des courants d'éclairs.

Une autre difficulté réside dans le fait que, pour des motifs d'ordre économique, il est difficilement possible d'enregistrer pendant les orages des oscillogrammes de courants et de tensions dans les installations téléphoniques. C'est pourquoi l'on est obligé de faire des mesures avec de petits courants de chocs qui ont néanmoins la même forme que les éclairs. Les mesures citées plus haut ont montré que les éclairs se composent généralement d'un certain nombre de chocs brefs de courant qui atteignent leur maximum en quelques μs au plus et dont l'intensité est redescendue à la moitié de la valeur de crête après 20 à 200 μs. Leur amplitude atteint très fréquemment 10 kA et dé-

gemessen worden mit Amplituden von 200 kA und solche von 100 kA Amplitude und 3 ms Halbwertszeit!

Seit einigen Jahren haben wir die Amplitude der Blitzströme in mehreren exponierten Kabelanlagen in verschiedenen Teilen der Schweiz mit magnetisierbaren Stahlstäbchen registriert. Dabei haben wir verhältnismässig oft Blitzströme von 30 kA gemessen. Die Auswertung der bei den verschiedenen Amplituden auftretenden Schäden an den Anlagen ergab eine wertvolle Bestätigung der theoretischen Berechnungen.

Trotzdem also sehr grosse Varianten des Stoßstromverlaufs möglich sind, einigte man sich international auf den «Normalstoss 1/50», dessen Strom oder Spannung in 1 μs den Höchstwert erreicht (Stirnzeit) und innert 50 μs auf die Hälfte sinkt (Halbwertszeit). Man muss sich jedoch bei jeder Messung oder Berechnung, die auf dem Normalstoss beruht, über den Einfluss einer veränderten Stossform Rechenschaft geben. Eine Berechnung von Spannungen usw., unter Voraussetzung einer bestimmten Stossform kann deshalb nur orientierenden Charakter haben. Die sogenannten Dauerströme, die während einigen 100 ms fliessen können, überschreiten meistens einige 100 A nicht; sie können in seltenen Fällen allerdings 1000...2000 A erreichen. Meistens führen sie nicht zu einem Durchschlag, ist aber die Isolation durch einen starken Stoss durchbrochen, hängen die thermischen Zerstörungen stark von ihnen ab.

2. Potentialfelder in der Umgebung von Einschlagstellen

Schlägt ein Blitz in den Boden, so tritt in dem schlecht leitenden Medium naturgemäss ein grosser Spannungsabfall auf; es bildet sich ein «Potentialtrichter». Die Potentialverteilung an der Oberfläche hängt nur von der Grösse des Stromes und vom spezifischen Widerstand des Bodens ab.

Kreuzt nun eine Freileitung oder ein Kabel diesen Spannungstrichter, so entsteht zwischen diesen Leitern und der Erde eine beträchtliche Spannung.

Die Spannung, die zwischen einem Punkt P im Abstand a vor der Einschlagstelle und einem unendlich weit entfernten Punkt herrscht, beträgt bei homogenem Boden mit dem spezifischen Widerstand ϱ:

$$U_p = I \frac{\varrho}{2\pi a}$$

Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick für zwei verschiedene spezifische Erdwiderstände, die einem charakteristischen Boden im Mittelland und einem Tal des Nordtessins (z.B. Maggiatal) entsprechen. Bei einem Blitzstrom von 50 kA, einem Wert, mit dem noch gerechnet werden muss, ergeben sich folgende Spannungen gegen einen weit entfernten Punkt:

Abstand a	20	50	100	200	500	m
U (100 Ωm)	40	16	8	4	1,6	kV
U (10 kΩm)	4000	1600	800	400	160	kV

passe assez rarement 50 kA. Mais on a déjà mesuré des éclairs de 200 kA et d'autres de 100 kA avec une durée de 3 ms à mi-amplitude.

Depuis quelques années, nous avons enregistré en diverses régions du pays, au moyen de tiges d'acier magnétisable, l'amplitude des courants de foudre sur plusieurs installations de câbles exposées aux orages.

Nous avons assez souvent mesuré des courants de 30 kA. L'analyse des dommages causés aux installations pour les diverses amplitudes ont apporté une confirmation très utile des calculs théoriques.

Bien que les formes de chocs puissent être très diverses, on s'est entendu sur le plan international pour opérer avec le «choc normal 1/50», dont le courant atteint la valeur maximum en 1 μs (durée de front) et qui redescend à la moitié de cette valeur en 50 μs (durée de mi-amplitude). Il faut cependant interpréter de manière adéquate toute mesure ou calcul reposant sur le «choc normal» pour apprécier l'effet qu'une autre forme de choc pourrait avoir. Un calcul de tensions, etc., fait en admettant une certaine forme de choc ne doit pas prétendre donner plus qu'une indication. Ainsi, les courants dits de longue durée provoquent rarement un claquage. Ils peuvent passer pendant plusieurs centaines de millisecondes et ne dépassent pas quelques centaines d'ampères dans la plupart des cas, bien que parfois on en ait observé de 1000 à 2000 A. Ces courants ont cependant une influence très grande sur la gravité des dégâts par échauffement si l'isolation a été percée précédemment par un choc violent.

2. Champs de potentiel au voisinage des points de chute de la foudre

Lorsqu'un éclair frappe le sol, il se produit naturellement une forte chute de potentiel autour du point d'impact à cause de la faible conductivité du milieu; un «entonnoir» de potentiel se forme.

La répartition du potentiel à la surface du sol ne dépend que de l'intensité du courant et de la résistance spécifique du terrain. Si une ligne aérienne ou un câble coupe cet entonnoir de potentiel, une tension importante apparaît entre ces conducteurs et la terre.

La valeur de la tension Up qui existe entre un point P, situé à la distance a du point d'impact et un point très éloigné, dans le cas d'un sol homogène de résistivité ϱ, est

$$U_p = I \frac{\varrho}{2\pi a}$$

Le tableau suivant montre la situation avec deux résistances spécifiques différentes, l'une correspondant à un sol caractéristique du Plateau suisse, l'autre à celui d'une vallée du nord du Tessin (p. ex. val Maggia). En admettant un courant de foudre de 50 kA, valeur avec laquelle il faut encore compter, on obtient les tensions que voici par rapport à un point très éloigné.

Distance a	20	50	100	200	500 m
U (100 Ωm)	40	16	8	4	1,6 kV
U (10 kΩm)	4000	1600	800	400	160 kV

Infolge der Ionisierung des Bodens sind die Spannungen in unmittelbarer Nähe der Einschlagstelle wesentlich niedriger als berechnet. Nach Messungen von Prof. K. Berger [2] ist die Grenze der Ionisation etwa bei 3 kV/cm; bei 7...10 kV/cm erfolgt bereits ein Durchschlag des Bodens. Nach Sunde [3] erfolgt in der Erde ein Durchschlag im Bereich zwischen 10 und 20 kV/cm, während der Oberfläche entlang bereits bei 1...5 kV/cm Durchschläge möglich sind.

Eine Feldstärke von 3 kV/cm tritt bei 50 kA und 100 Ωm in 1,6 m Abstand von der Einschlagstelle, bei 10 kΩm in 16 m Abstand auf; Durchschläge sind jedoch über wesentlich grössere Distanzen möglich, da infolge der Bodeninhomogenitäten und an den Spitzen bereits ausgebildeter Durchschlagskanäle Feldstärken auftreten, die weit über dem Mittel für die betreffende Entfernung liegen.

Kreuzt nun ein Kabel einen solchen Potentialtrichter, so wird es natürlich einen Teil des Blitzstromes übernehmen. Ist der Abstand von der Einschlagstelle klein genug, so erfolgt ein Durchschlag des Bodens, und das Kabel übernimmt praktisch den ganzen Strom. Durchschläge werden durch Baumwurzeln usw. begünstigt. Die Grösse der Spannungen zeigt, dass ein Kabel durch einen aussen liegenden Thermoplastüberzug nicht gegen Blitzschläge geschützt werden kann.

Die Auffassung, dass Erdkabel gegen direkte Blitzschläge geschützt sind, ist irrig. Obwohl Seilbahnen, Bäume usw. in der Nähe eines Kabels die Gefahr beträchtlich erhöhen, so sind auch beim Fehlen von benachbarten hohen Objekten ohne weiteres Einschläge in das Kabel möglich. Die Wahrscheinlichkeit eines Durchschlages auf das Kabel wächst stark mit abnehmender Bodenleitfähigkeit.

3. Das Verhalten von Kabeln bei Stoßströmen

Kabel sind gegen Überspannungen sehr empfindlich und ihre Reparatur ausserdem sehr kostspielig, so dass uns ihre Eigenschaften bei Stoßströmen und -spannungen stark interessieren. Wir können die dabei auftretenden Probleme in zwei Hauptgruppen unterteilen:

a) Eine Stoßspannung wird an einem Ende des Kabels zwischen einem Aderpaar und dem Mantel angelegt. Die Stoßspannung stammt in den meisten Fällen von einer Freileitung.
b) Ein Stoßstrom fliesst längs eines Kabelmantels. Dieser Strom kann von einem direkten Einschlag in das Kabel, von Erdpotentialdifferenzen oder aus einer Freileitung stammen.

a) Ausbreitung einer Stoßspannung auf einem Aderpaar

Eine Stoßspannung tritt immer asymmetrisch auf; uns interessiert demnach der Stromkreis zwischen den beiden Leitern eines Paares und dem geerdeten Kabelmantel.

Tritt am Kabelanfang eine asymmetrische Spannung auf, die z.B. von einer angeschlossenen Frei-

A cause de l'ionisation du sol, les tensions sont toutefois considérablement plus faibles que ne l'indique le calcul au voisinage immédiat du point d'impact.

D'après les mesures de *K. Berger* [2], la limite d'ionisation est de 3 kV/cm environ; avec 7 à 10 kV/cm il se produit une perforation du sol. Selon *Sunde* [3], la perforation à l'intérieur de la terre requiert 10...20 kV/cm tandis qu'à la surface du sol des perforations sont déjà possibles avec 1...5 kV/cm.

Avec 100Ωm et 50 kA on a un gradient de 3 kV/cm à 1,6 m de distance, avec 10 kΩm la distance correspondante est de 16 m. Des perforations sont cependant possibles à des distances nettement plus grandes, car il se produit des intensités de champ bien plus élevées que la moyenne normale à la distance considérée à cause des inhomogénéités du sol et de l'effet de pointe de canaux de perforation déjà formés.

Lorsqu'un câble traverse un entonnoir de potentiel dû à la foudre, il offre un chemin à une partie du courant de la décharge. Si la distance qui le sépare du point d'impact est assez réduite, il y a perforation du sol et le câble conduit pratiquement tout le courant de l'éclair.

Les perforations sont favorisées par les racines d'arbres et autres éléments conducteurs. Il n'est pas possible de protéger les câbles au moyen d'un revêtement en matériel thermoplastique, car les tensions sont trop grandes.

Il est faux de croire que les câbles souterrains sont à l'abri des coups de foudre directs. Ceux-ci peuvent se produire même si aucun objet attirant la foudre, tel que funiculaire, arbre, etc., ne se trouve dans le voisinage du câble. La probabilité de perforation du câble croît fortement lorsque la conductibilité du sol diminue.

3. Le comportement des câbles soumis à des chocs de courant

Le comportement des câbles soumis à des chocs de courant et de tension nous intéresse beaucoup, car ils les supportent mal et leur réparation coûte très cher. On peut scinder les problèmes que soulève cette question en deux groupes principaux relatifs aux cas où

a) Une tension de choc est appliquée à l'extrémité d'un câble entre un lacet et la gaine. La tension de choc provient dans la majorité des cas d'une ligne aérienne.
b) Un choc de courant circule le long d'une gaine de câble. Ce courant peut provenir d'un coup de foudre direct sur le câble, de différences de potentiel dans le sol ou d'une ligne aérienne.

a) *Propagation d'une tension de choc le long d'un lacet*

Les tensions de choc se présentent toujours de façon asymétrique, c'est la raison pour laquelle le circuit qui nous intéresse est celui qui est formé par les deux conducteurs du lacet, d'une part, et la gaine du câble mise à la terre, d'autre part.

leitung herrührt, so interessiert uns, auf welche Art diese Stoßspannung längs des Kabels gedämpft wird; d.h. «wie weit sie in das Kabel eindringt». Zur mathematischen Lösung dieses Problems bedarf es jedoch der Kenntnis der Eigenschaften des Kabels über einen beträchtlichen Frequenzbereich. Eine experimentelle Lösung schien daher wesentlich einfacher und auch leichter verständlich.

Diese bestand in zwei Messreihen, wovon die erste an einem sehr langen Kabel durchgeführt wurde, dessen Ende gegen Erde mit dem Wellenwiderstand (etwa 100 Ω) asymmetrisch abgeschlossen war. Der Stromstoss wurde am Kabelanfang zwischen den parallelgeschalteten Leitern eines Paares und dem Mantel niederohmig angelegt und mit einem Kathodenstrahloszillographen längs des Kabels in verschiedenen Abständen x vom Kabelanfang aufgezeichnet. Mit der zweiten Messreihe wurde berücksichtigt, dass die Aderpaare an ihrem Ende normalerweise gegen Erde nicht abgeschlossen sind, sondern entweder vollständig offen (normaler Teilnehmeranschluss, Fernleitung mit Übertragern) oder dann über eine hohe Impedanz mit der Erde verbunden sind (Linienrelais usw.). Dort wird die Stosswelle reflektiert, so dass am Leitungsende eine beträchtliche Spannungsüberhöhung entsteht.

Zur quantitativen Erfassung dieser Vorgänge wurde an ein 0,8 mm Aderpaar eines Teilnehmerkabels ein Stoss niederohmig angelegt und die Spannung am offenen Ende gemessen; der Versuch wurde mit verschiedenen Kabellängen durchgeführt.

In Figur 1 sind die Oszillogramme der Versuche reproduziert. Sie zeigen, dass wohl die Stirn des Stosses nach Durchlaufen einer relativ kleinen Kabellänge stark verflacht wird, dass hingegen die Amplitude mit wachsender Kabellänge sehr langsam abnimmt. Das erklärt sich ohne weiteres, wenn man bedenkt, dass die Hauptenergie eines Stosses im Frequenzgebiet von einigen kHz liegt, wo die Dämpfung bei einem Kabel relativ klein ist.

Wird die Stoßspannung in der Stirn begrenzt (abgeschnittener Stoss), so ist die Dämpfung für den verbleibenden kurzen Impuls sehr gross. In Figur 2 findet man die entsprechenden Oszillogramme, die längs einem langen abgeschlossenen Kabel und am offenen Ende verschiedener Kabellängen aufgenommen wurden.

