

Zeitschrift:	Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber:	Association suisse des électriciens
Band:	30 (1939)
Heft:	12
Artikel:	Considérations sur la conductibilité de l'eau et explication de la curieuse influence de l'eau dissoute sur la valeur isolante de l'huile
Autor:	Borel, J.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1058359

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: 09.02.2026

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

nation de la puissance nominale présentent moins d'intérêt que le fait d'avoir une prescription unique.

Il n'est pas possible d'indiquer des chiffres précis quant aux températures maxima admissibles en service. Celles-ci dépendent de divers facteurs tels que la nature des isolants, leur imprégnation, les dimensions, la qualité de la fabrication des enroulements et des parties contiguës (fer) et avant tout de la durée pendant laquelle la machine doit supporter cette température.

D'après des données récentes très circonscrites, les enroulements munis d'isolants de la classe B supportent une température de 105° pendant 8 ans, de 115° pendant 4 ans, de 125° pendant 2 ans, de 135° pendant 1 an et de 145° pendant 6 mois. Les températures maxima de 130° en service normal et de 145° comme pointes exceptionnelles, indiquées à l'annexe A des règles UIC sont par conséquent pertinentes. Un enroulement ayant à supporter en service par exemple les températures de 105° pendant 10 % du temps, 125° pendant 5 % et 145° pendant 1 % est mis hors d'usage au bout de 17,4 années.

Les postulats énoncés donnent clairement les relations entre la puissance nominale et la puissance en service. On voit donc qu'il n'existe aucune raison pour baser les prescriptions sur diverses valeurs de la température ambiante et de l'échauffement.

Les services de traction pourraient objecter qu'il n'est pas possible de déterminer exactement à l'avance le service et par suite les «parcours type»; mais de même que l'on doit pré déterminer le poids, le prix et les garanties, il est aussi indispensable de fixer un programme type comme base des calculs.

Un exemple pratique relatif aux automotrices en construction pour les Chemins de Fer Rhétiques se trouve à la fin de l'article correspondant de l'édition allemande du Bulletin.

L'étude ci-dessus représente le point de vue du constructeur dont le désir est de voir ce problème clairement compris, les prescriptions unifiées et appropriées au but à atteindre, la rentabilité des véhicules qu'il établit assurée. Nous considérons la rentabilité dans son sens le plus large, c'est-à-dire en tenant compte des divers facteurs: prix d'achat, poids, rendement, sécurité de service, entretien et durée.

Résumé.

Nous avons montré que la relation entre la puissance nominale et la puissance en service ne peut être établie qu'au moyen de calculs assez développés; de leur côté, ceux-ci doivent se baser sur des données claires: «parcours type», considération logique des divers facteurs tels que température ambiante, température maximum admissible, altitude. Ces diverses données ne modifient en rien la définition de la puissance nominale, mais bien sa grandeur. Nous avons insisté également sur l'intérêt que présenterait une unification réelle des règles internationales concernant les diverses parties des équipements de traction.

Littérature:

1. G. Gut, Baden: «Ein neues graphisches Verfahren zur Vorausbestimmung der Erwärmung elektrischer Maschinen und Apparate für intermittierende Betriebe, einschliesslich Bahnen.» Bull. SEV 1918, Nr. 2.
2. G. E. Luke: «Heating of Railway Motors in Service and on Test-Floor Runs.» J. Amer. Inst. Electr. Engrs., Mai 1922.
3. F. W. Carter: «Service Capacity of Traction Motors.» J. Inst. Electr. Engrs., Lond., Nov. 1927.
4. H. Kother: «Zeichnerisches Verfahren zur Vorausbestimmung der betriebsmässigen Erwärmung elektrischer Maschinen, insbesondere von Bahnmotoren.» Elektr. Bahnen, Mai 1937.
5. R. Langlois-Berthelot: «Le problème de la puissance normale des machines électriques.» Rev. gén. Electr., 29. Okt. 1938.
6. Regeln der UIC für elektrische Fahrzeugmotoren Nr. 103. Fassung vom 1. Januar 1937.
7. REB 1938, Regeln des VDE für elektrische Maschinen und Transformatoren auf Bahn- und anderen Fahrzeugen.

