

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = 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 Telegrafienbetriebe

Band: 45 (1967)

Heft: 5

Artikel: Wie brennt der Blitz Löcher in Kabel-Bleimäntel? = Comment la foudre perfore-t-elle les gaines de plomb des câbles?

Autor: Meister, Hans / Utz, Willy

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-874875>

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: 30.04.2026

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

Wie brennt der Blitz Löcher in Kabel-Bleimäntel?

Comment la foudre perfore-t-elle les gaines de plomb des câbles?

Hans MEISTER und Willy UTZ, Bern

551.594.221 : 621.315.221.5

Zusammenfassung. Die durchgeschmolzenen Löcher an den Einschlagsstellen von Blitzen in den Bleimänteln unarmerter Kabel entstehen nicht durch hohe Stossströme, sondern durch länger dauernde, verhältnismässig kleine Ströme, wie sie oft in der Folge von Blitzen auftreten. Die Versuche zeigten, dass Bleikabel mit Thermoplastmantel weit mehr gefährdet sind als Kabel mit einer Umhüllung auf Papier-Bitumen-Jute-Basis.

Résumé. Les perforations de gaines de plomb de câbles non armés aux points de décharge atmosphérique ne résultent pas de courants de chocs élevés, mais de courants plus faibles, de durée plus longue, tels qu'ils apparaissent fréquemment à la suite de coups de foudre. Les essais ont montré que les câbles sous plomb avec enveloppe thermoplastique sont beaucoup plus exposés à de telles détériorations que les câbles à enveloppe de papier, bitume et jute.

In che modo il fulmine può perforare le guaine di piombo dei cavi?

Riassunto. I fori prodottisi in seguito a fusione della guaina di piombo dei cavi senza armatura, nei punti colpiti dalla scarica atmosferica, non sono provocati da correnti elevate bensì da altre più durevoli, relativamente piccole, che si manifestano spesso come conseguenza a colpi di fulmine. Le prove effettuate hanno permesso di accertare che i cavi di piombo con rivestimento termoplastico sono più esposti a tali inconvenienti che non quelli con rivestimento a base di carta, bitume e iuta.

1. Problem

Die Antwort auf diese triviale Frage lautet natürlich: mit der thermischen Energie des Lichtbogens am Ansatzpunkt des Blitzes am Kabel. Und doch hatten wir einige Gründe, uns, neben den komplizierteren Problemen, die der Blitz aufgibt, auch ein wenig mit dieser Frage zu beschäftigen.

Blitzschäden an Bleimänteln fallen immer wieder durch Löcher auf, die wie herausgestanzt aussehen (Figur 1). Oft ist das bitumengetränkte Papier des Korrosionsschutzes auf dem Kabel an den Konturen des Loches überhaupt nicht angebrannt, und auch die Bündelisolierung unter dem Bleimantel zeigt manchmal kaum Brandspuren. Es kann allerdings auch vorkommen, dass ein grosser Teil der Adern weggeschmolzen ist.

Da das Bleigefüge in unmittelbarer Nähe des Loches kaum Anzeichen einer thermisch bedingten Strukturänderung zeigt,

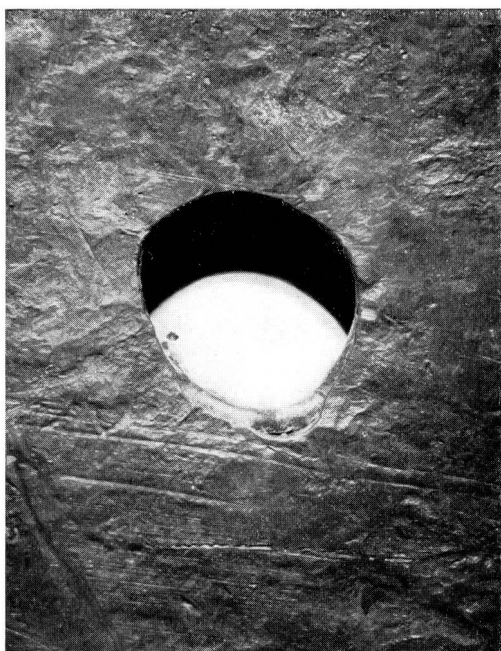


Fig. 1
Kabelbeschädigung durch Blitzschlag. Nur am linken Rand des Loches ist eine Schmelzspur zu erkennen
Câble endommagé par un coup de foudre. Une trace de fusion n'est reconnaissable que sur le bord gauche du trou

1. Problème

Cette question banale appelle tout naturellement la réponse suivante: par l'énergie thermique de l'arc électrique au point d'impact de la foudre sur le câble. Et cependant nous avons quelques motifs de nous occuper, en plus des problèmes plus compliqués que nous pose la foudre, quelque peu aussi de cette question.

Les dommages causés par la foudre aux gaines de plomb surprennent toujours par les trous qui paraissent avoir été faits à l'emporte-pièce (figure 1). Souvent, le papier imprégné de bitume de la protection contre la corrosion n'est absolument pas attaqué sur le câble aux contours du trou et l'isolation des faisceaux sous la gaine de plomb ne montre parfois presque aucune trace de combustion. Mais il peut aussi arriver qu'une grande partie des conducteurs soient fondus.