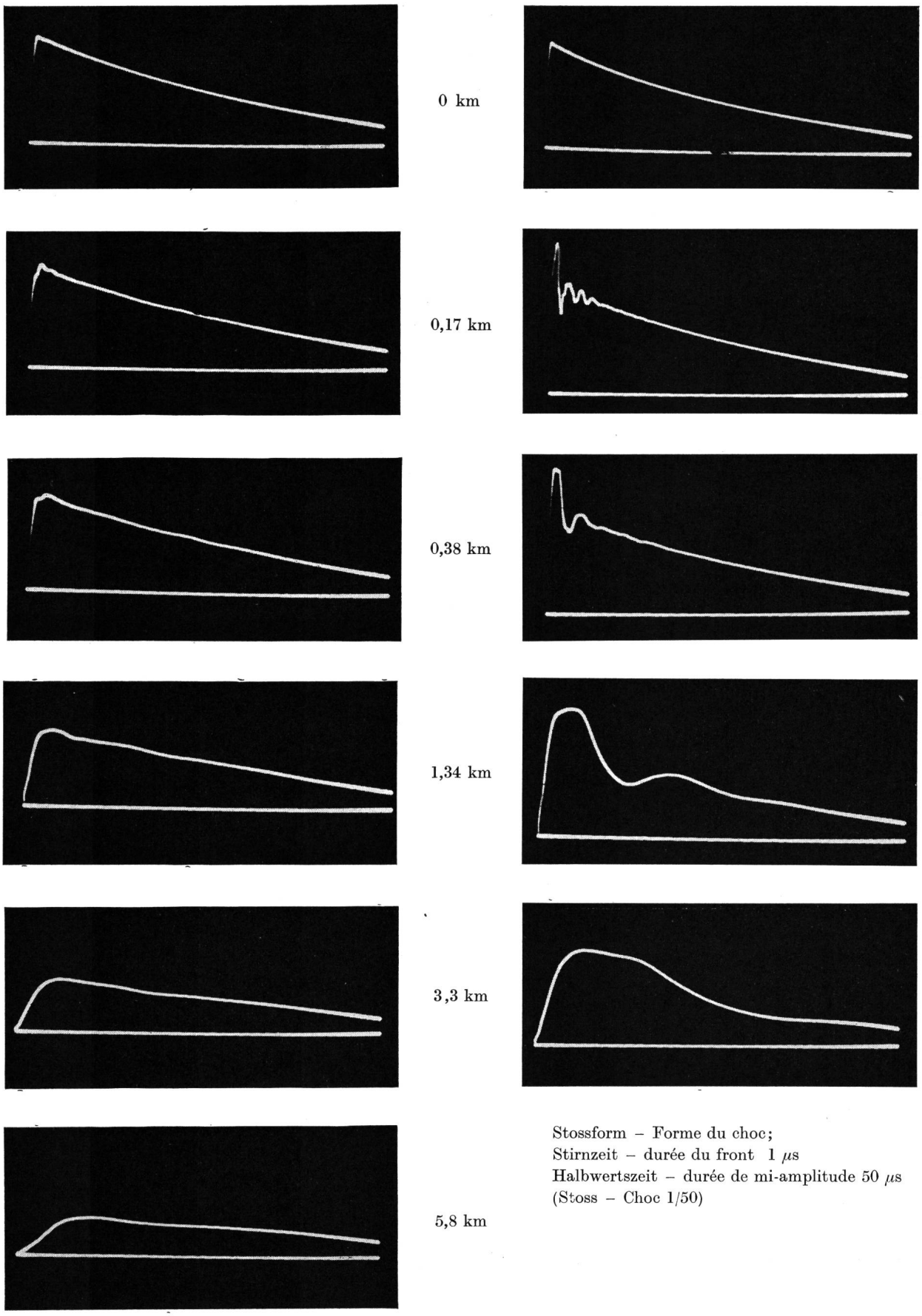
Das Resultat der Auswertung all dieser Oszillogramme ist in Figur 3 dargestellt. Daraus ist zu entnehmen, dass die Amplitude eines vollen Stosses erst nach Durchlaufen von 3 km Kabel auf die Hälfte sinkt. Ist das Kabel an seinem Ende nicht gegen Erde abgeschlossen, was dem Normalfall entspricht, so ist die Spannung am Ende bei Kabellängen unter 2,5 km grösser als die Spannung am Kabelanfang. Dadurch lassen sich die zahlreichen Schäden an den Enden von Kabeln leicht erklären. Wird jedoch der Stoss in der Stirn abgeschnitten (durch einen Ableiter oder als Folge eines Durchschlages der Kabelisolation), so

Lorsqu'un choc de tension asymétrique provenant par exemple d'une ligne aérienne atteint le début d'un câble, nous désirons savoir de quelle façon il s'atténue en se propageant le long du câble ou encore jusqu'où il parvient dans le câble. Pour résoudre mathématiquement ce problème, il faut cependant connaître les propriétés du câble dans une gamme étendue de fréquences. Il a semblé nettement plus facile de rechercher sa solution de manière expérimentale, c'est aussi la façon la plus aisée à comprendre.

La solution essayée a comporté deux séries de mesures dont l'une sur un très long câble terminé contre la terre par son impédance caractéristique asymétrique (environ 100 Ω). Un choc de courant a été appliqué au début du câble entre les deux fils d'un lacet réunis en parallèle, et la gaine du câble au moyen d'une source d'impédance négligeable et l'on a observé son action à diverses distances x mesurées à partir de la source. La deuxième série de mesures tenait compte du fait que dans la pratique les lacets ne sont habituellement pas terminés sur leur impédance caractéristique, mais aboutissent soit à un circuit complètement ouvert (cas du raccordement d'un abonné, d'une ligne à grande distance avec translateurs) soit à la terre à travers une haute impédance (relais de ligne, etc.). L'onde de choc est alors réfléchie à l'extrémité de la ligne de sorte qu'il s'y produit une surtension considérable. On a étudié ce phénomène de manière quantitative en appliquant un choc provenant d'une source d'impédance interne négligeable à une extrémité d'un lacet d'abonné constitué par des conducteurs de 0,8 mm de diamètre et en mesurant la tension à l'extrémité opposée maintenue ouverte. Cette opération fut naturellement répétée sur des lacets de diverses longueurs.

La figure 1 reproduit les oscillogrammes ainsi obtenus. Ils montrent que si le front du choc est bien étiré après avoir parcouru un trajet relativement faible, son amplitude, par contre, ne décroît que très lentement en fonction de la longueur du câble. Cela s'explique immédiatement si l'on songe que l'énergie principale du choc est concentrée dans une plage de fréquences de quelques kHz pour laquelle l'amortissement du câble est relativement faible. Si la tension de choc est limitée à la portion de son front (choc coupé), l'amortissement observé pour la courte impulsion qui en résulte est très grand, ainsi que le montre la figure 2. Celle-ci représente les oscillogrammes obtenus dans ces conditions, d'une part, le long d'un long câble terminé sur son impédance caractéristique et, d'autre part, à l'extrémité ouverte de diverses longueurs de câble.

Le résultat de l'analyse de tous ces oscillogrammes est donné par la fig. 3: on voit que l'amplitude d'un choc normal complet tombe à la moitié de sa valeur maximum à l'origine après avoir parcouru 3 km de câble. Si le câble est ouvert à son extrémité éloignée, ce qui correspond au cas normal, il apparaît que la tension observée à cet endroit est plus grande qu'à l'origine pour les longueurs inférieures à 2,5 km. Cela



Stossform – Forme du choc;
Stirnzeit – durée du front 1 μs
Halbwertszeit – durée de mi-amplitude 50 μs
(Stoss – Choc 1/50)

Fig. 1. Ausbreitung eines Stosses zwischen einem Aderpaar und dem Kabelmantel
links: an unendlich langem Kabel in verschiedenem Abstand vom Kabelanfang gemessen;
rechts: am offenen Ende von Kabeln verschiedener Länge

Fig. 1. Propagation d'un choc normalisé entre un lacet et la gaine d'un câble
A gauche: mesures effectuées à différentes distances de l'origine le long d'un câble infini;
à droite: mesure en circuit ouvert à l'extrémité de câbles de différentes longueurs

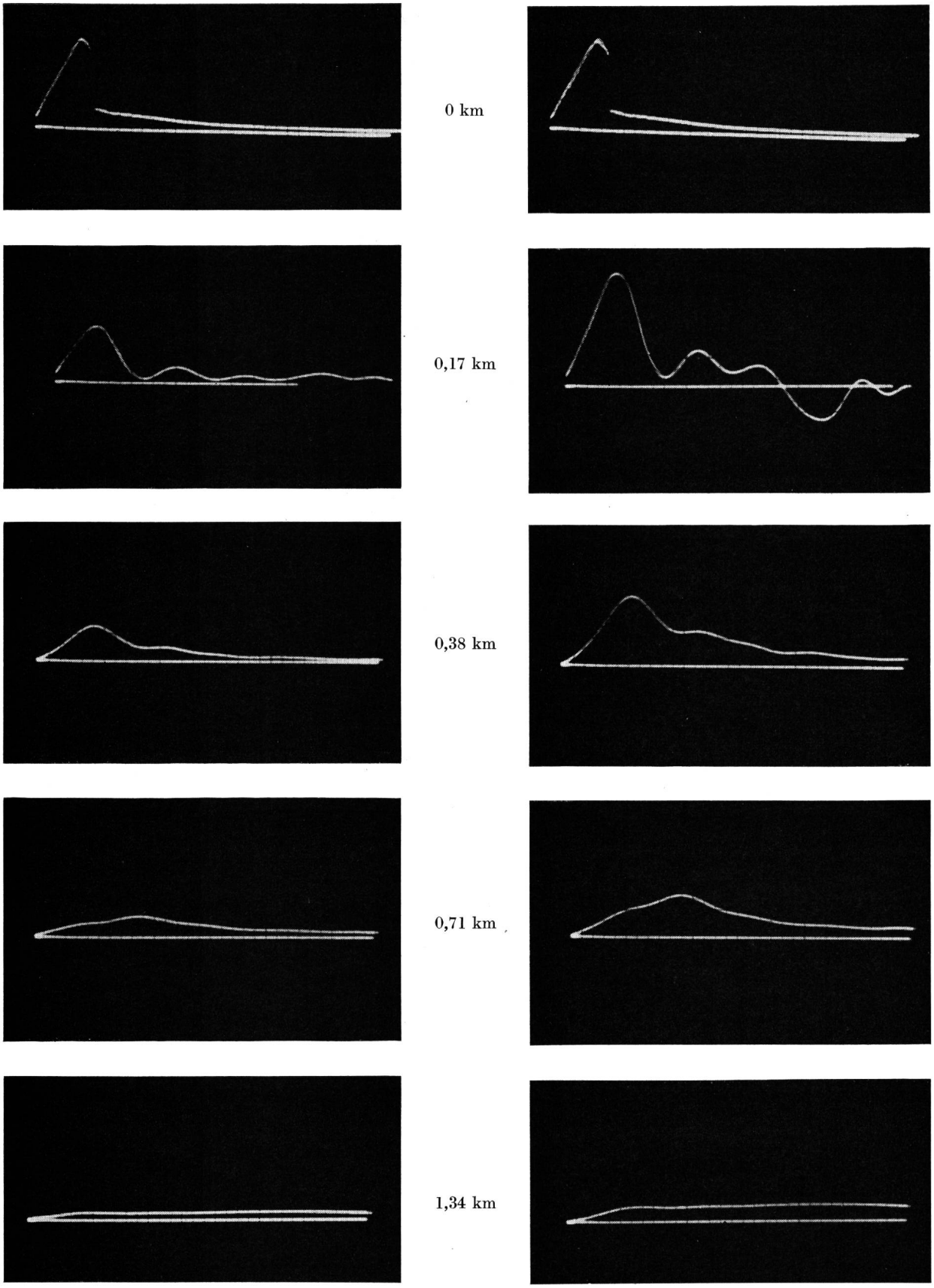


Fig. 2. Ausbreitung eines Stosses zwischen einem Aderpaar und dem Kabelmantel, jedoch mit einem nach 0,4 μs abgeschnittenen Stoss gemessen
Entspricht dem Ansprechen der Ableiter in der Kabel-Überführungsstange oder einem Durchschlag am Kabelanfang. Bei der Kabellänge 170 m sind deutlich die Reflexionen an verschiedenen Verteilspleissungen zu sehen, ebenso die Reflexion am niederohmigen Stossgenerator (rechts)

Fig. 2. Propagation d'un choc normalisé entre un lacet et la gaine d'un câble avec un choc coupé après 0,4 μs
(Correspond au cas du fonctionnement du parafoudre au point de transition ou à un claquage au début du câble). Avec la longueur du câble de 170 m on distingue clairement les réflexions dues aux diverses épissures ainsi que la réflexion produite par le générateur de chocs à basse impédance (à droite)

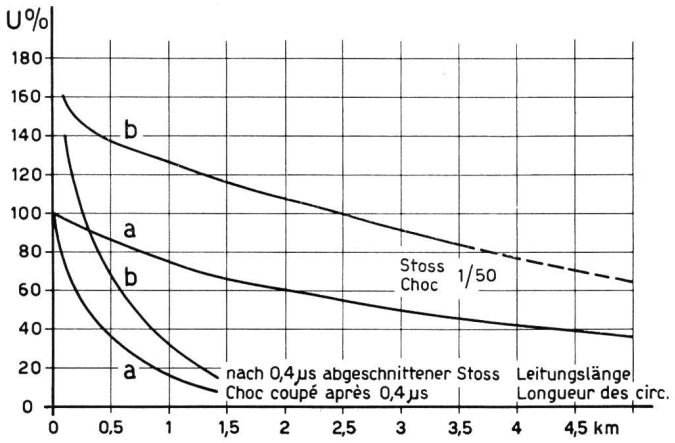


Fig. 3. Dämpfung asymmetrischer Spannungsstösse auf einem Aderpaar H-O —0,8 mm
a = Amplitude (% des am Kabelanfang angelegten Stosses) in Abhängigkeit von der Entfernung vom Kabelanfang bei einem unendlich langen Kabel.
b = Amplitude am offenen Ende von Kabeln verschiedener Länge

Amortissements de chocs de tension asymétriques le long d'un lacet H-O —0,8 mm.
a = Amplitude (% de la crête au début du câble) en fonction de la distance à l'origine dans le cas d'un câble infini;
b = Amplitude en circuit ouvert à l'extrémité de câbles de diverses longueurs

sinkt seine Amplitude bereits nach 300 m Kabellänge auf die Hälfte.

b) Wirkung eines Stoßstromes längs des Kabelmantels

Tritt an einem Punkt ein Stoßstrom in das Kabel, so fliesst er längs des Mantels und geht allmählich in die Erde über. Die Verhältnisse sind ähnlich den unter a) für ein Adernpaar geschilderten, nur nehmen infolge der grossen Ableitung sowohl Amplitude wie Stirnsteilheit viel rascher ab. Die Rechnung [4] ergibt für einen Stoss 1/50 eine Abnahme des Stromes auf die Hälfte nach 45 m bei $\varrho = 100\ \Omega$m und 450 m bei $\varrho = 10\,000\,\Omega$m. Der längs des Kabelmantels entstehende Spannungsabfall tritt als Spannung zwischen Aderbündel und Mantel auf. Es ist verständlich, dass diese Spannung um so grösser wird, je grösser der Widerstand des Kabelmantels und je schlechter die Bodenleitfähigkeit sind; sie wächst jedoch auch mit der Amplitude des Stoßstromes und dessen Halbwertszeit. Dabei gehen Mantelwiderstand und Stromamplitude linear, der spezifische Widerstand des Bodens und die Halbwertszeit jedoch nur mit der Wurzel in das Resultat ein.