Considérations sur la conductibilité de l'eau et explication de la curieuse influence de l'eau dissoute sur la valeur isolante de l'huile.

Par J. Borel, Cortaillod.

621.315.615.2

L'auteur rappelle pourquoi l'eau conduit le courant électrique et explique pourquoi les propriétés diélectriques des huiles minérales ne sont pas diminuées par la présence d'eau dissoute.

Wasser leitet den elektrischen Strom.. Der Verfasser erinnert an die Erklärungen dieser Tatsache. Hierauf untersucht er, weshalb die dielektrischen Eigenschaften der Mineralöle sich durch die Anwesenheit aufgelösten Wassers nicht verschlechtern.

Parmi les agents naturels qui ont sérieusement compliqué la tâche de l'électricien, l'eau vient certainement en premier lieu, même si l'on excepte son action chimique sur le fer et le bois.

Le problème des isolants destinés à fonctionner en plein air ou dans des endroits humides est, en effet, dominé par la nécessité de réaliser des isolants insensibles à l'eau ou de réussir à protéger de l'action de l'eau des isolants qui n'y résistent pas. L'eau est l'ennemi No 1 des isolants; elle s'infiltre partout, se condense à des endroits non prévus, dé-

joue souvent les raisonnements et n'a de répit qu'au moment où elle a transformé le meilleur des isolants en une «terre». Créer des terres est le rôle de l'eau, elle s'y emploie avec beaucoup de tenacité.

Comme il importe de connaître tous les caractères de son ennemi pour, si possible, le mieux déjouer, il n'est pas superflu de s'arrêter à certaines propriétés de l'eau, généralement peu connues et qui pourtant sont importantes.

Je ne parlerai que de l'eau pure, puisque c'est en général sous forme d'eau de pluie ou de condens-

sation, ou encore sous forme gazeuse, que l'eau pénètre dans les isolants et ferai abstraction des gaz dissous qu'elle contient.

Chacun sait que la très simple formule de l'eau est H_2O ; par contre, on ignore souvent que la molécule d'eau est un excellent isolant. Si l'eau distillée, même préparée avec le plus grand soin (eau Kohlrausch), est peu conductrice, c'est qu'un certain nombre de molécules d'eau sont dissociées selon l'équation réversible suivante:



La dissociation de l'eau est très faible, nous le verrons plus loin, et l'équilibre est fortement déplacé en faveur du terme de gauche.

La conductibilité de l'eau chimiquement pure est due uniquement à la présence d'ions H positifs et d'ions OH négatifs. Ce sont ces ions qui, en se mouvant sous l'influence d'un champ électrique, assurent le passage du courant.

Dans toute réaction réversible il existe, à chaque température, un rapport exact entre le nombre de molécules ou ions se trouvant dans l'un des membres de l'équation et le nombre de celles ou ceux se trouvant dans l'autre membre. (Loi d'action de masse.) Pour la dissociation de l'eau le rapport peut s'écrire comme suit:

$$\frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]} = K \quad (2)$$

où les termes entre crochets signifient respectivement le nombre d'ions ou de molécules (généralement exprimé en ionogrammes ou moléculegrammes) et K une constante pour une température déterminée. K augmente avec la température.

Il est facile de calculer le nombre d'ions H et OH existant dans l'eau à une température déterminée en se basant sur la valeur de la conductibilité de l'eau, car la faculté de transport d'électricité de chacun de ces ions est connue.

Sans entrer dans des détails de théorie ou de calcul, qu'il suffise de dire que si l'eau contenait un ionogramme de H et de OH (soit respectivement 1 g du premier et 17 g du second de ces ions) sa conductivité serait de

$$\gamma = 0,001 (314 + 175) = 0,489 \text{ Siemens/cm}$$

où les nombres 314 et 175 correspondent à la part que prennent respectivement l'ion H et l'ion OH dans le transport du courant.

Or, en réalité, la conductivité de l'eau est de $3,86 \cdot 10^{-6}$ S/cm. On déduit donc que la concentration en ionogrammes par litre (ions H et ions OH) est de:

$$\frac{3,86 \cdot 10^{-6}}{0,489} = 0,78 \cdot 10^{-7} \text{ ion-g par litre}$$

ou encore qu'un gramme d'ions H et 17 grammes d'ions OH sont contenus dans environ 13 000 000 de litres d'eau, ou enfin qu'il n'y a, en moyenne, qu'une molécule d'eau dissociée pour 720 000 000 de molécules qui ne le sont pas. Sans cette molécule dissociée l'eau serait un excellent isolant.

