

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 33 (1942)
Heft: 4

Artikel: Expériences faites par l'EOS avec l'aluminium
Autor: Chioléro, L.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1056647>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 24.12.2024

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

REDAKTION:

Sekretariat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:

Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telefon 5 17 42
Postcheck-Konto VIII 8481

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXXIII. Jahrgang

N° 4

Mittwoch, 25. Februar 1942

Bericht über die Aussprache für VSE-Mitglieder über Aluminiumverwendung*

Freitag, den 10. Oktober 1941,
in Olten

Der **Vorsitzende**, Herr Direktor *R. A. Schmidt*, Präsident des VSE, eröffnet die Aussprache folgendermassen:

Messieurs,

J'ai l'honneur de vous souhaiter à tous une cordiale bienvenue et je vous remercie d'être venus nombreux à notre séance de ce jour qui, je l'espère, ne manquera pas de vous intéresser.

Ainsi que vous le savez, nos disponibilités de cuivre en Suisse diminuent de plus en plus. Vous en avez entendu parler à une réunion que nous avons eue il y a quelques semaines à Berne, et où M. Stadler, chef de la Section des métaux à l'Office de guerre pour l'industrie et le travail, vous a mis au courant de la situation.

Dans beaucoup de cas le cuivre peut être remplacé dans les installations électriques par de l'aluminium. Cependant, en utilisant ce dernier métal, certaines précautions sont à prendre, précautions que connaissent ceux qui ont déjà fait leurs expériences dans ce domaine mais que d'autres ignorent. Il est bon que les uns disent aux autres ce qu'ils savent à ce sujet et c'est pour cette raison que, depuis longtemps déjà, nous aurions voulu vous réunir pour échanger les expériences faites et en discuter; le manque de temps dû aux circonstances actuelles ne nous a cependant pas permis de le faire jusqu'à présent.

L'Association suisse des électriciens ayant convoqué pour aujourd'hui une séance de discussion avec un programme

consacré à la technologie de l'aluminium et à l'emploi de câbles en aluminium, nous avons jugé bon de saisir cette occasion et de vous réunir préalablement afin de pouvoir causer tout à fait librement, plus librement que cela ne serait possible dans une assemblée plus grande, des expériences faites avec l'aluminium dans les usines et réseaux. Voilà pourquoi nous nous trouvons ici entre nous et je vous invite à bien vouloir communiquer ouvertement vos expériences — les mauvaises surtout — car le but de notre rencontre est précisément d'apprendre les précautions à prendre pour éviter des désagréments et les moyens de remédier aux inconvénients constatés.

Monsieur Zaruski introduira le sujet. Il a heureusement pu réunir une documentation intéressante dans des réseaux qui ont eu recours à l'aluminium il y a longtemps déjà, il aura ainsi passablement de choses à vous communiquer et je m'empresse de lui donner la parole.

Herr A. Zaruski, Starkstrominspektorat, Zürich, orientiert über die Studien, die das Starkstrominspektorat über die Verwendung von Aluminium in Hochspannungs-Verteilnetzen, in Ortsnetzen und Hausinstallationen durchgeführt hat. Das ausführliche Referat ist im Bericht über die Aluminiumtagung des SEV im Bulletin 1941, Nr. 24, S. 645, veröffentlicht.

Der **Vorsitzende** dankt Herrn Zaruski und erteilt das Wort Herrn Chioléro von der EOS:

Expériences faites par l'EOS avec l'aluminium

Communication faite en séance de l'Union des Centrales Suisses d'Electricité le 10 octobre 1941 à Olten

par *L. Chioléro*, Lausanne

621.315.53

Cet exposé traite des expériences favorables faites sur la première ligne à haute tension en aluminium-acier construite en Suisse, avec, en seconde partie, le problème de la jonction de conducteurs en aluminium à des conducteurs d'un autre métal.

Die guten Erfahrungen, die an der ersten schweizerischen Stahl-Aluminium-Leitung gemacht wurden, werden mitgeteilt. Die verwendeten Verbindungen werden kritisch beschrieben. Im zweiten Abschnitt wird die Frage der Verbindung von Aluminiumleitern mit Leitern anderen Materials behandelt.

Considérations et expériences faites sur des lignes de transport d'énergie avec conducteurs en aluminium-acier

Nous rappellerons que c'est en 1920 que fut mise en service la première ligne de transport avec conducteurs en aluminium-acier établie en Suisse. Elle fut construite par EOS de Lausanne à Genève pour

réunir les usines de Pierre de Plan et de Chèvres. Cette ligne qui a une longueur de 66 km est exploitée actuellement à la tension de 125 kV. Son équipement est le suivant:

3 câbles conducteurs constitués chacun par une âme d'acier zingué à haute résistance mécanique, composée de 7 fils de 2,4 mm de diamètre et entourée de 30 fils d'aluminium à haute conductibilité (pureté 99 %), de même diamètre.