Wir haben die Verhältnisse für ein Kabel $20 \times 2 \times 1$ mm (Mantelwiderstand 1,9 Ω/km) bei einem spezifischen Widerstand des Bodens von 5000 Ωm (z. B. Granit des Grimsel- oder Sustengebietes) bei einem Einschlag fern der Kabelenden durchgerechnet. Auf die Wiedergabe des relativ umständlichen Rechenverfahrens [5] verzichten wir, das Resultat ist in Fig. 4 dargestellt.

An der Einschlagstelle tritt in unserem Fall zwischen Bündel und Mantel bei einer Halbwertszeit des Stromes von 65 μs eine Spannung von 500 V/kA auf. Das Spannungsmaximum entsteht erst, wenn der Strom explique les nombreux dégâts observés à l'extrémité des câbles. Si, au lieu d'un choc normal, on opère avec un choc coupé (par un parafoudre ou à la suite d'un claquage de l'isolation), son amplitude tombe déjà après un parcours de 300 m à la moitié de sa valeur à l'origine.

b) Effet d'un choc de courant circulant le long de la gaine du câble

Lorsqu'un choc de courant se produit en un point d'un câble, il se propage le long de la gaine et s'écoule progressivement dans le sol environnant.

Les conditions sont semblables à celles qui sont décrites en a) pour les lacets, sauf que par suite de la grande perditance l'amplitude aussi bien que la raideur de front décroissent bien plus rapidement. D'après le calcul [4], le courant maximum d'un choc normal 1/50 tombe à la moitié de sa valeur déjà à 45 m de l'origine si l'on admet $\varrho = 100\,\Omega$m et à 450 m, si $\varrho = 10\,000\,\Omega$m. La chute de tension qui se produit le long de la gaine se traduit par une différence de potentiel entre le lacet et la gaine. Il est clair que cette tension doit être d'autant plus élevée que la résistance de la gaine du câble est grande et que la conductivité du sol est mauvaise. Elle croît aussi avec l'amplitude du choc de courant et avec sa durée à mi-amplitude. Elle est directement proportionnelle à la résistance de la gaine et à l'amplitude du courant et seulement proportionnelle à la racine carrée de la résistivité du sol et de la durée de mi-amplitude.

Nous avons calculé ce qui se passe pour un câble $20 \times 2 \times 1$ (Résistance de la gaine 1,9 Ω/km) en admettant une résistance spécifique du sol de 5000 Ωm (p. ex. granit des régions du Susten ou du Grimsel) lorsqu'un coup de foudre se produit loin des extrémités du câble. La figure 4 montre le résultat obtenu par un procédé relativement compliqué [5] et que nous renonçons à reproduire ici.

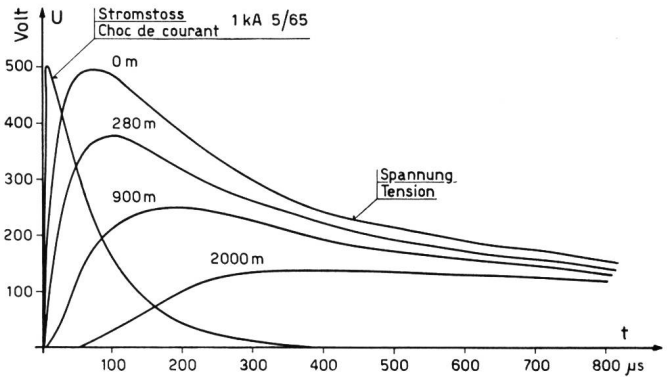


Fig. 4. Zeitlicher Verlauf der Spannung zwischen Bündel und Mantel in verschiedener Entfernung x vom Einschlagspunkt
Stromstoss: 1 kA in den Mantel eines Kabels $20 \times 2 \times 0{,}8$ (1,9 Ω/km) fern von den Enden. (Bei einem Einschlag in das Kabelende entsteht die doppelte Spannung.) Spezifischer Erdwiderstand $\varrho = 5000\ \Omega$m

Forme de la tension entre faisceau et gaine à différentes distances x du point frappé par la foudre.
Choc du courant: 1 kA dans la gaine d'un câble $20 \times 2 \times 0{,}8$ (1,9 Ω/km) loin des extrémités. (Lorsque la foudre frappe l'extrémité du câble la tension est double). Résistance spécifique du sol: $\varrho = 5000\ \Omega$m

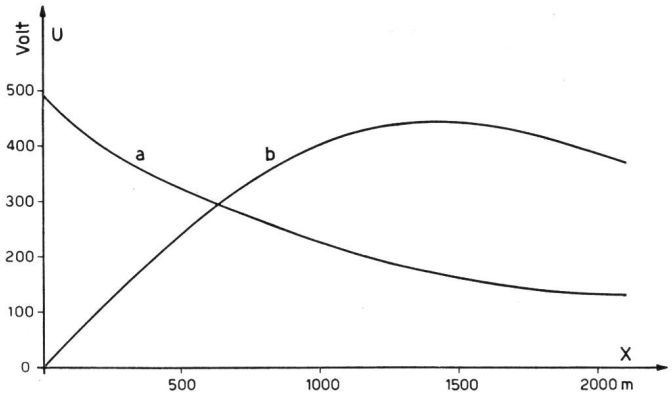


Fig. 5. Grösse der Amplitude der Spannung zwischen Bündel und Mantel in Abhängigkeit von der Entfernung x vom Einschlagspunkt. (Stromstoss und Kabeldaten siehe Fig. 4, Stromeintritt fern von den Kabelenden)
a = Aderbündel vom Mantel isoliert
b = Aderbündel am Einschlagspunkt mit dem Mantel verbunden (zum Beispiel durch Ansprechen von Ableitern oder Durchschlag der Isolation)

Grandeur de la crête de la tension entre faisceau et gaine en fonction de la distance x au point d'impact. (Choc de courant et données du câble comme fig. 4. Entrée du courant loin des extrémités du câble)
a = Faisceau de conducteurs isolés de la gaine
b = Faisceau de conducteurs reliés à la gaine au point frappé par la foudre (par exemple à la suite d'un fonctionnement de parafoudre ou d'une perforation de l'isolation)

ungefähr auf die Hälfte gesunken ist, ebenso ist auch das örtliche Spannungsmaximum nicht sehr ausgeprägt, so dass Durchschläge auch in einiger Entfernung von der Einschlagstelle auftreten können (Fig. 5, Kurve a).

Erfolgt nun bei der Einschlagstelle ein Durchschlag zwischen Bündel und Mantel (wodurch die Adern auf das gleiche Potential wie der Mantel kommen), so fliesst ein Teil des Stoßstromes sowohl über die Adern als auch über den Mantel ab. Durch die ungleiche Dämpfung der beiden Stromkreise tritt in einiger Entfernung von der Einschlagstelle eine Spannung zwischen Aderbündel und Mantel auf, die annähernd gleich gross ist wie bei isolierten Adern (Fig. 5, Kurve b). Das bedeutet, dass nach einem Durchschlag weitere Fehlerstellen entstehen können und dass der Einbau von Spannungsableitern in ein Kabel (z. B. bei der Kabelüberführung) dieses nur auf eine begrenzte Länge schützt, wenn der Strom einige kA überschreitet.

Falls der Blitz in der Nähe des Kabelendes einschlägt, fliesst der Strom nur auf eine Seite ab; die Spannung Bündel–Mantel wird dann doppelt so gross. Für diesen Fall sind in Figur 6 die zu erwartenden Spannungen für einen Stoss 1/50 aufgezeichnet. Ist der spezifische Widerstand der Kabelumhüllung höher als der des Erdbodens, so werden die Spannungen höher als bei Kabeln, deren Metallmantel in direktem Kontakt mit dem Boden steht.

4. Spannungsabfälle in Erdleitern

Starke Stoßströme haben naturgemäss auch grosse Spannungsabfälle in Erdungsnetzen und ihren Zuleitungen zur Folge. Fliesst ein Strom von zum Bei-

Dans ce cas, il se produit au point d'impact une tension de 500 V/kA pour une durée de mi-amplitude du courant de 65 μs. La tension maximum apparaît seulement lorsque le courant est tombé à peu près à la moitié de sa valeur de crête. En outre, le point où se produit la tension maximum n'est pas très marqué, de sorte que les perforations peuvent aussi avoir lieu à quelque distance du lieu d'impact. (fig. 5, courbe a).

S'il se produit une perforation à ce dernier endroit entre le faisceau de conducteurs et la gaine (ce qui amène les lacets au même potentiel que la gaine), le choc de courant se propage aussi bien le long des lacets que le long de la gaine.

La différence d'amortissement des deux chemins cause à une certaine distance du point de perforation la formation d'une différence de potentiel entre le faisceau de conducteurs et la gaine, différence qui est à peu près aussi importante que celle que l'on a lorsque les lacets sont isolés (fig. 5, courbe b). Cela signifie que des défauts peuvent se produire à d'autres endroits qu'à celui où la décharge a pénétré et que, par conséquent, le montage de parafoudres pour protéger un câble (par exemple aux points de transition) n'est efficace que pour une longueur limitée de celui-ci si le courant dépasse quelques milliers d'ampères.

Lorsque la foudre frappe le câble près de son extrémité, le courant ne circule que dans un sens et la tension entre faisceau de conducteurs et gaine s'en trouve doublée. La figure 6 représente les tensions auxquelles l'on doit s'attendre avec un choc normal 1/50. Si la résistance spécifique de l'enveloppe du câble

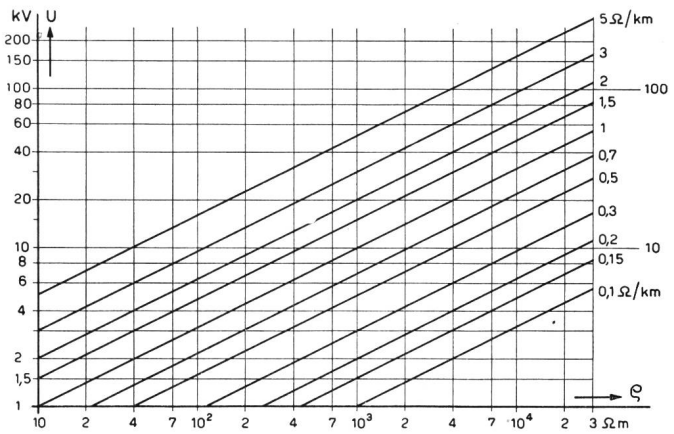


Fig. 6. Amplitude der Spannung Aderbündel–Mantel bei einem Einschlag in den Mantel am Kabelende
Stoßstrom 50 kA Scheitelwert, Normalstoss (1/50)
Widerstand des Kabelmantels 0,1...5 Ω/km
Spezifischer Erdwiderstand 10...30000 Ωm
Die Werte gelten für nackt in die Erde verlegte Kabel. Umhüllungen mit schlechterer Leitfähigkeit als der Boden bewirken höhere Spannungen, ebenso die Verlegung in Kanäle

Amplitude de la tension faisceaux de conducteurs-gaine en cas de coup de foudre à l'extrémité du câble.
Choc de courant de 50 kA de crête. (Choc normal 1/50)
Résistance de la gaine du câble 0,1...5 Ω/km. Résistance spécifique du sol 10...30000 Ωm. Les valeurs données sont valables pour des câbles montés nus dans le sol
Des enveloppes ayant une conductibilité plus mauvaise que celle du sol ont pour conséquence des surtensions plus élevées; il en est de même du montage dans des caniveaux

spiel 10 kA in einen Erder mit dem Ausbreitungswiderstand von 20 Ω, so wird der Spannungsabfall am Erder 200 kV.

Unter der Voraussetzung, dass alle Metallteile des geerdeten Komplexes miteinander verbunden sind und keine elektrischen Leitungen aus dem Gebäude führen, ist diese Spannung belanglos. Wo jedoch getrennte Erdungen verwendet werden, treten zwischen ihnen grosse Spannungsdifferenzen auf. Schäden lassen sich also nur verhüten, wenn alle Installationen entweder an die gleiche Erdung angeschlossen oder dann ausreichend voneinander isoliert werden. Eine Isolation erfordert aber unter Umständen Abstände, die einen Meter überschreiten können.

Auch die Spannungsabfälle in den Erdleitern sind keinesfalls zu vernachlässigen; hier ist vor allem die Induktivität der Leitungen massgebend. Sie liegt für einen Erddraht mit normalem Querschnitt um 1,5 μH/m. Somit hat ein Blitz mit einer Stirnsteilheit von 10 kA/μs an einer 10 m langen Erdleitung einen induktiven Spannungsabfall von 150 kV zur Folge. Es ist daher sehr wesentlich, wo die verschiedenen Erdleiter verbunden werden.

B. GEFÄHRDUNG VON TELEPHONANLAGEN

Anhand der theoretisch und experimentell gewonnenen Kenntnisse kann jetzt die Art und der Grad der Gefährdung von Telephonanlagen abgeschätzt werden. Grundsätzlich bestehen folgende Möglichkeiten einer Beeinflussung:

1. Statische Aufladung

Die statische Aufladung kann natürlich nur in einer sehr gut isolierten Leitung, die nicht von einem geerdeten Schirm umgeben ist, auftreten, also in Freileitungen, die mit Übertragern abgeschlossen sind. Dieser Fall ist heute, wenigstens in der Schweiz, ausserordentlich selten. Wenn die Leitung mit Edelgasableitern ausgerüstet ist, so wird die Spannung begrenzt und irgendwelche Schäden treten nicht auf. Die statische Aufladung durch das luftelektrische Feld ist für uns also von sehr untergeordneter Bedeutung.