Etant donné qu'un litre d'eau contient 55,5 molécule-grammes d'eau, on obtient comme valeur de la constante de dissociation de l'eau, en remplaçant dans l'équation (2) les termes par leur valeur

$$K = \frac{(0,78 \cdot 10^{-7})^2}{55,5} = 0,115 \cdot 10^{-15}$$

Parmi les très nombreux isolants sensibles à l'eau je ne parlerai que de l'huile qui, du reste, joue un rôle important en électrotechnique. On a toujours admis que des traces d'eau suffisent déjà pour abaisser notablement la valeur isolante de l'huile. Cet abaissement de qualité se traduirait par une notable diminution de la rigidité diélectrique, par une forte diminution de l'isolement en courant continu et par une augmentation de l'angle de pertes en courant alternatif.

Le Comité des huiles de la Conférence Internationale des Grands Réseaux électriques, s'étant chargé d'étudier si l'altération des huiles dans les transformateurs peut être suivie avec certitude, non seulement par des analyses chimiques, mais aussi par des mesures électriques, s'est heurté, dès le début, à la question de savoir comment il convenait de dessécher les huiles, afin de mesurer leur valeur réelle et non leur valeur accidentelle due à la présence de l'eau. Eliminer toute trace d'eau sans altérer l'huile n'est pas facile pour le praticien qui ne dispose pas de tous les avantages d'un laboratoire bien installé. Si l'on veut faire usage d'un «vide» très poussé (si possible inf. à 0,1 mm Hg) il est nécessaire de porter l'huile à une température telle qu'elle en est plus ou moins altérée.

Pour étudier l'influence de l'eau sur l'huile et la possibilité de l'éliminer le plus simplement sans toutefois altérer l'huile d'une façon appréciable, nous avons entrepris les essais ci-après:

Nous avons mesuré les pertes diélectriques et l'isolement de deux sortes d'huiles, l'une américaine, l'autre russe, chacune à trois stades de raffinage, sous-raffinée, moyennement raffinée, surraffinée. Dans chacun de ces trois stades, les deux sortes d'huile ont été essayées dans différents états, notamment desséchées, saturées d'eau et sursaturées d'eau.

Il résulte entre autres choses, des nombreuses mesures effectuées, tant en courant continu qu'en courant alternatif, que l'eau dissoute, à l'encontre de ce qu'on admet couramment, n'augmente pas les pertes diélectriques, ni ne diminue l'isolement de l'huile. Souvent même, au contraire, l'eau dissoute améliore quelque peu les propriétés isolantes de l'huile.

Parmi les nombreux résultats obtenus¹⁾ nous nous bornerons à citer le plus suggestif. Les pertes diélectriques d'une huile américaine surraffinée, furent mesurées dans les trois états de l'huile suivants:

- 1^o desséchée à 120° sous un vide inférieur à 0,1 mm,
- 2^o saturée d'eau à la température ordinaire,

¹⁾ Ces résultats ont été publiés en partie dans le rapport No. 110 que nous avons présenté à la session de 1937 de la CIGRE.

3^o saturée d'eau et contenant en fine suspension de l'eau en excès (huile saturée d'eau) (fig. 1).

Les pertes diélectriques de l'huile desséchée et celles de l'huile saturée d'eau ont été trouvées pratiquement identiques (les dernières sont pourtant

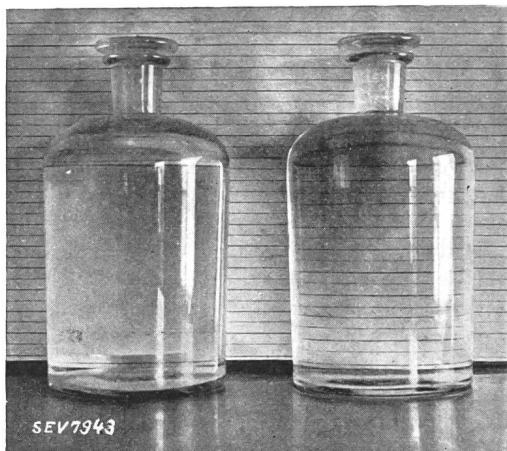


Fig. 1.