Les sections respectives des 2 métaux sont les suivantes:

* Ein Sonderdruck der Berichte über die Aluminium-Tagung des SEV (Bulletin SEV 1941, Nr. 24) und die des VSE erscheint dieser Tage. Er ist beim Sekretariat des SEV, Seefeldstrasse 301, Zürich 8, erhältlich.

acier zingué: 31,7 mm²
aluminium: 135,7 mm².

Le câblage des fils d'aluminium est croisé.

1 *câble protecteur* (câble de terre) en acier zingué, placé au sommet de pylônes est composé de 7 fils de 2,4 mm, identique à l'âme d'acier des conducteurs.

L'intensité normale prévue dans les conducteurs est d'environ 1,8 A/mm², soit $\frac{250 \text{ A}}{135,7 \text{ mm}^2}$.

Il n'a pas été constaté de phénomènes anormaux (au point de vue corrosion ou passage du courant) sur l'aluminium des conducteurs, ni entre l'âme d'acier zingué et les couches conductrices d'alumi-

D'autre part, pour pouvoir être montée, une jonction torsadée nécessite le chevauchement des câbles sur une longueur au moins égale à celle du tube d'aluminium dans lequel ils sont introduits. En cas de réparation de câbles après rupture, cette condition ne peut généralement pas être réalisée ce qui nécessite alors la pose de deux jonctions successives. En outre, par suite de l'opération de torsion que nécessite le montage des jonctions torsadées, on ne peut les placer dans les sacs ou bretelles des pylônes d'amarrage.

Malgré les inconvénients relevés ci-dessus, qui constituent surtout des difficultés de montage ou de démontage, on peut dire que les jonctions tor-

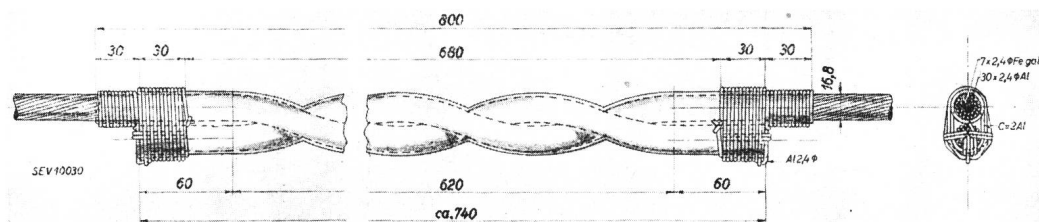


Fig. 1.
Jonction de câble du type «torsadé».

niun. Les jonctions des câbles sont du type «torsadé», tel que représenté à la fig. 1. Leur montage a été effectué de la manière suivante.

Dans un tube d'aluminium de 750 mm de longueur dont la section a été aplatie, on introduit parallèlement l'une à l'autre les extrémités des deux câbles à jonctionner. Ensuite, au moyen de deux «tourne à gauche» manœuvrés en sens-inverse, on tord le tube d'aluminium avec les deux câbles placés à l'intérieur. On obtient ainsi une torsade dont les deux extrémités sont ensuite pourvues d'une ligature en fil d'aluminium. Ces opérations de montage ne sont pas compliquées et ne nécessitent pas de soins spéciaux, ce qui n'est pas le cas avec d'autres types de jonctions.

Toutes les jonctions, au nombre de 100, de la ligne Lausanne-Genève construite en 1920 sont du type décrit ci-dessus. Elles n'ont montré jusqu'à présent aucun défaut.

Au point de vue du passage du courant, elles ont l'avantage de présenter de grandes surfaces de contact, ce qui donne une intensité spécifique faible.

Le courant passe directement d'un câble à l'autre, ou par les parois du tube d'aluminium. Les âmes d'acier des deux câbles ne se touchant pas, on n'a pas à craindre qu'elles conduisent une partie importante du courant traversant la jonction.

L'eau et les agents extérieurs ne pénètrent pas ou très peu à l'intérieur du joint. A titre d'information, une jonction torsadée a été retirée de la ligne après 7 années de service et coupée. A l'intérieur, l'aluminium des deux câbles était intact, à l'état de neuf.

Le prix de revient de ces jonctions est bas. Par contre, les jonctions torsadées présentent l'inconvénient d'avoir une résistance mécanique parfois un peu plus faible que certains autres types de jonction qui sont apparus depuis sur le marché.

sadées ont donné entièrement satisfaction à tous points de vue.