2. Induzierte Spannung

Eine Spannung kann in einer Leitung induziert werden, wenn eine Komponente des Blitzstromes parallel einer Leitung verläuft. Die in Freileitungen induzierten Spannungen können Werte bis zu etwa 100 kV erreichen, die Stromamplituden werden einige hundert Ampere kaum übersteigen. Reine Kabelanlagen werden durch induzierte Spannungen nicht gefährdet, wenn Kabel mit Mänteln von normaler Leitfähigkeit (höchstens einige Ω/km) verwendet werden.

3. Potentialdifferenzen im Boden

Die Bodenpotentialdifferenzen gefährden nicht nur das Kabel durch die Möglichkeit von grossen Mantelströmen, sondern vor allem die Teilnehmerfreileitungen.

est plus grande que celle du sol, les tensions résultantes sont plus élevées que pour les câbles à gaine métallique en contact direct avec celui-ci.

4. Chutes de tension dans les conducteurs de terre

Il est évident que de forts chocs de courant provoquent de grandes chutes de potentiel dans les réseaux de mise à terre et leurs lignes de liaison. Si, par exemple, un courant de 10 kA circule dans une prise de terre dont la résistance est de 20 Ω, la différence de potentiel résultante atteint 200 kV.

Si toutes les parties métalliques de l'ensemble de l'installation mise à la terre sont réunies entre elles et qu'aucune ligne électrique ne sorte du bâtiment, cette tension est sans effet. Il en est autrement lorsque l'on utilise des terres séparées, car de grandes différences de potentiel s'établissent entre elles. Il faut donc, pour éviter des dégâts, ou que toutes les parties de l'installation soient réunies à la même terre ou qu'elles soient suffisamment isolées les unes des autres, mais alors les distances requises peuvent, selon les circonstances, dépasser un mètre.

Les chutes de tension dans les conducteurs de mise à terre ne sont pas non plus à négliger. Ici, c'est l'inductivité qui joue le rôle prépondérant; elle est de l'ordre de 1,5 μH/m pour un fil de terre de section normale.

Ainsi, avec un courant d'éclair ayant une raideur de 10 kA/s, la chute de tension atteint 150 kV entre les extrémités d'une ligne de terre de 10 m de long. Les endroits où sont réunis les divers conducteurs de terre ont donc une importance essentielle.

B. MISE EN DANGER DES INSTALLATIONS TÉLÉPHONIQUES

Sur la base des connaissances théoriques et expérimentales acquises, il est maintenant possible d'estimer le degré du danger auquel sont exposées les installations téléphoniques.

En principe, les possibilités suivantes d'influence nuisible existent:

1. Charge statique

Une charge statique ne peut naturellement se produire que sur une ligne très bien isolée qui n'est pas entourée par un écran mis à la terre. Tel est le cas de lignes aériennes terminées par des translateurs. Il est aujourd'hui extrêmement rare, au moins en Suisse. Si la ligne est munie de cartouches de parafoudre à gaz rare, la tension ne peut dépasser une valeur limite et aucun dégât ne se produit. L'importance de la charge statique due au champ électrique dans l'air est, pour nous, négligeable.

2. Tension induite

Il est possible qu'une tension soit induite dans une ligne si une composante du courant d'éclair suit un chemin parallèle à celle-ci. Les tensions induites dans les lignes aériennes peuvent atteindre des valeurs de l'orde de 100 kV et les amplitudes du courant ne dépassent guère quelques centaines d'ampères. Les ré-

Wie aus Vorstehendem ersichtlich ist, können auch bei relativ grossen Entfernungen von der Einschlagstelle beträchtliche Spannungsdifferenzen zwischen den Enden einer Freileitung auftreten. Dadurch tritt ein Rücküberschlag an den Spannungsableitern bei der Teilnehmerstation und der Kabelüberführungsstange auf. Der Strom in der Leitung wird dann durch die Induktivität der Leitung und die Summe der Erdungswiderstände an den beiden Leitungsenden begrenzt. Damit lässt sich die Amplitude der Stoßspannung, die zu einem Abschmelzen der normalen 3 A-Sicherungen führt, berechnen.

Eine Freileitung mit 2 mm-Drähten hat im Stromkreis zwischen den parallelgeschalteten Drähten und Erde bei 2000 Ωm eine Induktivität von ungefähr 2,6 mH/km; der Einfluss der Erdleitfähigkeit ist nicht entscheidend. Der Realanteil der Impedanz von zwei 2 mm-Bronzedrähten mit Erdrückleitung beträgt 8 Ω/km, wozu noch die Summe der Ausbreitungswiderstände der Erdungen beim Teilnehmer und beim Überführungspunkt kommt.

In einer frühern Arbeit [6], welche nur die Verhältnisse bei sehr langen Leitungen behandelt, wurde die Sicherungskonstante (Schmelzziffer) mit 2,75 A^2s für eine Sicherung von 3 A-Grenzabschmelzstrom berechnet, für die beiden parallelgeschalteten Sicherungen einer Schleife also zu 5,5 A^2s. Rechnet man nun mit Leitungslängen von 100 und 300 m, so genügt ein Stoss mit 50 μs Halbwertszeit und einer Am-

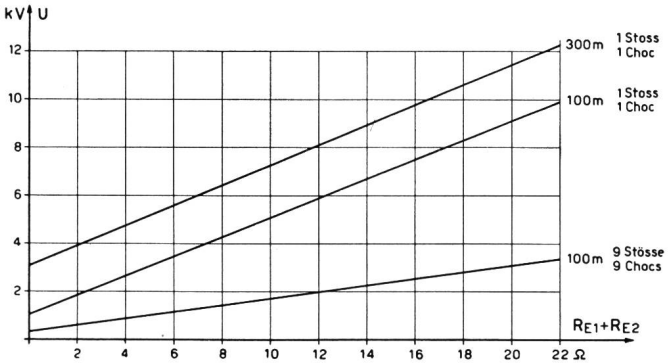


Fig. 7. Kurven kritischer Erdpotentialdifferenzen für Teilnehmer freileitungen
Übersteigt die Erdpotentialdifferenz zwischen Kabelüberführungsstange und Schutzerdung des Teilnehmers die aus den Kurven abgelesenen Werte, so schmelzen die 3A-Sicherungen durch. Gerechnet für Normalstoss 1/50 und Leitungslängen von 100 und 300 m. Für Stösse von 200 μs Halbwertszeit betragen die Grenzspannungen weniger als die Hälfte der Werte für 50 μs-Stösse.
$R_{E1}+R_{E2}$: Summe der Erdungswiderstände von Kabelüberführung und Schutzerdung beim Teilnehmer

Courbes de différences de potentiel critique entre les terres de lignes aériennes d'abonnés.
Les fusibles de 3A sautent lorsque la différence de potentiel entre le point de transition et la terre de protection de l'abonné dépasse les valeurs indiquées par les courbes. Valeurs calculées pour le cas du choc normal 1/50 et pour des longueurs de lignes de 100 et 300 m. Lorsque la durée de mi-amplitude des chocs est de 200 μs les tensions limites sont inférieures à la moitié de celles indiquées pour ceux de 50 μs.
$R_{E1}+R_{E2}$: Somme des résistances de la terre du point de transition et de la terre de protection de l'abonné

seaux composés uniquement de câbles souterrains ne sont pas menacés par les tensions induites pourvu que l'on emploie des câbles ayant des gaines de conductivité normale (au maximum quelques Ω/km).

3. Différences de potentiel dans le sol

Les différences de potentiel dans le sol ne menacent pas seulement les câbles à cause des dangers possibles dus à de trop forts courants dans la gaine ou aux claquages, mais elles mettent également en péril les lignes d'abonnés. Comme on l'a vu plus haut, des différences de potentiel importantes peuvent se produire aux extrémités d'une ligne aérienne même à des distances relativement élevées du point frappé par la foudre. Cela provoque un amorçage en retour des parafoudres près de la station de l'abonné ainsi qu'au point de transition entre câble et ligne aérienne.

Le courant est limité dans la ligne par l'inductivité de celle-ci et par la somme des résistances des prises de terre à chaque extrémité. Il est facile d'après cela de calculer l'amplitude du choc de tension qui est nécessaire pour faire sauter un fusible normal de 3 ampères.

Une ligne aérienne équipée de fils de 2 mm de diamètre a une inductivité d'environ 2,6 mH/km pour le circuit formé par les deux conducteurs du lacet mis en parallèle et un retour par une terre de 2000 Ωm; l'influence de la conductivité du sol n'est pas déterminante. La partie réelle de l'impédance d'une telle ligne munie de fils de bronze vaut 8 ohms/km, auxquels vient s'ajouter la somme des résistances des prises de terre de l'abonné et du point de transition.

Dans un travail précédent [6], qui ne traite que des conditions relatives aux lignes très longues, on a trouvé par le calcul que la constante des fusibles (indice de fusion) était de 2,75 A^2s pour un fusible dont le courant limite de fusion vaut 3 A. Pour une boucle où les deux fusibles sont en parallèle, cet indice de fusion vaut donc 5,5 A^2s. Si l'on admet que la longueur des lignes d'abonné est de l'ordre de 100 à 300 m, on voit qu'il suffit d'un choc de 50 μs de durée de mi-amplitude et de quelques kV de crête pour faire sauter les fusibles (voir fig. 7).

Si plusieurs chocs se produisent au cours d'un éclair (ce qui est en général le cas), les tensions nécessaires pour faire sauter le fusible sont réduites en raison inverse de la racine carrée du nombre des chocs. Ainsi, lorsqu'il y en a 4, il suffit que leur amplitude soit égale à la moitié de celle d'un choc unique. Les fusibles des lignes dont la terre de protection a une faible résistance sont particulièrement exposés. La première solution qui vient à l'esprit est d'accroître la résistance de la terre de protection des installations d'abonné qui n'ont pas besoin de terre de service ou même de supprimer purement et simplement cette terre. Cela n'est cependant pas possible à cause de la nécessité de protéger les personnes qui téléphonent. On pourrait cependant songer dans certaines circonstances (lorsqu'il n'est pas possible qu'un contact fortuit se produise avec une ligne à courant fort) à

plitude von wenigen kV zum Abschmelzen der Sicherungen (s. Fig. 7). Treten mehrere Stösse während eines Blitzes auf (was die Regel ist), so reduzieren sich die zum Abschmelzen nötigen Spannungen noch mit der Wurzel aus der Anzahl der Stösse; so genügt bei 4 Stössen die halbe Amplitude. Besonders gefährdet sind Sicherungen von Leitungen, deren Schutzerdung einen kleinen Ausbreitungswiderstand aufweist.

Die naheliegendste Lösung für Anschlüsse, die keine Betriebserdung benötigen, wäre natürlich eine Erhöhung des Schutzerdungswiderstandes beim Teilnehmer oder sogar der Verzicht auf eine Erdung. Sie kommt aber im Hinblick auf die dadurch mögliche Gefährdung des Telephonierenden nicht in Frage. Denkbar wäre jedoch unter bestimmten Verhältnissen (wenn keine Berührung mit einer Starkstromleitung möglich ist), dass die Schutzerdung über eine Funkenstrecke von 10...20 kV Ansprechspannung angeschlossen oder (bei kurzen Leitungen) die gemeinsame Schutz- und Betriebserdung über einen dritten Leiter von der Kabelstange zugeführt würde. Die technische wie rechtliche Seite dieser Probleme will jedoch genau überlegt sein.

4. Über Freileitungen eindringende Überspannungen

Die Freileitungen selbst sind durch Gewittereinflüsse nicht stark gefährdet. Man findet wohl dann und wann zersplitterte Stangen und ausgeglühte oder abgeschmolzene Drähte, welche die Folge von direkten Einschlägen sind. Diese Schäden sind jedoch ziemlich selten und ihre Reparatur ist meist nicht allzu kostspielig. Exponierte Stangen können mit einem Erddraht und einem relativ kurzen Erdband wirksam geschützt werden; man verzichtet jedoch meistens auf diese Schutzmassnahmen, weil wiederholte Einschläge in die gleiche Stange sehr selten sind.

Die dielektrische Festigkeit einer Holzstange beträgt 2...3 MV, es können jedoch an Freileitungen schon bei wesentlich niedrigeren Spannungen Überschläge auf benachbarte geerdete Objekte (Häuser usw. und vorwiegend auf Stangenanker) auftreten.

Die Freileitung endet meist auf der einen Seite an einem Kabel, auf der andern bei der Teilnehmerinstallation, beides Objekte mit sehr beschränkter Spannungsfestigkeit.

Die Ausbreitung von Stoßspannungen auf Kabeln wurde bereits beschrieben. Man ersieht daraus, dass die Dämpfung von vollständigen Stössen längs eines Kabels sehr klein ist, dass also die Wahrscheinlichkeit für einen Durchschlag bei einer Stossamplitude, die an der Grenze der dielektrischen Festigkeit liegt, nicht auf den Kabelanfang konzentriert ist. Nun stellt sich die Frage, weshalb trotzdem der weitaus grösste Teil der Fehler in den ersten 50 m der Kabel auftritt.

Das liegt daran, dass die Amplitude der Stoßspannungen, welche zu Kabelfehlern führen, normalerweise beträchtlich über der Spannungsfestigkeit der Kabel liegt. Bei einem Stoss von 40 kV mit einer Stirnzeit von 1 μs wird die Durchschlagsspannung des Kabels, die etwa bei 4 kV liegt, bereits nach 0,1 μs

relier la terre de protection à travers un parafoudre dont la tension d'amorçage serait de 10 à 20 kV. On pourrait aussi (pour les lignes courtes) amener la terre commune de protection et de service au moyen d'un troisième fil partant du point de transition. Ce sont là des problèmes dont les aspects techniques et juridiques méritent mûre réflexion.

4. Surtensions sur les câbles provenant des lignes aériennes

Les lignes aériennes proprement dites ne sont pas très exposées à des dégâts dus aux orages. Il arrive bien de temps en temps que des poteaux soient endommagés ou que des fils soient rougis ou fondus à la suite de coups de foudre directs. Ces accidents sont cependant assez rares et les frais qu'ils causent, minimes la plupart du temps. On peut efficacement protéger les poteaux exposés au moyen d'un fil réuni à une prise de terre constituée par un ruban de métal relativement court. On renonce presque toujours à cette mesure de protection parce qu'il est très rare que la foudre tombe plusieurs fois sur le même poteau.