Huiles dont les pertes ont été mesurées: à droite huile desséchée (transparente); l'huile saturée d'eau a le même aspect; à gauche huile contenant de l'eau en excès (non transparente).

légèrement inférieures aux premières) tandis que les pertes de l'huile contenant de l'eau en léger excès sont plus élevées que les précédentes à la température ordinaire. Lorsque la température croît, les pertes de l'huile desséchée et celles de l'huile saturée d'eau croissent légèrement, mais celles de la troisième huile descendent assez rapidement, rejoignent les pertes des deux autres huiles, puis se confondent à peu près avec elles (fig. 2). Au refroidissement les pertes des trois huiles décroissent tout en restant à peu près identiques entre elles, puis les pertes de l'huile qui contient de l'eau en excès à la température ordinaire augmentent en suivant, en sens inverse, le chemin suivi pendant l'augmentation de la température. On peut recommencer souvent le cycle ci-

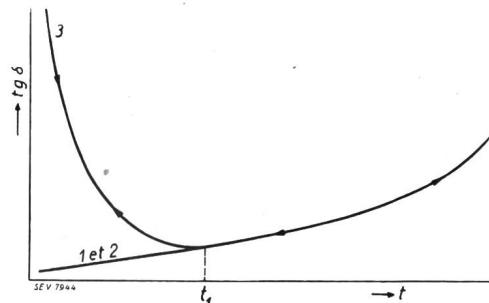


Fig. 2.

Le facteur de pertes en fonction de la température.

Courbe 1 huile sèche.

Courbe 2 huile saturée d'eau.

Courbe 3 huile contenant de l'eau en excès.

La température t_1 correspond à la complète dissolution de l'eau en excès.

dessus et retrouver à peu près le même comportement des pertes des trois huiles (fig. 2).

L'allure de la courbe de l'angle de pertes de l'huile sursaturée d'eau s'explique aisément par l'augmentation de la solubilité de l'eau dans l'huile

en fonction de la température. Lorsque la température s'élève, la quantité d'eau en excès diminue, et la quantité d'eau dissoute augmente, or l'eau en excès augmente les pertes de l'huile, tandis que l'eau dissoute est pratiquement sans influence.

La température à laquelle la courbe des pertes de l'huile sursaturée rejoint la courbe commune de l'huile sèche et de l'huile saturée, correspond à la dissolution complète de l'eau en excès.

La détermination des pertes diélectriques d'une huile contenant de l'eau en excès connu permet donc de déterminer d'une façon élégante la température à laquelle l'eau est dissoute et par là la solubilité de l'eau dans l'huile à différentes températures.

Il ressort de ces faits que l'eau dissoute n'affecte pas l'angle de pertes ni l'isolement de l'huile, tandis que l'eau non dissoute rend l'un et l'autre plus mauvais.

Explication de l'action de l'eau sur l'huile.

Considérons 1 cm³ d'huile saturée d'eau, c'est-à-dire, contenant environ 0,04 mg d'eau et déterminons la conductivité de cette huile par le calcul et par l'expérience. Supposons que la conductivité de l'huile soit de 10^{-15} S/cm et celle de l'eau de $4 \cdot 10^{-8}$ S/cm, soit $4 \cdot 10^{-12}$ S/cm pour les 0,04 mg contenus dans un cm³ d'huile saturée. Si les conductivités s'additionnaient, nous aurions pour la con-

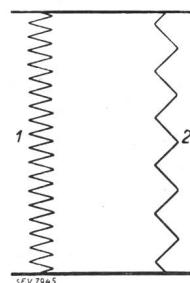


Fig. 3.

Schéma de la résistivité de l'huile saturée d'eau, si l'eau dissoute était dissociée.

1 résistance de l'huile $10^{-15} \Omega/cm^3$.

2 résistance de l'eau $10^{-12} \Omega/cm^3$.