Vu que la structure du plomb à proximité immédiate du trou ne présente que rarement l'aspect d'une modification de structure provoquée par la chaleur, les trous doivent se produire en un laps de temps pendant lequel la conduction de chaleur peut être négligée. Ainsi, on était partiellement d'avis que ces trous ne pouvaient se produire qu'en une fraction de temps de 100 μ s au maximum avec des chocs de courant nécessairement élevés. Il existe apparemment ici un critère précis permettant de distinguer entre les dommages causés par la foudre et les effets du courant fort, dont la durée varie entre quelques centièmes de secondes et quelques secondes.

Des trous plus petits encore se manifestaient sur des câbles qui portaient une gaine thermoplastique par-dessus la gaine de plomb et qui étaient posés dans des galeries à écoulement libre ou en charge d'usines hydroélectriques [1, 2]. A la suite d'orages, il se produisait des trous de 1 mm de diamètre environ dans la gaine thermoplastique, de 2 mm de diamètre dans la gaine de plomb sous-jacente (figure 2). Des trous aussi petits ayant été constatés pour la première fois, nous décidâmes de nous pencher plus attentivement sur le problème de traces de fusion. Il nous parut alors tout indiqué d'étendre les essais à une gamme de courants aussi vaste que possible.

2. Essais

Nous commençâmes par des courants de 50...100 kA et d'environ 50 μ s de durées de mi-amplitude, qui provoquaient des fusions superficielles sur de grandes surfaces (figure 3). La réduction des valeurs de crête du courant révéla que la densité de courant restait en quelque sorte constante: elle était toujours



Fig. 2
Loch von 2 mm Durchmesser im Bleimantel eines Kabels mit Thermoplastumhüllung (Fernmeldekabel in Wasserstollen)
Trou de 2 mm de diamètre dans la gaine de plomb d'un câble à enveloppe thermoplastique (câble téléphonique dans une galerie d'eau)

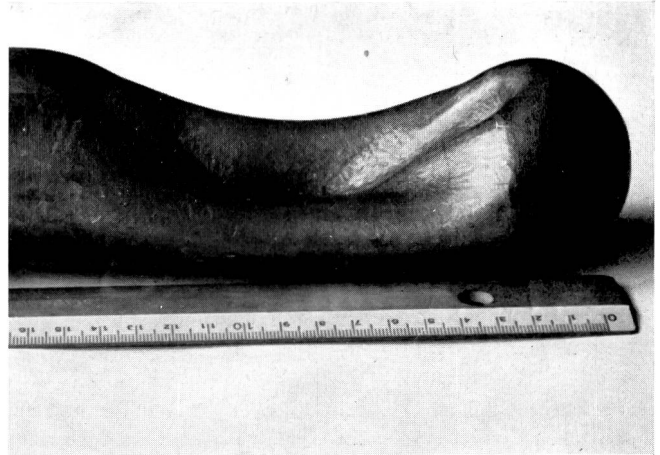


Fig. 4
Wirkung eines Stossstromes von 50 kA Scheitelwert und 100 μ s Dauer auf ein Bleirohr bei Entladung unter Wasser
Effet d'un choc de courant de 50 kA de crête et de 100 μ s de durée sur un tuyau en plomb lors d'une décharge sous l'eau

müssen die Löcher in einer Zeit entstehen, während der die Wärmeleitung vernachlässigbar ist. *So entstand teilweise die Auffassung, dass diese Löcher nur in einer Zeit von höchstens 100 μ s mit entsprechend hohen Stossströmen entstehen können.* Scheinbar liegt hier ein eindeutiges Kriterium vor, um Blitzschäden von Starkstromwirkungen, deren Dauer zwischen einigen Hundertstelssekunden und einigen Sekunden liegt, zu unterscheiden.

Noch kleinere Löcher traten bei Kabeln auf, die über dem Bleimantel einen Thermoplastmantel trugen und in Freilauf- oder Druckstollen von Wasserkraftwerken verlegt waren [1, 2]. Es ont-

de l'ordre de 5...10 kA/cm². Il parut ainsi évident que les petits trous devaient être attribués à de faibles courants. Mais il existait encore une autre possibilité: étant donné que les trous dans les câbles posés dans les galeries étaient particulièrement petits, on pouvait encore supposer que l'eau incompressible contractait fortement l'arc. Bien que l'effet mécanique de coups de foudre dans un milieu mouillé fût connu dans une certaine mesure, nous procédâmes à un essai avec 50 kA de valeur de crête et 100 μ s de durée de mi-amplitude sous l'eau. La *figure 4* montre que l'effet est absolument remarquable.