La rigidité diélectrique d'un poteau de bois est de l'ordre de 2 à 3 MV, cependant des claquages peuvent se produire à des tensions sensiblement plus faibles entre la ligne et des objets voisins mis à la terre (maisons, etc., ainsi que et surtout ancrages de poteaux).

Les lignes aériennes aboutissent pour la plupart à un câble à l'une de leurs extrémités et à une installation d'abonné, à l'autre; ces deux objets n'ont qu'une résistance de claquage très limitée.

On a décrit plus haut la façon dont se propagent les chocs de tension sur les câbles et l'on a vu que l'amortissement de chocs complets est très faible le long d'un câble. Cela signifie que la probabilité d'une perforation due à un choc dont l'amplitude se situe à la limite de la rigidité diélectrique n'est pas concentrée au début du câble. Alors, pourquoi la très grande majorité des défauts ont-ils lieu dans les 50 premiers mètres de câble? Cela provient du fait que d'habitude, la crête des chocs de tension qui occasionnent des perforations du câble dépasse largement sa tension de claquage. Dans le cas d'un choc de 40 kV ayant une durée de front de 1 μs, cette tension, qui est de l'ordre de 4 kV, est déjà atteinte au bout de 0,1 μs. Pendant ce temps le choc ne pénètre que d'une vingtaine de mètres dans le câble. A ce moment, la tension, qui est de 4 kV à l'entrée du câble, décroît linéairement le long des 20 mètres parcourus dans celui-ci. Si le choc n'est pas limité par un parafoudre, il y a naturellement perforation à proximité du début du câble. Le choc coupé qui en résulte est rapidement amorti le long du câble et la probabilité d'autres claquages demeure faible. Il est possible de combattre efficacement les perforations d'isolation dans le câble au moyen de paratensions réagissant à des chocs de tension suffisamment faibles, pourvu que le courant qui s'écoule sur le câble ne dépasse pas quelques kA. Comme nous

erreicht. Während dieser Zeit dringt jedoch der Stoss nur 20 m weit in das Kabel ein, so dass 0,1 μs nach Eintreffen des Stosses beim Kabel am Kabelende eine Spannung von 4 kV herrscht, welche linear auf eine Länge von 20 m abfällt. Falls der Stoss nicht durch einen Ableiter begrenzt wird, so führt das natürlich zu einem Durchschlag in nächster Nähe des Kabelanfanges. Der dadurch abgeschnittene Stoss wird jedoch längs des Kabels rasch gedämpft, so dass die Wahrscheinlichkeit weiterer Durchschläge klein ist. Mit Spannungsableitern von genügend niedriger Stossansprechspannung lassen sich Durchschläge im Kabel zuverlässig vermeiden, falls der auf dem Kabel abfliessende Strom einige kA nicht überschreitet. Bei grossen Strömen treten jedoch aus den früher erwähnten Gründen in einer Entfernung von einigen hundert Metern von den Ableitern Spannungen auf, welche wieder zu Durchschlägen führen können.

5. Spannungsabfälle in Erdleitern

Die im Abschnitt A unter 4 beschriebenen Spannungsabfälle wirken sich bei Teilnehmerinstallationen oft verhängnisvoll aus, wenn Schutz- und Betriebserdungen an verschiedenen Punkten angeschlossen sind. Die Opfer dieser Installationspraxis sind meistens Gebührenmelder, bei denen zwischen ihre an die Betriebserde angeschlossenen Erdklemmen und den das Potential der Schutzerde führenden Sprechleitern sehr hohe Spannungen auftreten.

Es besteht tatsächlich kein plausibler Grund zu der gesetzlich verankerten Vorschrift für getrennte Erdungen, da auch bei diesen nicht zu vermeiden ist, dass das Potential der Schutzerdung über die Sprechleiter in die Installation gelangt. Wichtig ist vor allem, dass innerhalb der Installation keine hohen Potentialdifferenzen auftreten, was sich einfach und wirksam durch Führung der Betriebserde im gleichen Rohr wie die Sprechleiter und deren Anschluss an die Grobsicherung erreichen lässt. Eine andere Möglichkeit zum Schutz der Gebührenmelder usw. besteht nicht.

6. Thermische und mechanische Zerstörungen

Diese entstehen überall da, wo Durchschläge mit grosser Energie erfolgen. In Apparaten, besonders Wicklungen, genügen schon relativ kleine Energien zum Abschmelzen oder Verschweissen von Drähten, so dass dort Durchschläge unter allen Umständen vermieden werden müssen.

Ähnlich verhält es sich mit den Bleimänteln von Kabeln. Direkte Blitzschläge in das thermisch sehr empfindliche Blei führen bei einer bestimmten Intensität der Entladung zu Löchern im Mantel und damit auch zu Verbrennungen im Aderbündel. Auch bei armierten Kabeln sind Durchschläge durch das Papier–Jutepolster zwischen Armatur und Bleimantel sehr häufig. Neben thermischen Schäden wird oft auch nur der Mantel durch den starken Gasdruck eingedrückt, der bei der explosionsartigen Verbrennung der

l'avons vu plus haut, lorsque les courants sont grands, il se produit des surtensions susceptibles de provoquer des perforations à quelques centaines de mètres des parafoudres.

5. Chutes de tension dans les conducteurs de terre

Les chutes de tensions dont il a été question au chapitre A sous chiffre 4 ont souvent des effets qui peuvent être très gênants sur les installations d'abonnés lorsque les terres de protection et de service sont reliées à des points différents. Ce sont d'habitude les indicateurs de taxe qui sont victimes de ce mode d'installation, car de très hautes tensions apparaissent entre leur borne de terre, reliée à la terre de service, et les conducteurs de la ligne téléphonique qui sont au potentiel de la terre de protection.

En fait, aucune raison plausible ne milite en faveur des terres séparées imposées par les prescriptions légales, car même avec des terres séparées, il est impossible d'empêcher que le potentiel de la terre de protection ne pénètre dans l'installation par le canal des fils de la ligne de téléphone. Ce qui est important, c'est qu'aucune différence de potentiel excessive ne se produise à l'intérieur de l'installation. Pour cela il suffit que l'on tire le fil de la terre de service dans le même tube que les conducteurs de ligne et qu'on le relie au parafoudre d'entrée. Il n'y a pas d'autre moyen de protéger les indicateurs de taxe et autres appareils semblables.

6. Destructions thermiques et mécaniques

Elles se produisent partout lorsqu'il y a perforation avec grande énergie.

Il suffit même d'énergies relativement faibles pour faire fondre des fils dans les bobinages ou les souder entre eux. C'est pourquoi il faut éviter à tout prix des claquages dans les appareils.

Il en est de même pour les gaines de plomb des câbles. Des coups de foudre directs dans la gaine de plomb, qui est très sensible aux actions thermiques, y provoquent des trous lorsque la décharge atteint une certaine intensité et occasionnent aussi des brûlures au faisceau de conducteurs. Les câbles armés eux-mêmes présentent très souvent des perforations entre armure et gaine de plomb à travers la couche de jute et de papier qui les sépare. Il arrive aussi fréquemment qu'à côté des dégâts thermiques la gaine de plomb soit repoussée vers l'intérieur du câble par la pression des gaz qui se produisent lors de la combustion quasi explosive du jute [7] [8]. Cela n'a que peu d'importance et ne se remarque souvent même pas sur le service des câbles normaux à lacets symétriques isolés au papier. Par contre, les câbles coaxiaux sont très sensibles à ce genre de détérioration. En cas de déformation de la gaine de plomb, leurs conducteurs présentent des inhomogénéités excessives d'impédance ou même sont court-circuités (fig. 8). Pour éviter ces perforations, il faut établir une liaison métallique continue entre l'armature et la gaine du câble.

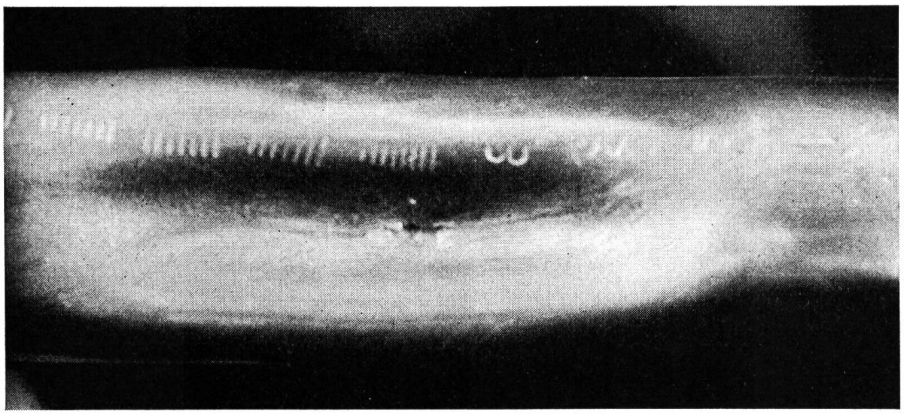


Fig. 8 a.
Durch Blitzschlag deformierter Bleimantel eines bandarmierten Koaxialkabels.
Der Mantel wurde durch den Gasdruck der beim Durchschlag explosionsartig verbrennenden Jute unter der Bandarmatur eingedrückt

Gaine de plomb d'un câble coaxial déformé par un coup de foudre.
La gaine a été enfoncée par la pression du gaz développé lors du coup de foudre par la combustion quasi explosive de la couche de jute placée sous l'armure en feuillard

Jute entsteht. [7] [8]. Bei gewöhnlichen Kabeln mit papierisolierten symmetrischen Aderpaaren treten dadurch meistens keine Störungen auf, weshalb die Beschädigung oft gar nicht bemerkt wird. Sehr empfindlich sind die Koaxialkabel, deren Leiter bei Bleimanteldeformationen unzulässige Impedanzinhomogenitäten oder sogar Kurzschlüsse erleiden (Fig. 8). Die Durchschläge lassen sich durch eine kontinuierliche metallische Verbindung zwischen Armatur und Mantel vermeiden.

C. SCHUTZMASSNAHMEN

1. Schutz von Apparaten und Installationen

Grundsätzlich sind alle Teile einer Installation gefährdet, die in Verbindung mit Leitungen stehen, die aus dem Gebäude führen. Natürlich ist der Grad der Gefährdung unterschiedlich; er ist direkt abhängig von der Gewitterhäufigkeit, wird aber auch durch die lokalen Verhältnisse beeinflusst. Besonders gefährdet sind Installationen an exponierten Punkten und in Gebieten mit schlechter Bodenleitfähigkeit. In Städten mit vorwiegend verkabeltem Netz, wo das Bodenpotential ausserdem noch durch zahlreiche andere Leitungen ausgeglichen wird, sind Schäden äusserst selten. Der Schutz von Installationen und Apparaten kann durch verschiedene Massnahmen erzielt werden.

a) Ausreichende Spannungssicherheit

Der elektrischen Festigkeit von Apparaten wurde lange Zeit nicht die nötige Beachtung gewidmet. Man

C. MESURES DE PROTECTION

1. Protection des appareils et des installations

En principe toutes les parties d'une installation qui sont reliées à des lignes sortant de l'édifice où elle se trouve sont menacées. Naturellement, le danger a des degrés; s'il dépend directement de la fréquence des orages, il varie aussi selon les circonstances locales. Les installations les plus exposées sont celles placées sur des points saillants et dans les régions où la conductibilité du sol est mauvaise. Il est très rare que des dégâts se produisent dans les installations des villes où le réseau est en majeure partie souterrain et où le potentiel du sol est égalisé par de nombreuses autres lignes.

La protection des installations et des appareils peut être obtenue par diverses contre-mesures.

a) *Sécurité suffisante à la tension*

Pendant longtemps on n'a pas accordé une attention suffisante à la résistance des appareils aux surtensions. On croyait que les parafoudres et les coupe-circuit placés aux extrémités des lignes aériennes les protégeaient suffisamment. Ainsi que nous l'avons vu, il est possible que des tensions qui ne sont limitées que par la rigidité diélectrique des câbles apparaissent à leurs extrémités. L'examen d'équipements de lignes (relais de lignes et résistances de 600 Ω) a montré que ces éléments peuvent déjà être endommagés par des chocs de tension inférieurs à 1,5 kV. Grâce à l'emploi d'autres résistances et à celui d'une technique de bo-

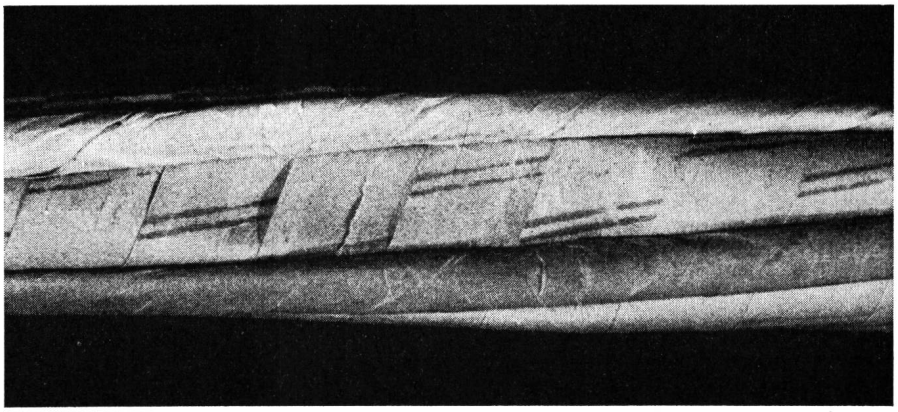


Fig. 8 b.
Beschädigtes Koaxialbündel dieses Kabels
Faisceau endommagé des conducteurs coaxiaux de ce câble

glaubte, die Apparate seien durch Ableiter und Sicherungen an den Enden der Freileitungen ausreichend geschützt.

Wie wir gesehen haben, können an den Enden der Kabel Spannungen auftreten, die nur durch die dielektrische Festigkeit der Kabel begrenzt sind. Untersuchungen an Linienausrüstungen (Linienrelais und 600-Ω-Widerstände) ergaben, dass diese Elemente schon mit Stoßspannungen von unter 1,5 kV zerstört werden konnten. Durch Verwendung eines andern Widerstandes und Anwendung einer sorgfältigen Wicklungstechnik wurde die Spannungssicherheit ohne Mehrkosten auf 5 kV erhöht. Die guten Erfahrungen mit diesen Elementen in Zentralen, bei denen früher ein Ausfall von 20 Linienrelais bei einem einzigen Gewitter keine Ausnahme war, führten dazu, im Jahre 1955 in die «Bedingungen für die Lieferung oder Erweiterung von automatischen Telephonzentralen» folgende Vorschrift aufzunehmen:

«Alle Organe, wie Relais, Widerstände, Sucher und Wähler, die sich in der Ruhelage der Stromkreise in metallischer Verbindung mit ober- oder unterirdischen Teilnehmer- oder Fernleitungen befinden können, müssen unempfindlich sein gegen Spannungsstösse mit folgenden Eigenschaften:

Scheitelwert: 5 kV, Dauer des Spannungsanstieges: 1 μs, Halbwertszeit: 50 μs. Überschläge durch die Luft zwischen Kontakten, Lötstiften, Anschlussklemmen usw. bei Spannungen von mehr als 4 kV sind zulässig.»