La résistivité de l'huile saturée d'eau serait pratiquement donnée par la résistance de l'eau dissoute qui est environ 1000 fois plus faible que celle de l'huile.

ductivité de l'huile saturée d'eau à peu près la conductivité due à la présence de l'eau (fig. 3). Or l'expérience montre que la conductivité de l'huile n'est pratiquement pas influencée par la présence de l'eau dissoute. Il faut donc admettre que l'eau dissoute dans l'huile ne participe pas au passage du courant ou, autrement dit, que l'eau dans l'huile n'est pas dissociée, puisque ce sont les ions produits par la dissociation de l'eau qui conduisent le courant, tandis que les molécules non dissociées sont isolantes. Or cette absence de dissociation est conforme à la théorie. En effet, le degré de dissociation d'un corps dissous quelconque dépend non seulement de la nature de ce corps mais aussi de celle du dissolvant. Plus la constante diélectrique du dissolvant est élevée et plus son action dissociante est élevée, ainsi que le tableau I le met en évidence²⁾.

L'eau qui possède une forte constante diélectrique a donc un pouvoir dissociant élevé sur tout corps dissous et aussi, cela est évident, sur ses propres molécules. L'huile, par contre, de faible constante

²⁾ Ce tableau est tiré du Précis de chimie physique par A. Berthoud, professeur à l'Université de Neuchâtel.

diélectrique (2,2), constitue un milieu très peu dissolvent dans lequel l'eau n'est pratiquement pas dissociée et par conséquent pas conductrice.

Tableau I.

Solvant	Constance diélectrique	Action dissociante
Acide cyanhydrique .	<i>CNH</i>	très forte
Eau	<i>H₂O</i>	très forte
Acide formique .	<i>HCO₂H</i>	très forte
Alcool méthylique .	<i>CH₃OH</i>	forte
Alcool éthylique .	<i>C₂H₅OH</i>	forte
Acétone	<i>(CH₃)₂CO</i>	moyenne
Ether éthylique .	<i>(C₂H₅)₂O</i>	faible
Benzène	<i>C₆H₆</i>	très faible

Il est probable aussi, sinon certain, que la rigidité diélectrique de l'huile est peu influencée par l'eau dissoute, à l'encontre de ce qu'on admet communément, pour autant que l'eau soit la seule impureté de l'huile, à l'exclusion notamment de fibres en suspension. Ces fibres ont beaucoup d'affinité pour l'eau et peuvent contenir à elles seules plus d'eau que l'huile n'en peut dissoudre.

En dehors de l'intérêt théorique que peuvent présenter les considérations ci-dessus, il résulte ce fait pratique pouvant présenter un certain avantage: si l'on veut contrôler par des mesures électriques la valeur intrinsèque d'une huile, usagée ou non, il suffit de la filtrer sur un filtre en papier avant de

l'introduire dans le condensateur servant aux mesures, ou probablement aussi dans la cuve servant aux disruptions. Il est aussi probable, sinon certain, que le simple filtrage à froid soit le seul traitement nécessaire et suffisant pour dépolir une huile usagée de toutes les impuretés non dissoutes (fibres, boue) et pour augmenter au maximum les propriétés électriques d'une huile usagée.

Il n'est pas nécessaire de chauffer l'huile avec ou sans application de «vide» pour éliminer les traces d'eau puisque cette eau est isolante.

D'autre part, tout chauffage est non seulement superflu, mais peut être nuisible, car il altère plus ou moins l'huile selon les conditions de température, de durée de chauffage, de «vide» et selon la nature et de l'état de l'huile.

S'il est facile de donner une explication satisfaisante de la raison pour laquelle les pertes de l'huile ne sont pratiquement pas changées par la présence d'eau dissoute, il est par contre difficile d'expliquer pourquoi en fait cette eau diminue légèrement les pertes d'huile. Est-ce que l'eau se combine partiellement à l'huile ou à certaines impuretés de l'huile? Ou faut-il y voir l'effet de la polarité des molécules d'eau, qui diminuerait le nombre des particules participant au passage du courant dans l'huile? Il n'est pas possible de répondre actuellement à ces questions, qui n'ont, du reste, aucun intérêt pratique ce qui n'est certes pas le cas de la question traitée en cet article.

Ueber den Einfluss von Blitzschlägen auf Luftkabel.