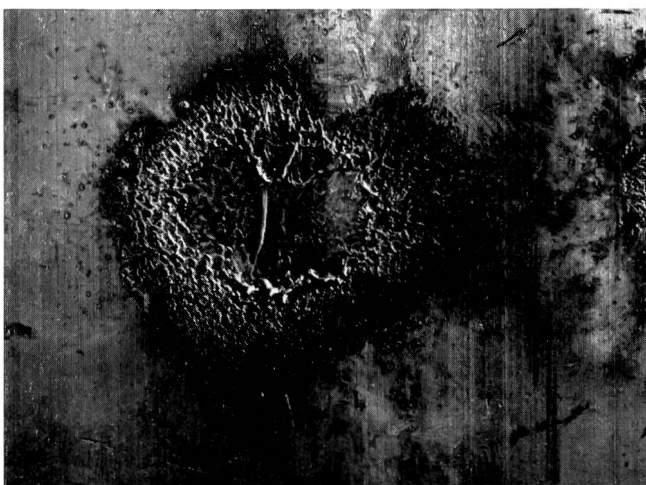


Fig. 3
Schmelzmarke eines Stossstromes von 50 kA Scheitelwert und 100 μ s Halbwertdauer: Oberflächliche Anschmelzung von mehreren Zentimetern Durchmesser
Trace de fusion d'un choc de courant de 50 kA de crête et de 100 μ s de durée de mi-amplitude: fusion superficielle de plusieurs centimètres de diamètre

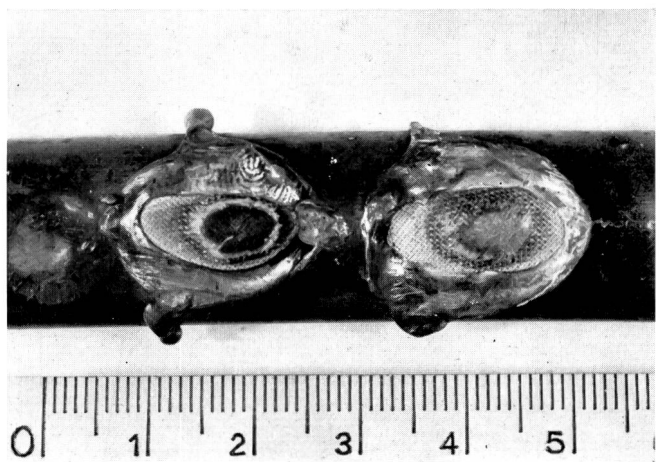


Fig. 5
Durchgeschmolzener Mantel eines nackten Bleikabels
Strom: 120 A, 0,5 s (Gleichstrom)
Resultat: Grosse Schmelzwülste am Rand der Löcher
Gaine d'un câble sous plomb nu fondue de part en part
Courant: 120 A, 0,5 s (courant continu)
Resultat: gros bourrelets de fusion au bord des trous

standen als Folge von Gewittern Löcher im Thermoplastmantel von etwa 1 mm, im Bleimantel darunter von 2 mm Durchmesser (Figur 2). Da derart kleine Löcher zum erstenmal festgestellt wurden, beschlossen wir, das Problem der Schmelzspuren näher zu untersuchen. Dabei schien es uns richtig, die Versuche über einen möglichst grossen Strombereich auszudehnen.

2. Versuche

Wir begannen mit Scheitelwerten der Ströme von 50...100 kA und Halbwertzeiten von etwa 50 μ s. Sie führten zu grossflächigen, oberflächlichen Anschmelzungen (Figur 3). Bei der Reduktion der Strom-Scheitelwerte zeigte sich, dass die Stromdichte einigermaßen konstant blieb: sie lag immer in der Gegend von 5...10 kA/cm². Damit schien es klar, dass die kleinen Löcher auf kleine Ströme zurückzuführen waren. Es bestand aber noch eine andere Möglichkeit: da die Löcher in den Stollenkabeln besonders klein waren, konnte noch vermutet werden, dass durch das nicht kompressible Wasser der Bogen stark eingeschnürt wird. Trotzdem die mechanische Wirkung von Einschlägen in feuchter Umgebung einigermaßen bekannt ist, führten wir einen Versuch mit 50 kA Scheitelwert und 100 μ s Halbwertzeit unter Wasser durch. Wie Figur 4 zeigt, ist die Wirkung in jeder Beziehung eindrucklich.

Da die Stollenkabel absolut keine Deformationen aufwiesen, konnten somit nur kleine Ströme die Ursache der Löcher sein. Das war auch auf Grund der örtlichen Verhältnisse (mehrere 100 m Überdeckung durch schlechtleitendes Gestein) zu erwarten.

Die weiteren Versuche mit kleineren Strömen auf nackten Bleimänteln ergaben wohl durchgehende Löcher, aber die Ränder waren bei weitem nicht so scharf wie bei den durch Blitze entstandenen Schäden (Figur 5). Sobald aber auf das Blei ein Papier von etwa 0,1...0,2 mm Dicke aufgeklebt oder auch nur ein nasses Papier aufgelegt wurde, entstanden die von der Blitzeinwirkung

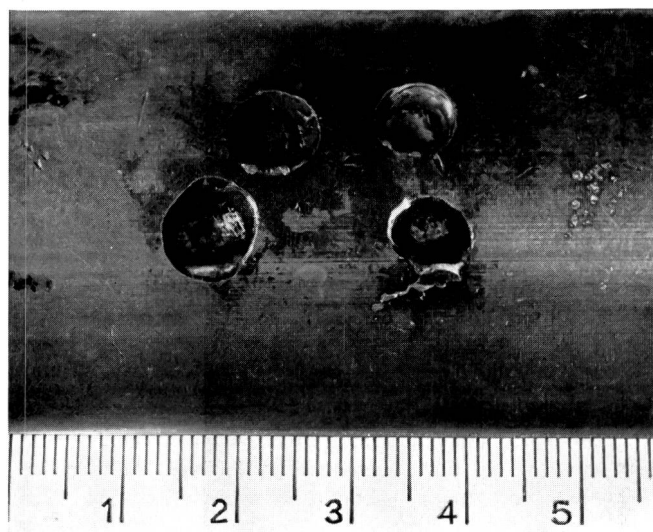


Fig. 6
Durchgehende Löcher an einem Bleikabel mit aufgeklebter Papierschicht. Gleichstrom 50...150 A, Q = 40 C
Trous complètement perforés sur un câble sous plomb à couche de papier collée. Courant continu 50...150 A, Q = 40 C