Da die Durchschlagsspannung der Kabel höchstens 3,5...4,5 kV beträgt, sind Zentralenausrüstungen nach den neuen Vorschriften vor Blitzschäden geschützt, ohne dass zusätzliche Ableiter in der Zentrale nötig wären.

Es scheint zunächst etwas abwegig, die teuren Kabel als Spannungsableiter für die Zentrale zu missbrauchen; aber leider können Kabel nicht durch an einem Punkt angebrachte Ableiter geschützt werden. Ableiter am Kabelende würden lediglich die Spannungsüberhöhung infolge Reflexion verhüten, ohne jedoch die Kabel über eine grössere Länge zu schützen. Ihr Wirkungsbereich ist somit zu klein, um ihre Verwendung allgemein wirtschaftlich rechtfertigen zu können.

b) *Fernhalten von Überspannungen*

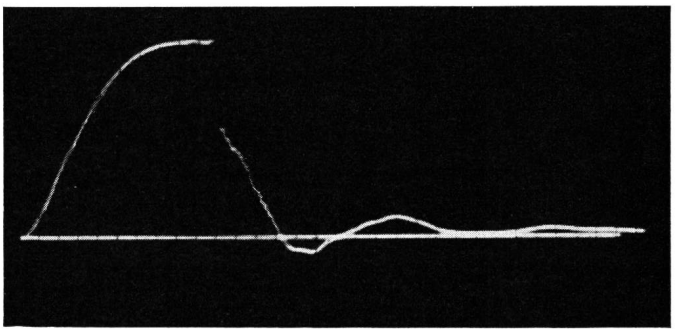
Die elektrische Festigkeit von Apparaten kann nicht so hoch getrieben werden, dass sie den an Freileitungen auftretenden Überspannungen standhalten könnten. Bei jedem Teilnehmer mit Freileitungsanschluss (mit Ausnahme kurzer Freileitungen in Städten) ist daher die traditionelle sog. B- oder Grobsicherung montiert, welche im Normalfall pro Draht mit einem Kohlespannungsableiter (1,3...1,8 kV Stossansprechspannung) versehen ist, der bei besonders gewittergefährdeten Anschlüssen durch einen vorionisierten Edelgasableiter mit 750 V (Fig. 9) Stossansprechspannung ersetzt wird [9]. Das Sorgenkind des Betriebes ist die zum Schutze der Ableiter gegen Überlastung eingebaute Sicherung, die bei Gewittern zahllose Unterbrechungen verursacht. Da kein Ableiter existiert, der einen Strom von einigen Ampère wäh-

binage soignée, il a été possible d'élever la sécurité contre les surtensions à 5 kV et cela sans frais supplémentaires. Les bonnes expériences faites avec ces éléments dans des centraux où la mise hors service de 20 relais de lignes au cours d'un seul orage n'était pas exceptionnelle ont conduit à introduire la prescription suivante dans les «conditions pour la livraison ou l'extension de centraux téléphoniques automatiques»:

«Tous les organes tels que relais, chercheurs et sélecteurs qui, dans la position «repos» des circuits, peuvent être en liaison métallique avec les lignes aériennes ou souterraines d'abonnés doivent être insensibles à des chocs de tension présentant les caractéristiques suivantes:

Tension de crête 5 kV, durée du front: 1μs, durée de mi-amplitude: 50 μs. Des claquages dans l'air entre contacts, cosses à souder, bornes de connexion, etc., sont tolérables aux tensions supérieures à 4 kV».

Comme la tension de perforation de câble atteint au plus 3,5 à 4,5 kV, les appareils des centraux sont, d'après les nouvelles prescriptions, protégés contre les dégâts dus à la foudre sans qu'il soit nécessaire d'y monter des parafoudres supplémentaires. Il peut sembler assez bizarre d'utiliser les câbles qui sont très chers comme parafoudres pour les centraux. Malheureusement, ces câbles ne peuvent pas être protégés par des parafoudres placés en un point. Des parafoudres placés à l'extrémité des câbles empêcheraient bien les surtensions dues aux réflexions, mais ils ne protégeraient pas ceux-ci sur une grande longueur. Au point de vue économique, leur rayon d'action est trop petit pour justifier leur emploi généralisé.



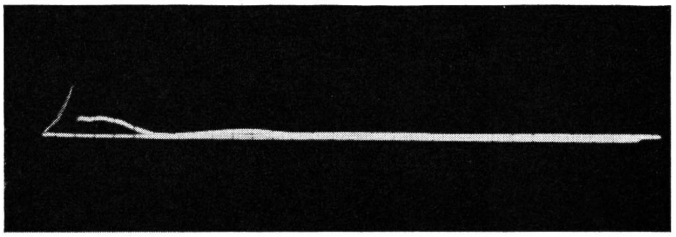


Fig. 9 a oben. Durch gewöhnlichen Edelgasableiter begrenzter Spannungsstoss 1/50 von 3 kV Scheitelwert

Choc de tension 1/50 de 3 kV de crête limité par des parafoudres à gaz rare ordinaires

9 b unten. Wirkung eines vorionisierten Ableiters unter gleichen Bedingungen.
Der Ansprechwert bei Gleichspannung ist gleich wie für den Ableiter von Oszillogramm 9a

Effet d'un parafoudre à gaz préionisé, dans les mêmes conditions. La tension d'amorçage en courant continu est la même que pour le parafoudre de l'oscillogramme fig. 9a

rend Minuten aushalten kann (z.B. bei einer Berührung der Telephonleitung mit einer Niederspannungsleitung), so kann auf die Sicherung nicht verzichtet werden. Es sind jedoch Versuche zur Verbesserung dieser Verhältnisse im Gange, über die später berichtet werden soll.

Im übrigen muss, wie schon erwähnt, die Betriebserdleitung bei Teilnehmerinstallationen unbedingt an der Grobsicherung angeschlossen werden. Damit wird natürlich auch die Unterscheidung zwischen Schutz- und Betriebserdung hinfällig.

2. Schutz von Kabeln

Beim Übergang zwischen Kabel und Freileitung ist grundsätzlich die gleiche Sicherungseinrichtung eingebaut wie beim Teilnehmer. Auch in exponierten Anlagen ist hier bei Stoßströmen bis zu einigen kA mit vorionisierten Edelgasableitern ein vollkommener Schutz möglich, falls die Ableiter periodisch geprüft werden (Fig. 10). Ein defekter Gasableiter führt jedoch auch bei einer relativ kleinen Überspannung unweigerlich zu einem Kabelschaden, weil seine Durchschlagsspannung eindeutig über der Isolationsfestigkeit der Kabel liegt. Jeder Kohleableiter ist besser als ein defekter Edelgasableiter.

Fliesst jedoch von der Freileitung ein Strom in das Kabel, der je nach Verhältnissen 3...30 kA überschreitet, so sind aus den früher erwähnten Gründen Durchschläge im Kabel auch bei guten Ableitern nicht ver-

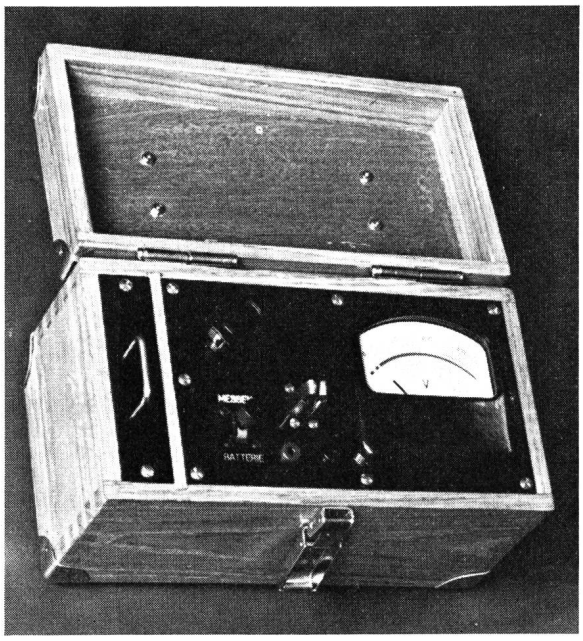


Fig. 10. Prüfgerät für Edelgasableiter zum Messen der Ansprechgleichspannung. Messbereich 0...350 V
Die Stossansprechspannung wird bei der Abnahmekontrolle der Ableiter gemessen und muss später nicht mehr nachgeprüft werden

Appareil de contrôle pour les parafoudres à gaz rare servant à mesurer la tension continue d'amorçage en courant continu. Plage de mesure 0 à 350 V.
Le contrôle de la tension d'amorçage en régime de choc se fait à la livraison des parafoudres; il n'est pas nécessaire de le répéter

b) *Mesures préventives contre les surtensions*

La résistance des appareils aux surtensions ne peut pas être poussée au point qu'elle supporte celles qui se produisent sur les lignes aériennes. C'est pourquoi toutes les installations d'abonnés alimentées par de telles lignes (à l'exception de lignes aériennes courtes dans les villes) sont précédées d'un parafoudre qui peut être, soit du modèle traditionnel à plaques en charbon relié à chaque fil de ligne (tension d'amorçage 1,3 à 1,8 kV), soit, dans le cas des raccordements particulièrement menacés, d'un modèle à cartouche à gaz rare préionisé ayant une tension d'amorçage de choc de 750 V (fig. 9) [9]. Ce qui cause le plus de soucis à l'exploitation, ce sont les coupe-circuit montés pour protéger les parafoudres contre les surcharges. En cas d'orage, ils occasionnent des interruptions sans nombre. Comme aucun parafoudre actuellement existant ne peut supporter un courant de quelques ampères pendant plusieurs minutes (par exemple dans le cas où une ligne de téléphone entre en contact avec une ligne de distribution électrique à basse tension), il n'est pas possible de renoncer aux coupe-circuit.

Des essais sont cependant en cours pour tenter d'améliorer cette situation. Ils feront plus tard l'objet d'une communication.

En outre, il faut absolument, ainsi qu'on l'a mentionné plus haut, relier la terre de service des installations d'abonnés aux parafoudres d'entrée. Par là même, la distinction entre terre de service et terre de protection devient caduque.

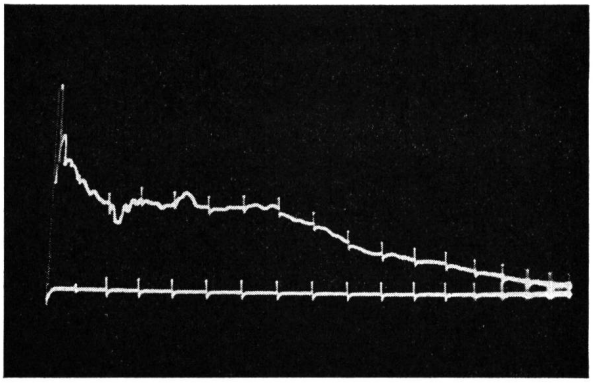
2. Protection des câbles

Au point de transition entre câble et ligne aérienne, on monte en principe le même dispositif de protection que chez l'abonné. Il est aussi possible ici d'assurer une protection complète contre les chocs de courant allant jusqu'à quelques kA au moyen de parafoudres à gaz rare préionisé, à condition que ceux-ci soient contrôlés périodiquement (fig. 10). En effet, un parafoudre à gaz défectueux conduit immanquablement à un dégât au câble s'il se produit des surtensions même relativement faibles, car sa tension d'amorçage dépasse nettement celle du câble. Mieux vaut n'importe quel parafoudre au charbon qu'un parafoudre à gaz rare défectueux!

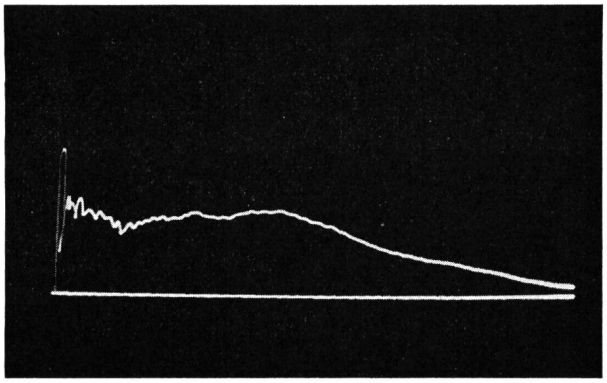
Si cependant un courant dépassant, suivant les circonstances, 3...30 kA s'écoule de la ligne aérienne au câble, il est impossible à cause des raisons exposées précédemment d'éviter des claquages dans ce dernier, même avec de bons parafoudres. Il n'y a que deux moyens pour éviter de tels dérangements: l'emploi de câbles renforcés contre la foudre ou une réduction du courant dans la gaine, soit par des parafoudres avancés, soit par des conducteurs de garde que l'on place le long du câble.

a) *Conducteurs de garde*

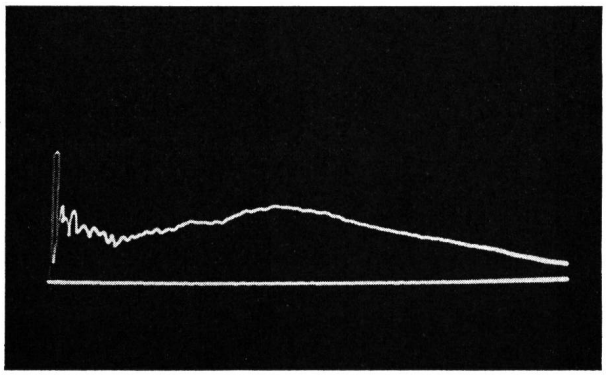
On se sert comme conducteurs de dérivation de deux bandes de fer galvanisé que l'on place à une distance de 20 à 30 cm l'une de l'autre et à environ 20 cm au-