621.315.24

Es wird auf einen VDE-Fachbericht 1938 hingewiesen, der eine neue Bauart von selbsttragenden Luftkabeln beschreibt. Diese macht die Luftkabel widerstandsfähig gegen Blitzschläge, womit die Verwendung von selbsttragenden Luftkabeln als Erd- und Blitzseile ermöglicht wird. Der wesentliche Inhalt jenes Fachberichtes wird wiedergegeben.

Wir bringen dieses Referat um so lieber, als wir dafür halten, dass der Verwendung dieser Kabelart noch vielmehr Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte.

Selbsttragende Luftkabel finden als Träger der Steuer-, Signal- und Telephonleitungen zwischen Maschinenhäusern und Wasserfassungen oder Apparatekammern in Hochdruckwerken sehr weitgehend Verwendung¹⁾. Im Ausland liegen auch schon Erfahrungen vor mit derartigen Kabeln, die längs Hochspannungsleitungen verlegt einem doppelten Zwecke dienen, nämlich einmal als Erdseil, dann aber auch als Träger der nötigen Ferteldeadern für Telephon, Fernmessen, Fernsteuern und Streckenschutz. Vom mechanischen Standpunkt aus eignen sich selbsttragende Luftkabel zweifellos in hervorragender Weise für eine solche Verwendung, wurden sie doch ganz speziell für die Ueberbrückung grosser Spannweiten entwickelt. In elektrischer Beziehung erheben sich Bedenken, da ja das Erdseil in erster Linie direkten Blitzschlägen ausgesetzt ist.

In einem der VDE-Fachberichte 1938, betitelt «Der Schutz selbsttragender Luftkabel gegen Beschädigungen durch Blitzschläge», berichtet nun W. Wild, Berlin, über neue Erkenntnisse und Entwicklungsarbeiten, die im Kabelwerk der Siemens & Halske A.-G. zum Bau «blitzfester» Luftkabel geführt haben²⁾.

Da das Bedürfnis der Werke nach eigenen fernmelde-technischen Uebertragungskanälen immer ausgesprochener

L'auteur résume un rapport VDE 1938 qui traite d'un nouveau type de câble aérien à armure portante. Ce nouveau câble résiste aux décharges atmosphériques directes, ce qui permet de l'utiliser comme câble de protection sur les lignes à haute tension.

Nous publions d'autant plus volontiers ce résumé qu'à notre avis ce type de câble mérite d'être bien plus souvent utilisé qu'il ne l'est encore aujourd'hui.

zu Tage tritt, soll im folgenden das Wesentliche des interessanten Berichtes kurz wiedergegeben werden.

Der Aufbau bisheriger Luftkabel ist dargestellt in Fig. 1. Ueber der vom Bleimantel umpressten Kabelseele liegt ein Polster aus Jute und Baumwollband, das mit Compound-

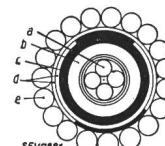


Fig. 1.
Querschnitt eines selbsttragenden Luftkabels.

a Kabelseele. b Bleimantel. c Jutepolster. d Bandeisenwendeln. e Runddrahtbewehrung.

masse getränkt ist. Darüber liegt als Druckschutz eine Bandeisenspirale und erst über dieser folgen die eigentlichen tragenden Armatur-Runddrähte. Bei einem Blitzschlag in das Kabel wird diese sehr widerstandsfähige Armatur getroffen und der Blitzstrom fliesst nun von der Einschlagstelle nach beiden Seiten ab. Als Strompfade dienen die Armaturdrähte und das darunter liegende Bandeisen.

An einem so gebauten und als Erdseil an den Mastspitzen einer etwa 50 km langen Leitung von 100 kV verlegten Luftkabel traten als Folge von direkten Blitzschlägen Schäden auf, die zu Zerstörungen des Bleimantels führten. Infolge der grossen Blitzstromstärken ist nämlich schon kurz nach der Einschlagstelle der Spannungsabfall, den der Blitzstrom beim Abfließen im Kabel längs der Bewehrungsdrähte her-

¹⁾ J. L. Schmid: Fernmelde-Luftkabel, Techn. Mitt. PTT, 1932, S. 95.

²⁾ Walter Wild: Der Schutz selbsttragender Luftkabel gegen Beschädigung durch Blitzschläge, VDE-Fachberichte 1938 und V. d. N. 1938, Folge 4.