Vu que les câbles posés dans les galeries n'accusaient absolument aucune déformation, seuls des faibles courants pouvaient être la cause des trous. Mais il fallait aussi s'y attendre du fait des conditions locales (plusieurs centaines de mètres de recouvrement par de la roche mauvaise conductrice).

Les autres essais réalisés avec de faibles courants sur des gaines de plomb nu eurent bien pour résultat des trous percés de part en part, mais les bords n'étaient de loin pas aussi francs que ceux qui étaient dus aux dégâts causés par des éclairs (fig. 5). Mais, dès qu'on collait un papier d'environ 0,1...0,2 mm d'épaisseur ou qu'on appliquait simplement un papier mouillé sur le plomb, les trous produits avaient les bords francs que provoquent les éclairs (figure 6). Ils étaient obtenus avec des courants de 50...200 A et d'une durée d'action de 0,2 à 1 seconde. Nous avons obtenu les mêmes traces de fusion avec des courants et des temps comparables sur des câbles enrobés de jute de construction normale.

Les trous représentés à la figure 6 ont certes des bords francs, mais leur diamètre est de 6...12 mm. Nous avons obtenu les trous de 6 mm avec des courants de 100 A pendant 0,4 seconde ou 150 A pendant 0,25 seconde, soit avec des charges d'environ 40 coulombs. Un coulomb (C) fait fondre 1,3...1,7 mm³ environ (c'est-à-dire 15...20 mg/C). Nous n'avons pas réussi à engendrer sur les câbles enrobés de jute des trous ayant un diamètre plus petit. La polarité du courant n'avait pas non plus une influence précise.

Pour la série d'essais suivante, nous avons employé un câble à gaine de plomb de 1,8 mm d'épaisseur et enveloppe de chlorure de polyvinyle. Etant donné que la tension de notre installation de chocs ne suffisait pas à perforer la gaine de chlorure de polyvinyle, nous l'avons perforée au préalable avec une pointe. La nature du perçement n'avait certainement aucune influence sur les points de fusion du plomb.

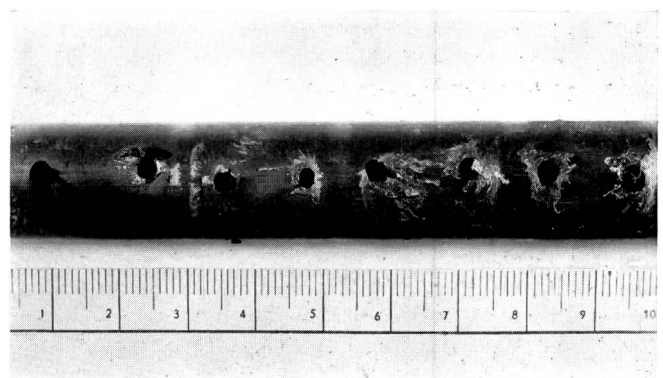


Fig. 7
Schmelzlöcher in Bleikabel mit Thermoplastüberzug. Alle Löcher entstanden mit Ladungen von weniger als 2 C, z. B.:
2. Loch von links: $i = 27$ A, Zeitkonstante: 65 ms, Q = 1,75 C
3. Loch von links: $i = 20$ A, Zeitkonstante: 44 ms, Q = 0,88 C
8. Loch von links: $i = 135$ A, Zeitkonstante: 6,5 ms, Q = 1,75 C
Trous dans des câbles sous plomb à revêtement thermoplastique. Tous les trous étaient provoqués par des charges inférieures à 2 C, par exemple:
2° trou de gauche: $i = 27$ A, constante de temps: 65 ms, Q = 1,75 C
3° trou de gauche: $i = 20$ A, constante de temps: 44 ms, Q = 0,88 C
8° trou de gauche: $i = 135$ A, constante de temps: 6,5 ms, Q = 1,75 C

her bekannten, scharfrandigen Löcher (*Figur 6*). Diese wurden mit Strömen im Bereich von 50...200 A und einer Einwirkungs-dauer zwischen 0,2 und 1 s erhalten. Die gleichen Schmelzspuren erhielten wir mit vergleichbaren Strömen und Zeiten an bejuteten Kabeln normalen Aufbaus.

Die Löcher auf *Figur 6* haben wohl scharfe Ränder, ihr Durchmesser liegt aber im Bereich von 6...12 mm. Die 6-mm-Löcher erzielten wir mit Strömen von 100 A während 0,4 s oder 150 A während 0,25 s, also mit Ladungen von etwa 40 Coulomb (C). Mit 1 C wurden etwa 1,3...1,7 mm³ (das heisst etwa 15...20 mg/C) weggeschmolzen. Es gelang uns nicht, an bejuteten Kabeln Löcher mit einem kleinen Durchmesser zu erzeugen, auch hatte die Polarität des Stromes keinen eindeutigen Einfluss.