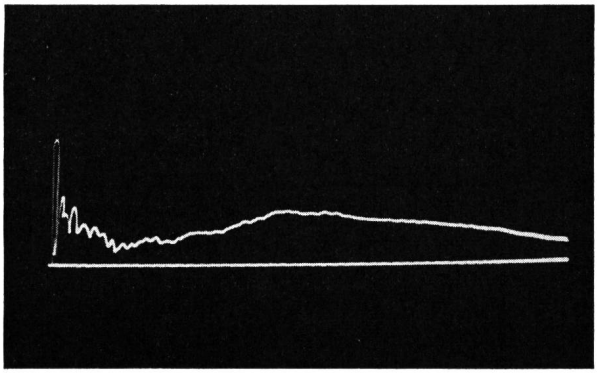
Rv = ∞



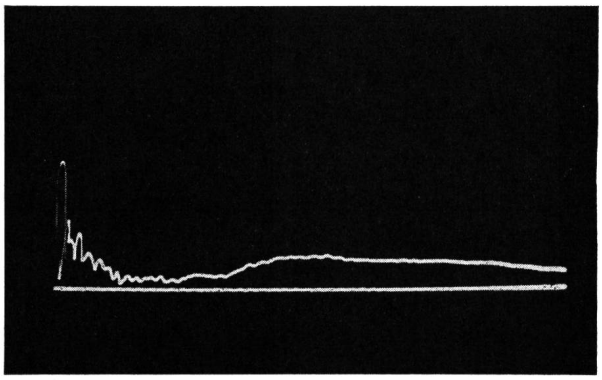
Rv = 100 Ω



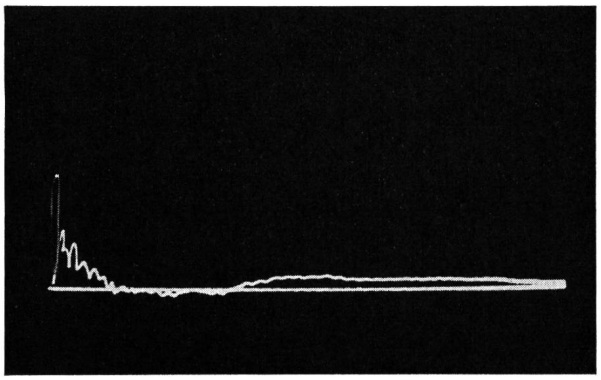
Rv = 30 Ω



Rv = 10 Ω



Rv = 4 Ω



Rv = 1 Ω

Fig. 11. Einfluss des Erdungswiderstandes eines Vorableiters in 465 m Abstand vor einer Kabelstange auf den in das Kabel übertretenden Strom.
Die wegen der Induktivität des Erdnetzes (Wasserleitung mit 25 m Zuleitung zum Vorableiter) nicht stark reduzierte Anfangsspitze ist für die Schutzwirkung wegen ihres kleinen Energieanteils nicht massgebend, wesentlich ist in erster Näherung die gesamte Ladung, die erst mit relativ kleinen Erdungswiderständen merklich beeinflusst werden kann. Zeitmarken 10 μs

Fig. 11. Influence de la résistance de la prise de terre d'un parafoudre avancé situé à 465 m d'un point de transition sur le courant pénétrant dans le câble
En raison de l'inductivité du réseau de terre (conduite d'eau et 25 m de conducteur jusqu'au parafoudre) la pointe initiale n'est pas très réduite. Cela n'a pas d'influence sur l'efficacité de la protection à cause de la faible énergie de cette pointe. En première approximation c'est la charge totale qui est importante; on ne peut agir sur celle-ci de manière appréciable que si la résistance de terre est relativement assez petite. Impulsions de temps 10 μs

meidbar. Zur Verhütung dieser Störungen bleiben nur zwei Möglichkeiten: blitzsichere Kabel oder Verringerung des Mantelstromes durch Vorableiter oder Entlastungsleiter, welche dem Kabel entlang geführt werden.

a) Entlastungsleiter

Als Entlastungsleiter kommen zwei verzinkte Eisenbänder in Frage, welche in ungefähr 30 cm gegenseitigem Abstand, etwa 20...30 cm über dem Kabel, ver-

dessus du câble. Le courant qui circule dans le câble est réduit à peu près de moitié par ce procédé. Grâce à cela, le nombre de défauts diminue sensiblement. Il faut cependant être conscient du fait que les conducteurs de garde ne sont dans la plupart des cas pas assez efficaces pour assurer une protection suffisante.

b) *Parafoudres avancés*

Lorsqu'un câble est relié à une longue ligne aérienne, dont la partie éloignée est très exposée aux coups

legt werden. Dadurch wird der Strom im Kabel ungefähr auf die Hälfte reduziert, wodurch sich die Zahl der Kabelfehler merklich verringern lässt. Man muss sich jedoch bewusst sein, dass sich damit in den meisten Fällen kein ausreichender Schutz erzielen lässt.

b) *Vorableiter*

Ist an ein Kabel eine lange Freileitung angeschlossen, deren entfernterer Teil sehr exponiert ist, so kann man einige hundert Meter vor der Kabelstange Vorableiter einbauen, welche einen Teil des Blitzstromes vor Erreichen des Kabels zur Erde ableiten. Damit sich ein Vorableiter lohnt, muss er den Strom wenigstens auf die Hälfte reduzieren. Der Reduktionsfaktor ist natürlich abhängig vom Erdungswiderstand der Vorableiter und der asymmetrischen Impedanz der Leitung zwischen Vorableiter und Überführungsstange. Diese Impedanz hängt nun sehr stark vom Frequenzspektrum des Stromes ab, so dass man nicht von einem eindeutigen Reduktionsfaktor sprechen kann.

Figur 11 zeigt die Oszillogramme des Reststromes bei der Überführungsstange für Vorableiter mit unterschiedlichen Erdungswiderständen. Der Reduktionsfaktor ergibt sich aus dem Verhältnis der Spannungen im Kabel mit und ohne Vorableiter. Diese Spannungen lassen sich für beliebigen zeitlichen Verlauf der Stoßströme durch graphische Integration ermitteln [10]; sie sind in unserem Fall aber mit genügender Genauigkeit proportional den Ladungen der Stossströme.

Die Reduktionsfaktoren eines Vorableiters mit 465 m Abstand von der Überführungsstange sind in Figur 13 dargestellt. Diese Messungen wurden an einem Kabel in unmittelbarer Nähe einer Zentrale vorgenommen. In den meisten Fällen liegen die Verhältnisse in der Praxis etwas günstiger, weil sich zum Leitungswiderstand die induktive Komponente der Impedanz des Kabels gegen Erde addiert, was einer Verlängerung des Vorableiterabstandes gleichkommt.

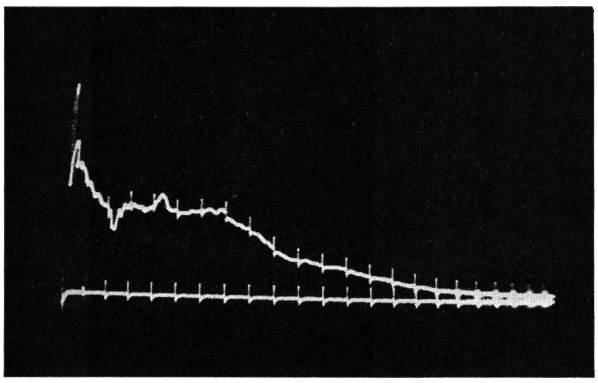
de foudre, on peut monter des parafoudres avancés à quelques centaines de mètres du point de transition. Ces appareils dérivent à la terre une partie du courant de foudre avant qu'il n'atteigne le câble. Pour que l'installation de parafoudres avancés soit rentable, il faut qu'ils réduisent le courant dangereux à moins de la moitié de sa valeur primitive. Le facteur de réduction dépend naturellement de la résistance de la terre du parafoudre et de l'impédance asymétrique de la ligne entre celui-ci et le point de transition. Mais cette impédance dépend très fortement de la composition spectrale du courant de sorte qu'il n'est pas possible de parler d'un facteur de réduction bien défini.

La figure 11 montre des oscillogrammes du courant résiduel mesuré auprès d'un point de transition avec des parafoudres avancés reliés à des terres de résistances diverses. On obtient le facteur de réduction en formant le rapport des tensions dans le câble avec et sans parafoudre. Il est possible de calculer ces tensions au moyen d'une intégration graphique pour n'importe quelle forme de courant de choc [10]. Cependant, dans notre cas, on peut les considérer avec une précision suffisante comme proportionnelles aux charges des courants de choc.

La figure 13 représente les facteurs de réduction d'un parafoudre avancé situé à 465 m du point de transition. Ces mesures furent effectuées sur un câble à proximité immédiate d'un central. Dans la plupart des cas pratiques, les circonstances sont un peu plus favorables, car la composante inductive de l'impédance du câble par rapport à la terre s'ajoute à la résistance de la ligne et ceci est équivalent à un accroissement de la distance du parafoudre avancé. On voit tout de même que l'installation de parafoudres avancés n'a pas de sens à des distances inférieures à 100 m, si les résistances de terre ne sont pas suffisamment petites (fig. 12).

Il est très difficile d'obtenir une faible résistance de terre dans les régions où le sol a une mauvaise con-

a



b

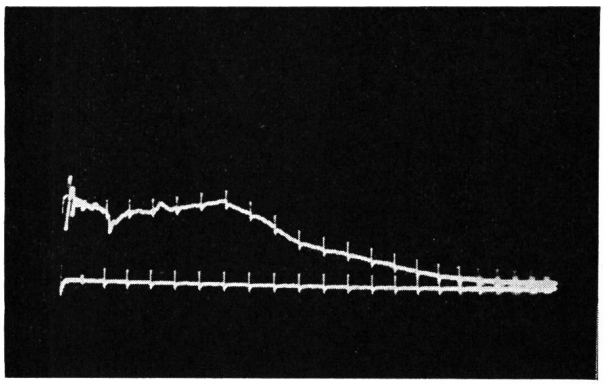


Fig. 12. Einfluss des Erdungswiderstandes eines Vorableiters mit 20 Ω Erdungswiderstand 80 m vor der Kabelstange; Reduktionsfaktor etwa 0,9, also unbedeutend.
Die Kabelstange befand sich in unmittelbarer Nähe einer Zentrale, deren Erdungswiderstand (einschliesslich Messleitungen und -widerständen) 1,9 Ω betrug. Bei einem längern Kabel würde sich der Reduktionsfaktor noch etwas verbessern

Fig. 12. Influence de la résistance de terre d'un parafoudre avancé.
Avec une résistance de 20 Ω et à une distance de 80 m du point de transition le facteur de réduction est de 0,9 environ, c'est-à-dire insignifiant.
Le point de transition se trouvait à proximité immédiate d'un central dont la résistance de terre (y compris la ligne et les résistances de mesure) valait 1,9 Ω. Avec un câble plus long le facteur de réduction serait un peu meilleur

Man sieht aber gleichwohl, dass Vorableiter in weniger als 100 m Distanz nur bei genügend kleinen Erdungswiderständen zweckentsprechend sind (Fig. 12).

In Gebieten von schlechter Bodenleitfähigkeit ist ein kleiner Erdungswiderstand äussert schwierig zu erzielen. Daraus ergeben sich grosse Vorableiterabstände mit dem Nachteil, dass ein beträchtlicher Teil der Leitung nicht geschützt ist. Im weitern besteht die Gefahr von Rücküberschlägen bei Blitzen in derNähe der Vorableiter. Vorableiter sind deshalb vor allem dort angebracht, wo das letzte Teilstück der Freileitung von einigen hundert Meter Länge durch seine topographische Lage relativ gut vor Blitzschlägen geschützt ist und die Leitung dann in gefährdete Gebiete führt (z. B. Bergleitungen).

Vorableiter müssen also in ausreichendem Abstand von der Überführungsstange gebaut werden; ferner müssen exponierte Stellen (Bergrücken usw.) nach Möglichkeit vermieden werden.

Für einzelne Schlaufen werden normalerweise Niederspannungsableiter eingebaut, für Linien mit mehreren Schlaufen stellt man parallel zur Leitung geschaltete Kabelstangen mit Kohleableitern auf. Lässt sich jedoch kein Erdungswiderstand unter etwa 25 Ω erreichen, so entsteht am Erdungswiderstand ein derartiger Spannungsabfall, dass sich die Kohleableiter mit ihren relativ kleinen Ansprechspannungen nicht lohnen. Es genügt dann, wenn auf dem Isolatorengerüst einfache Grobfunkenstrecken mit einer Schlagweite von etwa 10 mm eingebaut werden.

c) *Blitzsichere Kabel*

Wir haben gesehen, dass, bei gleichen topographischen Verhältnissen, Kabel in Böden von schlechter Leitfähigkeit ebenso durch Einschläge gefährdet sind wie Freileitungen. Nun haben natürlich Vorableiter auf die Wirkung direkter Einschläge ins Kabel keinen Einfluss, dagegen kann mit Entlastungsleitern längs des Kabels eine beschränkte Schutzwirkung erzielt werden.

Liegt jedoch der spezifische Widerstand des Bodens um 10000 Ωm, so kann von einem wirksamen Schutz des Kabels durch diese Massnahme nicht gesprochen werden. Hier kann der Schutz der Übertragungsleitungen nur durch ein Spezialkabel realisiert werden.

Als erstes drängt sich eine Verbesserung der Isolation auf. Um aber bei einem kleinen Kabel (20 × 2) bei $\varrho = 10000\ \Omega$m eine Widerstandsfähigkeit gegen am Kabelende eintretende Ströme von 50 kA (Halbwertszeit 50 μs) zu erreichen, wäre eine Stoßspannungsfestigkeit von 60 kV nötig (Fig. 6). Während bei Kabeln, deren Adern alle durchgehend sind, eine erhöhte Bündelisolation genügt, können die Spannungen bei Teilnehmerkabeln auch innerhalb des Aderbündels auftreten. Es wird kaum möglich sein, diese Spannungssicherheit für Telephonkabel zu erreichen. Hingegen kann mit Polythen eine Isolation verwirklicht werden, die einer Stoßspannung von 10 kV standhält. Somit muss die entstehende Spannung durch andere Mittel auf diesen Wert reduziert werden.

ductibilité. Il faut placer les parafoudres avancés à une distance importante avec le résultat qu'une portion importante de la ligne n'est pas protégée. D'autre part, il y a danger d'amorçage en retour si la foudre tombe au voisinage du parafoudre.

L'emploi de parafoudres avancés se justifie donc avant tout là où le dernier tronçon de la ligne aérienne traverse sur quelques centaines de mètres un terrain relativement bien protégé par rapport à la foudre, alors que le reste de la ligne passe dans une région exposée (par exemple lignes de montagne).