Für die nächste Versuchsserie verwendeten wir ein Kabel mit 1,8 mm dickem Bleimantel und PVC-Mantel. Da die Spannung unserer Stossanlage für den Durchschlag des PVC-Mantels nicht ausreicht, durchbohrten wir ihn vorher mit einem Nadelstich. Die Art des Durchbruches dürfte kaum einen Einfluss auf die Schmelzstellen am Blei haben.

Die in *Figur 7* gezeigten durchgehenden Löcher entstanden unter der Einwirkung eines exponentiell abklingenden Stromes von bescheidenem Scheitelwert und verhältnismässig kurzer Dauer. Beim grössten Teil der Löcher war eine Ladung von 0,88 C wirksam, wobei der Scheitelwert des Stromes zwischen 20 A (Zeitkonstante der Entladung 44 ms) und 135 A (6,5 ms) lag. Die «Ausbeute» stieg dabei von 8 mm³/C (90 mg/C) bei 20 A auf 12 mm³/C (135 mg/C) bei 135 A. Bei allen Löchern waren höchstens das Baumwollband und das oberste Papier der Bündel-isolation beschädigt.

Bei den Kabeln mit Thermoplastmantel wurde also gegenüber bejuteten Kabeln je Ladungseinheit die 5...9fache Bleimenge weggeschmolzen. Wesentlich wichtiger ist, dass zum Durchschmelzen eines Bleikabels mit Thermoplastmantel nur etwa 2,5% der Ladung nötig sind, die bei einem bejuteten Kabel zum Durchbruch führt. Es ist nun ohne weiteres verständlich, dass der kleine Strom, der in einer Entfernung von mehreren 100 m von der Einschlagsstelle eines Blitzes vom Fels auf das Kabel fließen kann, zum Durchschmelzen des Bleimantels ausreicht. Der Durchschlag des Thermoplastmantels ist bei den hohen Spannungen, die auch in grosser Entfernung vom Einschlagspunkt auftreten, ohne weiteres zu erwarten [2, 3]. Im Falle des Wasserstollens ist zu berücksichtigen, dass die unmittelbare Umgebung des Kabels nicht aus Fels von etwa 10 000 Ωm besteht, sondern aus gutleitendem nassem Beton, wodurch der Strom auch in kleinen Löchern beträchtlich werden kann.

Nun sind aber die thermoplastumhüllten Kabel der PTT mit einer viskosen Dichtungsmasse zwischen Blei und Thermoplastmantel versehen, die bei einer Verletzung der Korrosionsschutzhülle das Blei vor eindringendem Wasser schützt. Die Versuche an diesen Kabeln ergaben nun schlecht reproduzierbare Resultate. Die tiefsten Schmelzspuren, die wir nach vorherigem Wegdrücken der Dichtungsmasse erzielten, waren noch bedeutend schwächer als beim Kabel ohne Dichtungsmasse. Die Dichtungsmasse wirkt offenbar sehr stark kühlend und absorbiert beim Verdampfen einen grossen Teil der Lichtbogenenergie. Ihre Wirkung hängt aber stark von der Schichtdicke ab.

Les trous percés de part en part que montre la *figure 7* ont été provoqués sous l'effet d'un courant exponentiellement décroissant de faible valeur de crête et d'assez courte durée. Une charge de 0,88 C était active pour la majeure partie des trous, la valeur de crête du courant variant entre 20 A (constante de temps de la décharge 44 ms) et 135 A (6,5 ms). Le «gain» passait de 8 mm³/C (90 mg/C) à 20 A à 12 mm³/C (135 mg/C) à 135 A. Le ruban de coton et la couche supérieure de papier de l'isolation du faisceau étaient tout au plus endommagés dans tous les trous.

Par rapport aux câbles enrobés de jute, la fusion a donc enlevé par unité de charge 5 à 9 fois la quantité de plomb sur les câbles à gaine thermoplastique. Il est nettement plus important de savoir que, pour faire fondre un câble sous plomb à gaine thermoplastique, ne sont nécessaires que 2,5% environ de la charge qui provoque la perforation d'un câble enrobé de jute. On comprend donc sans autres explications que le faible courant qui, à une distance de plusieurs centaines de mètres du point d'impact d'un éclair, peut s'écouler du rocher dans le câble suffit pour faire fondre la gaine de plomb. Il faut sans autre forme s'attendre à la perforation de la gaine thermoplastique aux tensions élevées qui apparaissent aussi à une grande distance du point d'impact [2, 3]. Dans le cas de la galerie d'amenée d'eau, il y a lieu de tenir compte du fait que les alentours immédiats du câble ne se composent pas de rocher de quelque 10 000 Ωm, mais de béton mouillé bon conducteur, le courant pouvant être considérable même dans de petits trous.

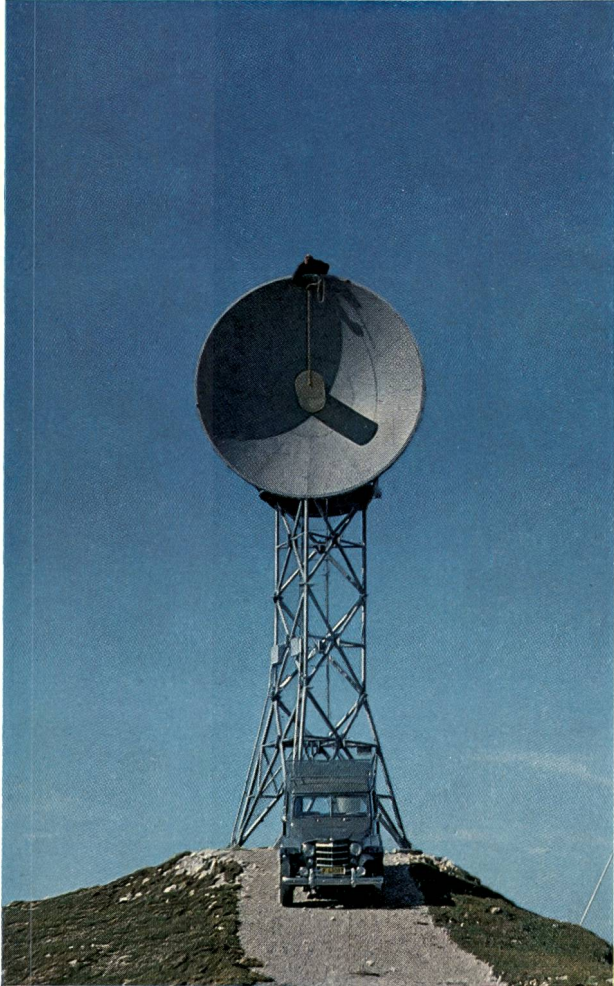
Mais les câbles à gaine thermoplastique des PTT sont garnis d'une masse étanche visqueuse entre le plomb et la gaine thermoplastique, qui, lorsque l'enveloppe de protection contre la corrosion est endommagée, protège le plomb de l'eau qui s'infiltré. Les essais effectués sur ces câbles ont donné des résultats pouvant être difficilement reproduits. Les traces de fusion les plus profondes que nous avons atteintes après avoir écarté au préalable la masse d'étanchéité étaient encore nettement plus faibles que sur le câble sans masse d'étanchéité. Il appert que la masse étanche produit un effet très réfrigérant et absorbe, au moment de l'évaporation, une grande partie de l'énergie de l'arc électrique. Mais son efficacité dépend beaucoup de l'épaisseur de la couche.

3. Discussion des résultats des essais

Les essais ont démontré ce qui suit:

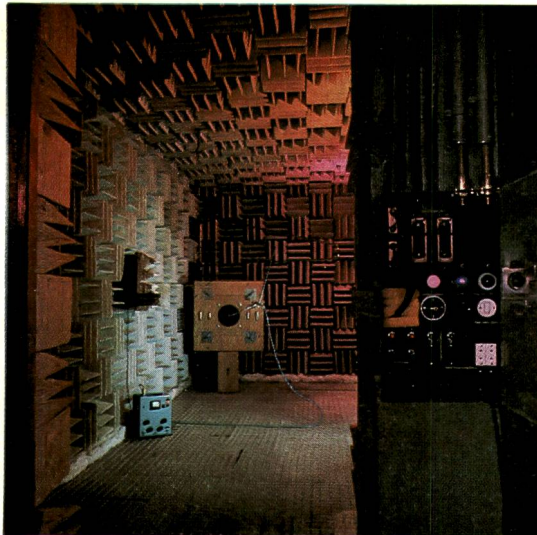
- a) Il est quasi impossible de conclure avec certitude, uniquement d'après l'aspect d'une gaine de câble fondue, à un endommagement causé par des courants d'éclair. Les courants qui perforent la gaine de part en part sont, quant à leur grandeur et à leur durée, tout à fait comparables aux courants qui peuvent se produire lors d'influences de réseaux de fourniture d'énergie. Lorsque les conditions locales ne fournissent pas d'indications utiles plus précises, seule la perforation d'une gaine thermoplastique est généralement un indice certain d'un dommage causé par la foudre, tandis que des traces d'échauffement visibles de la gaine de plomb à l'extérieur du point de fusion délimité proprement dit indiquent une action du courant fort.
- b) Des chocs de courant de moins de 100 μs de durée ne provoquent pas de trous dans la gaine de plomb. Mais ils peuvent

1 Antennenmessplatz Chasseral (zu Artikel S. 228 bis 231)
Poste de mesure des antennes au Chasseral (voir article
p. 228 à 231)