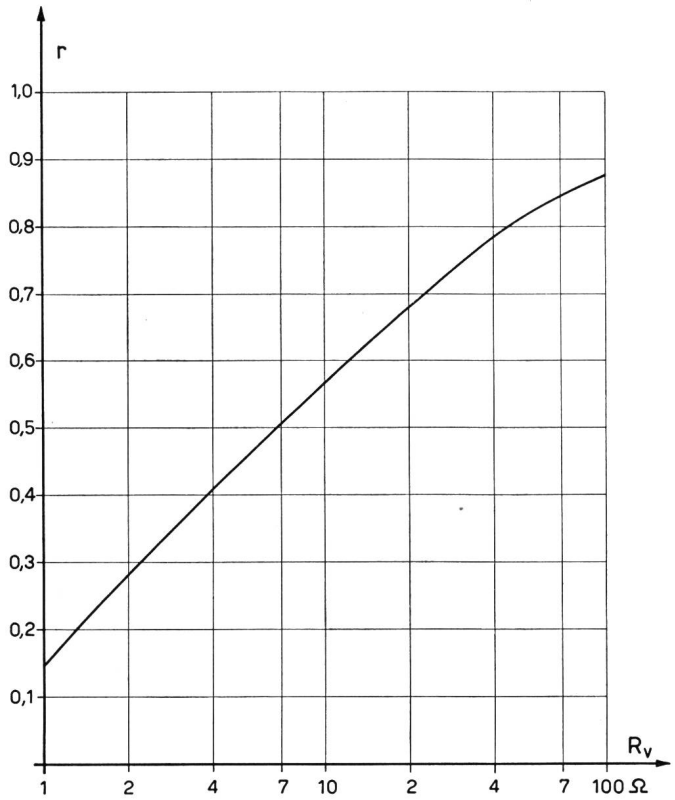


Fig. 13. Reduktion der Spannungsbeanspruchung eines Kabels durch einen Vorableiter in 465 m Abstand von der Kabelstange (Auswertung der Oszillogramme Fig. 11)
Réduction de la sollicitation d'un câble à la tension obtenue par un parafoudre avancé situé à 465 m du point de transition (D'après les oscillogrammes de la fig. 11)

Les parafoudres avancés doivent donc être montés à une distance suffisante du point de transition, en outre il faut éviter de les placer dans des endroits exposés (dos de montagnes, etc.).

Lorsqu'il n'y a qu'un seul lacet à protéger, on monte normalement des parafoudres à basse tension. Dans le cas de plusieurs lacets, on place en parallèle à la ligne des poteaux-colonnes équipés de parafoudres à charbon. S'il n'est cependant pas possible d'obtenir une résistance de terre inférieure à 25 Ω, l'usage de parafoudres à charbon, qui ont une tension d'amorçage relativement faible, ne se justifie pas parce que la chute de tension dans cette résistance est beaucoup trop grande. Il suffit alors de monter sur les supports des isolateurs de simples éclateurs d'une dizaine de mm d'écartement.

den. Das lässt sich mit einem auf 0,3 Ω/km verkleinerten Mantelwiderstand erzielen. Die zum Schutz des Kabels gegen thermische Schäden ohnehin erforderliche Armatur, die in fortlaufender leitender Verbindung mit dem Mantel stehen muss, setzt als Flach- oder Runddrahtarmatur den Längswiderstand eines Kabels mit 20 Paaren auf etwa 1 Ω/km herunter. Dann ist für ein Kabel $20 \times 2 \times 0{,}8$ noch ein Kupferquerschnitt von etwa 40 mm² nötig, der dem Mantel parallel geschaltet werden muss. Das gilt jedoch nur für das Kabelende (bei $\varrho = 10000$ Ωm ungefähr 1,5 km), für den übrigen Teil der Kabelanlage genügt der doppelte Widerstand und somit ungefähr 12 mm² Kupfer. Für Kabel mit grösserer Aderzahl oder bei besserer Bodenleitfähigkeit wird der Aufwand entsprechend kleiner.

Wichtig ist dabei, dass beim Übergang von hochisolierten auf normale Kabel Ableiter eingesetzt werden, ebenso auch in der Zentrale, wenn das Spezialkabel direkt eingeführt wird. Eine besonders günstige Lösung ergibt sich bei Verwendung von Kabeln mit Aluminiummänteln, wobei allerdings die sich widersprechenden Forderungen von Erdung und Korrosionsschutz koordiniert werden müssen.

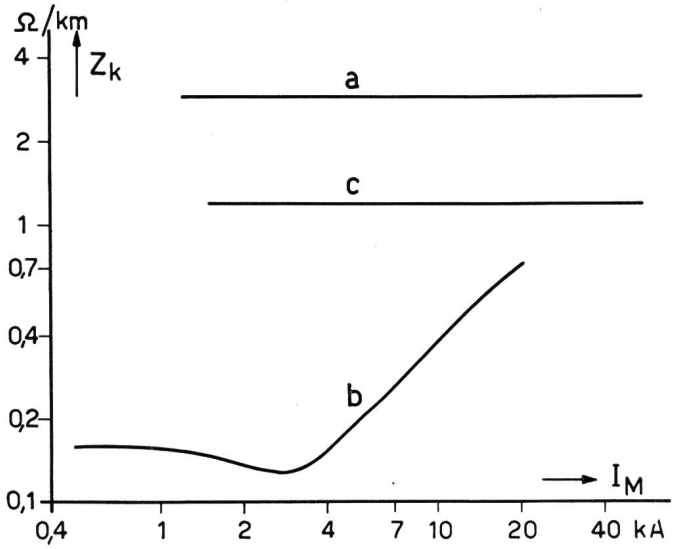


Fig. 14. Einfluss einer kombinierten Flachdraht-/Bandarmatur auf die Längsspannung eines von einem Stoßstrom durchflossenen Kabels
$Z_K = U_L/I_M$ (Kopplungsimpedanz)
I_M = Stoßstrom 10/60 in kA
U_L = Längsspannung kV/km
a: Kabel $10 \times 2 \times 0{,}6$ C (bandarmiert)
b: Kabel $10 \times 2 \times 0{,}6$ CF (bandarmiert mit aussenliegender Flachdrahtarmatur)
c: Kabel mit gleichem Widerstand wie b), jedoch ohne kombinierte Armatur. Die Differenz zwischen b und c ist die Wirkung des Skineffektes

Influence d'une armure combinée feuillard-fil méplat sur la tension longitudinale d'un câble parcouru par un choc de courant
$Z_K = U_L/I_M$ impédance de couplage
I_M = Choc de courant 10/60 en kA
U_L = Différence de potentiel longitudinale kV/km
a: Câble $10 \times 2 \times 0{,}6$ C (armure de feuillard)
b: Câble $10 \times 2 \times 0{,}6$ CF (armure de feuillard renforcée par une armature extérieure en fils méplats
c: Câble ayant la même résistance que b mais sans armure combinée. La différence entre b et c est due à l'action de l'effet pelliculaire

c) Câbles renforcés contre la foudre

Nous avons vu que lorsque le sol a une faible conductivité, les câbles sont aussi exposés à des coups de foudre que les lignes aériennes dans les mêmes conditions topographiques. Les parafoudres avancés n'ont alors aucune efficacité contre les coups directs; les conducteurs de garde placés le long des câbles sont meilleurs et les protègent partiellement.

Si, cependant, la résistance spécifique du sol est de l'ordre de 10000 Ωm, cette protection n'est pas assez efficace. Il faut avoir recours à un câble spécial pour protéger les lignes de télécommunication.

Une amélioration de l'isolation s'impose en premier lieu. Toutefois, pour qu'un petit câble (20×2) soit susceptible de supporter des chocs de 50 kA (durée de demi-amplitude 50μs) entrant à son extrémité, lorsque la résistivité du sol $\varrho = 10000$ Ωm, il lui faut pouvoir résister à des chocs de tension de 60 kV (fig. 6). En outre, alors qu'une isolation renforcée du faisceau suffit dans les câbles dont tous les circuits vont d'une extrémité à l'autre, dans les câbles d'abonnés, il se peut que des surtensions apparaissent aussi à l'intérieur des faisceaux de conducteurs. Il doit être presque impossible d'atteindre cette sécurité contre les surtensions avec un câble de téléphone. Le polythène permet de réaliser une isolation qui supporte une tension de choc de 10 kV. Il faut donc utiliser des moyens qui réduisent les tensions dangereuses à cette valeur. Avec des gaines de câbles de résistance réduite à 0,3 Ω/km, on obtient l'effet voulu. L'armure qui est déjà nécessaire pour protéger le câble contre des dégâts thermiques et qui doit être en liaison métallique avec la gaine sur toute sa longueur ramène à environ 1 Ω/km la résistance longitudinale d'un câble à 20 paires, ceci, aussi bien si elle est réalisée en fils méplats qu'en fils ronds. Pour un câble $20 \times 2 \times 0{,}8$, il faut donc en parallèle avec la gaine une section d'environ 40 mm² de cuivre en plus de ce qui précède. Cela n'est cependant nécessaire que pour l'extrémité du câble (environ 1,5 km, $\varrho = 10000$ Ωm). Pour le reste on peut se contenter d'une résistance double et 12 mm² de cuivre suffisent.

L'importance des moyens à mettre en œuvre est proportionnellement moindre pour les câbles ayant un plus grand nombre de lacets ou lorsque la conductibilité du sol est meilleure.

Il est important d'insérer des parafoudres au passage entre le câble à haute isolation et le câble normal de même que, naturellement, dans le central lorsque le câble renforcé y est introduit directement. Les câbles à gaine d'aluminium offrent une solution particulièrement favorable, bien qu'il faille, dans ce cas, tenir compte des exigences opposées de la mise à terre et de la protection contre la corrosion.

On peut encore réduire les tensions dangereuses en utilisant l'effet pelliculaire de la gaine: un câble placé dans un canal en fer zorès muni de joints électriques est très bien protégé contre la foudre. Il est important pour que cette protection soit efficace que les pro-

Eine weitere Möglichkeit zur Verminderung der Spannung besteht in der Ausnützung des Skineffektes des Kabelmantels. Verlegt man ein Kabel in einem Zoreskanal mit Stossverbindern, so ist es gegen Blitzschäden ausgezeichnet geschützt. Wichtig ist dabei, dass Formstücke usw. ebenfalls zur Stromleitung herangezogen und nicht einfach überbrückt werden, ebenso muss die Verbindung mit Sicherungskasten zuverlässig ausgeführt werden. Die Anlage muss ganz sorgfältig montiert werden, weil schon eine einzige defekte Stossverbindung die Schutzwirkung aufheben kann.

Versieht man ein bandarmiertes Kabel zusätzlich mit einer aussenliegenden Flach- oder Runddrahtarmatur, so wird der Strom aus dem Kabelmantel in die Armatur verdrängt. Man erzielt auf diese Weise bei kleineren Stoßströmen eine sehr starke Reduktion der Spannung Aderbündel–Mantel; leider ist die Wirkung bei den vor allem interessierenden Strömen von mehr als 10 kA bei kleineren Kabeln nicht mehr gross (Fig. 14).

Bei allen diesen Lösungen ist wichtig, dass das Kabel beim Überführungspunkt mit Ableitern ausgerüstet wird, welche der Durchschlagsspannung der Kabel angemessen sind.

Ein ausreichender Schutz bestehender Kabelanlagen gegen grosse Mantelströme ist wirtschaftlich nicht realisierbar. Es ist deshalb von grosser Bedeutung, beim Bau von Neuanlagen in exponierten Zonen geeignete Kabel zu verlegen.

Mit Hilfe von Fig. 6 lässt sich bei einem beliebigen spezifischen Erdwiderstand der zulässige Widerstand des Mantels angeben, damit bei einem Stoss von 50 kA und 50 μs Halbwertszeit eine bestimmte Spannung nicht überschritten wird. Ein Schutz gegen die sehr seltenen Blitze mit grösserer Intensität wird sich wegen des rasch steigenden Aufwandes nur in Ausnahmefällen oder bei besserer Erdleitfähigkeit lohnen.

filés de jonction soient utilisés pour conduire le courant et ne soient pas simplement pontés. Il faut également que la liaison aux boîtes à fusibles soit exécutée soigneusement. Du reste, toute l'installation doit être montée avec soin, car il suffit d'un seul joint défectueux pour que la protection soit inopérante.

Lorsque l'on enrobe un câble à armure de feuillard d'une seconde armure en fil rond ou plat, le courant dans la gaine de plomb diminue pour se concentrer dans l'armure. De cette manière, on obtient une très forte réduction de la tension entre gaine et faisceau de conducteurs pour les chocs de faible intensité. Malheureusement, l'efficacité de ce procédé n'est plus très grande dans le cas qui nous intéresse le plus: celui des courants supérieurs à 10 kA avec de petits câbles (fig. 14). On ne saurait trop insister sur l'importance de munir le câble de parafoudres aux points de transition, parafoudres qui doivent être adaptés à la tension de perforation du câble.

Il n'est économiquement pas possible de réaliser une protection suffisante des installations existantes contre les forts courants de gaine. Mais il est très important d'équiper les nouvelles installations de câbles appropriés dans les zones exposées aux orages: la figure 6 permet de déterminer, en fonction de la résistance spécifique du sol, la valeur de la résistance que doit avoir la gaine d'un câble pour qu'une surtension donnée ne soit pas dépassée. Ce n'est qu'exceptionnellement ou lorsque la conductibilité du sol est particulièrement bonne, qu'une protection contre les rares éclairs de très grande intensité se justifie, car l'importance des moyens à mettre en œuvre croît très rapidement.

Bibliographie

[1[*Berger, K.* Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1947...1954 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV **46** (1955), S. 193, 405.

[2] — Das Verhalten von Erdungen unter hohen Stoßströmen. Bull. SEV **37** (1946), S. 197...211.

[3] *Sunde, E. D.* Earth Conduction Effects in Transmission Systems. New York 1949. S. 267.

[4] — loc. cit., S. 259...261.

[5] — loc. cit., S. 305 ff.

[6] *Meister, H.* Das Verhalten von Schmelzsicherungen bei Stoßströmen. Techn. Mitt." PTT 1954, Nr. 8, S. 292.

[7] *Royal, W.C.* Modified Tape Armor and Lepeth Sheath Cable. Bell Lab. Rec. **28** (1950), S. 241.

[8] *Bodle, D.W.* Crushing of Buried Cable by «Cold» Lightning. Bell Lab. Rec. **34** (1956), S. 93.

[9] *Meister, H.* loc. cit., S. 289.

[10] *Sunde, E. D.* loc. cit., S. 307 ff.