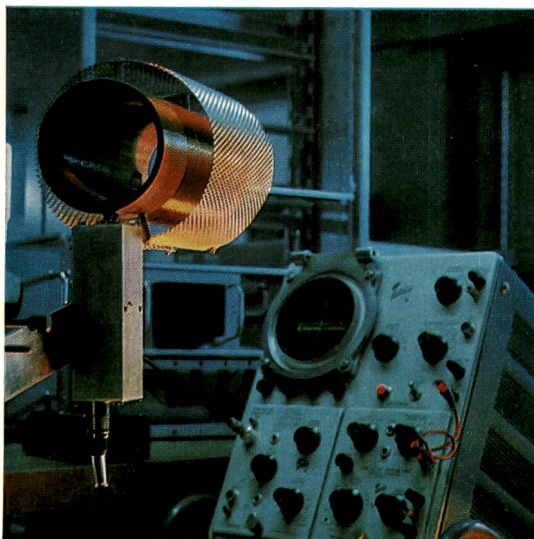


1

2 Schalltoter Raum
Chambre sourde



2



3

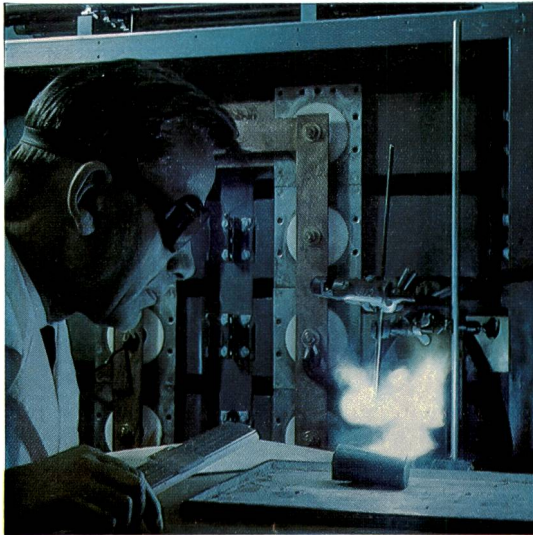
1 Untersuchung der Blitzwirkung auf den Bleimantel eines Kabels (zu Artikel S. 269-275)

Etude de l'action de la foudre sur la gaine de plomb d'un câble (voir article p. 269-275)

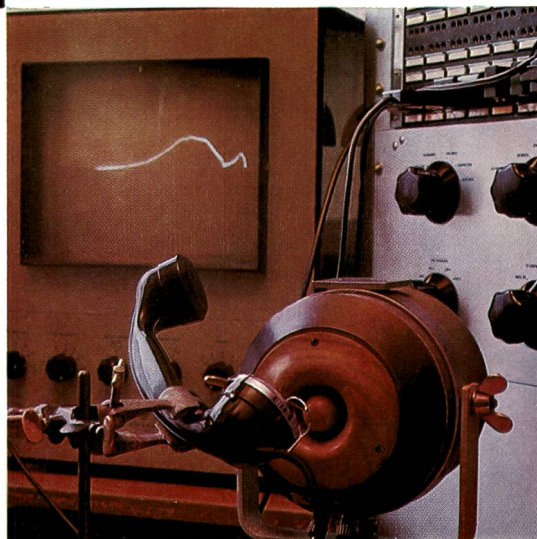
2 Messungen an einem Mikrotelephon mit Hilfe des künstlichen Mundes

Mesure d'un microtéléphone à l'aide d'une bouche artificielle

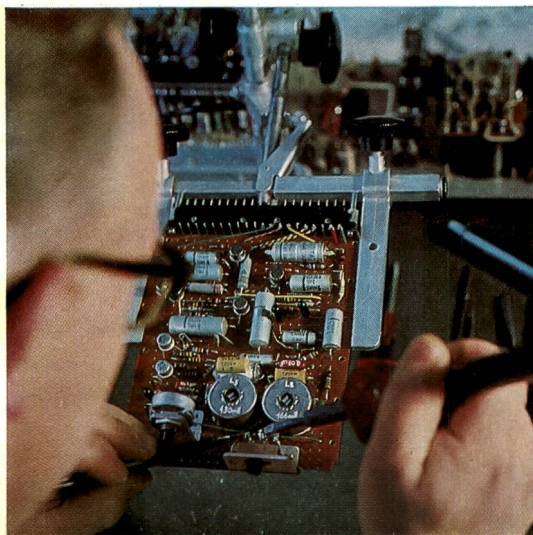
3 Aufbau einer Versuchsschaltung
Montage d'un circuit d'essai



1



2



3

3. Diskussion der Versuchsergebnisse

Die Versuche zeigten folgendes:

- a) Es dürfte kaum möglich sein, allein aus dem Aussehen eines durchgeschmolzenen Kabelmantels eindeutig auf eine Beschädigung durch Blitzströme zu schliessen. Die Ströme, die ein durchgehendes Loch in den Mantel schmelzen, sind in bezug auf Grösse und Dauer durchaus mit jenen Strömen vergleichbar, die bei Einwirkungen von Netzen der Energieversorgung entstehen können. Falls aus den örtlichen Verhältnissen keine nähern Anhaltspunkte vorliegen, so ist meistens nur der Durchschlag eines Thermoplastmantels ein sicheres Indiz für einen Blitzschaden, während augenfällige Erhitzungsspuren des Bleimantels ausserhalb der eigentlichen, begrenzten Schmelzstelle auf eine Starkstromeinwirkung hinweisen.
- b) Stossströme von weniger als 100 μ s Dauer führen zu keinem Loch im Bleimantel. Sie können aber einen Überschlag einleiten, der den nachfolgenden, verhältnismässig lange dauernden kleinen «Schwanzströmen» ihre Zerstörungsarbeit ermöglicht.
- c) An einer nackten Bleioberfläche konnten wir keine scharf-randig begrenzten Löcher erzeugen. Die auf den bejuteten Kabeln angebrachten bitumisierten oder geteerten Papiere schützen ausserhalb der engsten Schmelzzone das Blei vor dem Schmelzen, ohne selbst nennenswert angebrannt zu werden. Um einen Bleimantel durchzuschmelzen, sind wesentlich mehr als 10 C nötig.
- d) Überraschend ist die hohe Empfindlichkeit von thermoplastumhüllten Bleikabeln auf Blitzströme. Zu der hohen Wahrscheinlichkeit des Durchschlages der Thermoplasthülle bei benachbarten Einschlägen kommt hinzu, dass eine Ladung von weniger als 1 C zum Durchschmelzen des Mantels ausreicht. Dieses Verhalten ist nach einer Mitteilung von Dr. *Amsler (Sprecher und Schuh AG, Aarau)* und eigenen Untersuchungen auf die starke Leistungskonzentration im eingeschürften Lichtbogen zurückzuführen. Befindet sich zwischen dem Thermoplastmantel und dem Blei eine viskose Dichtungsmasse, so ist wegen der starken Kühlwirkung der verdampfenden Masse ein Durchbruch des Bleimantels im allgemeinen erst bei der Einwirkung merklich höherer Ladungen zu erwarten. Die Gefährdung wird dabei stark von der Schichtdicke der Dichtungsmasse an der Durchschlagsstelle bestimmt.

4. Energetische Betrachtung

Es wäre nun interessant, die zum Herausschmelzen des Loches nötige Energie mit der tatsächlich auftretenden zu vergleichen. Das ist aus zwei Gründen nicht ohne weiteres möglich:

- a) Wir kennen wohl sehr genau die umgesetzte Ladung, nicht aber die an der Bleioberfläche wirksame Spannung. Man wird hier in erster Näherung mit einem Wert, der einem normalen Kathodenfall entspricht, also mit etwa 15 V, rechnen können.
- b) Wir kennen den Anteil des verdampften Bleis aus den bisherigen Versuchen nicht. Nun beträgt aber die zum Erreichen der Schmelztemperatur nötige Wärmemenge etwa 10 cal/g

Schluss siehe Seite 293

introduire une décharge permettant aux faibles «courants traïnants» qui suivent et qui durent assez longtemps d'accomplir leur travail de destruction.

- c) Nous n'avons pu produire aucun trou à bords francs sur une surface de plomb nu. Les papiers bitumés ou goudronnés, appliqués sur les câbles enrobés de jute, protègent le plomb de la fusion à l'extérieur de l'étroite zone de fusion, sans être eux-mêmes notablement brûlés. Pour fondre une gaine de plomb, il est nécessaire d'avoir une charge bien supérieure à 10 coulombs.
- d) Il est surprenant de constater combien est élevée la sensibilité des câbles sous plomb à gaine thermoplastique aux courants d'éclair. A la grande probabilité de la perforation de la gaine thermoplastique en cas de coups de foudre voisins s'ajoute encore le fait qu'une charge de moins de 1 coulomb suffit pour fondre la gaine. Selon une communication de M. *Amsler (Sprecher & Schuh S.A., Aarau)* et nos propres enquêtes, ce comportement doit être attribué à la forte concentration de puissance dans l'arc tendu. Si une masse étanche visqueuse se trouve entre la gaine thermoplastique et le plomb, il ne faut généralement attendre, par suite du grand effet réfrigérant de la masse évaporante, une perforation de la gaine de plomb que lors de l'effet de charges notablement plus élevées.
La mise en danger est déterminée dans une large mesure par l'épaisseur de la couche de la masse étanche au point d'impact.

4. Examen énergétique

Il serait intéressant de comparer l'énergie nécessaire à la perforation du trou par fusion à celle qui apparaît effectivement. Cela n'est pas possible sans autre forme pour deux motifs:

- a) Nous connaissons très exactement la charge transformée, mais non la tension active à la surface du plomb. En première approximation, on pourra calculer avec une valeur qui correspond à une chute cathodique normale, soit avec environ 15 V.
- b) Nous ne connaissons pas la part du plomb évaporé d'après les essais faits jusqu'ici. La quantité de chaleur nécessaire pour obtenir la température de fusion est d'environ 10 cal/g (c'est-à-dire 42 J/g), la chaleur de fusion de 5,7 cal/g (24 J/g), mais la chaleur d'évaporation de 220 cal/g (920 J/g). Si l'on tient encore compte de l'énergie nécessaire pour porter la température du plomb fondu au point d'ébullition de 1730 degrés, on obtient les valeurs d'approximation suivantes:
Fusion: 66 J/g Evaporation: 1150 J/g

En revanche, la quantité de plomb fondue et évaporée de 135 mg/C sur un câble à gaine thermoplastique sous une tension admise efficace de 15 V correspond à une énergie de 110 J/g, tandis que 900 J/g environ sont nécessaires pour un câble à enveloppe papier/jute.

Etant donné qu'on peut admettre qu'une partie importante du plomb s'évapore, il en résulte un gain thermique considérable pour le câble sous plomb à gaine thermoplastique; on peut même admettre qu'une tension supérieure à 15 V doit être efficace.

Pour le câble enrobé de jute, le mauvais rendement indique un rayonnement de chaleur assez grand.