Des jonctions torsadées furent aussi montées en 1925 et 1927 sur d'importantes lignes à 6 conducteurs en aluminium-acier de plus grande section, soit des conducteurs comportant 30 fils d'aluminium de 2,8 mm de diamètre (184,7 mm²) et 7 fils d'acier zingué de même diamètre (43,1 mm²).

A cause de ces grandes sections, les jonctions sont plus difficiles à tordre et on semble atteindre la limite d'emploi de ce type de jonction avec l'outillage indiqué.

Plus tard, des jonctions d'un autre genre firent leur apparition sur le marché, jonctions dans lesquelles chacun des deux métaux constituant la corde aluminium-acier est amarré pour soi, par un système de serrage spécial à cônes.

Les jonctions Vontobel sont de ce type. Elles présentent au point de vue mécanique des avantages sur les jonctions torsadées. Leur résistance à la traction atteint le 100 % de la charge de rupture des câbles. Elles peuvent être facilement placées dans les sacs ou bretelles des pylônes d'amarrage, ce qui permet en les démontant de sectionner à volonté certains tronçons de lignes. En cas de réparation d'un conducteur détérioré, elles peuvent être montées plus facilement que les manchons précédemment décrits.

Le montage des jonctions à cônes demande à être fait avec beaucoup de soin car il est délicat; il doit être surveillé de très près car il est difficile après coup de contrôler si le joint est bien monté.

Par contre, au point de vue conductibilité, ces jonctions ne valent pas les jonctions torsadées car les surfaces de contact entre parties conductrices en aluminium sont sensiblement plus faible. Il y a également lieu de remarquer que les âmes d'acier

des câbles étant serrées dans les pièces métalliques électriquement bien reliées entr'elles, peuvent dans certains cas participer d'une manière sensible à la transmission du courant à travers la jonction.

Notons qu'au point de vue de l'enlèvement des surcharges de givre sur les conducteurs, qu'on a tendance de plus en plus à éliminer par le chauffage des lignes, il est indispensable, vu les courants d'intensité élevée utilisés, que les jonctions remplissent parfaitement leur rôle et permettent de conduire sans danger les mêmes courants que les câbles eux-mêmes.

La conductibilité de certaines jonctions devenue précaire ou douteuse a pu être améliorée de façon sensible par la pose d'un court tronçon de câble serré de part et d'autre de la jonction et formant éclissage électrique.

Au point de vue étanchéité et protection contre les agents extérieurs, les manchons à cônes sont moins favorables que les torsadés. En effet, les cônes de serrage étant placés assez près de l'entrée des câbles dans les manchons, l'eau de pluie peut se frayer un passage entre les fils d'aluminium de la périphérie des câbles, pénétrer dans les cônes de serrage et dans certains cas provoquer la formation d'une couche d'oxyde d'aluminium qui offre une résistance supplémentaire au passage du courant. Cette augmentation de résistance provoque un dégagement supplémentaire de chaleur qui accélère les phénomènes de détérioration subséquents.

Jonctionnement de conducteurs en aluminium à des conducteurs d'autres métaux, à des bornes d'appareils dans les postes

Le problème du jonctionnement de conducteurs d'aluminium à des conducteurs d'autres métaux est encore plus délicat que celui du jonctionnement des conducteurs d'aluminium entr'eux.

Il s'est posé dès que l'aluminium a été utilisé comme conducteur, car les bornes d'appareils (interrupteurs ou sectionneurs) sont généralement en cuivre, bronze ou laiton et, d'autre part, parce que les lignes en aluminium doivent pouvoir être connectées à des lignes de cuivre.

Il y a, toutefois, lieu de remarquer qu'au début de l'emploi de l'aluminium, son raccordement à d'autres métaux ne causa pas de déboire car il s'agissait toujours d'installations placées à l'intérieur des bâtiments, donc à l'abri des intempéries (raccordement à des barres pour grosses intensités de courant dans les usines électro-chimiques, départs ou arrivées de lignes de transport).

Lorsqu'on passa à la construction de postes de transformateurs ou de couplage en plein air, des difficultés apparurent par suite de corrosions ou attaques aux surfaces de contact de l'aluminium avec d'autres métaux.

La douille de serrage dont une partie est représentée par la fig. 2 avec le tronçon de câble aluminium-acier qu'elle serrait, était placée sur une borne de sectionneur dans un poste de couplage en plein air à 65 kV. Elle est en laiton nickelé sur toutes ses faces.

Quant au raccord fig. 3 qui est également en laiton mais non nickelé, il était monté sur une borne d'interrupteur du même poste. Dans ce dernier cas, le câble connecté était un câble entièrement en aluminium. Les câbles avaient été montés sans pré-

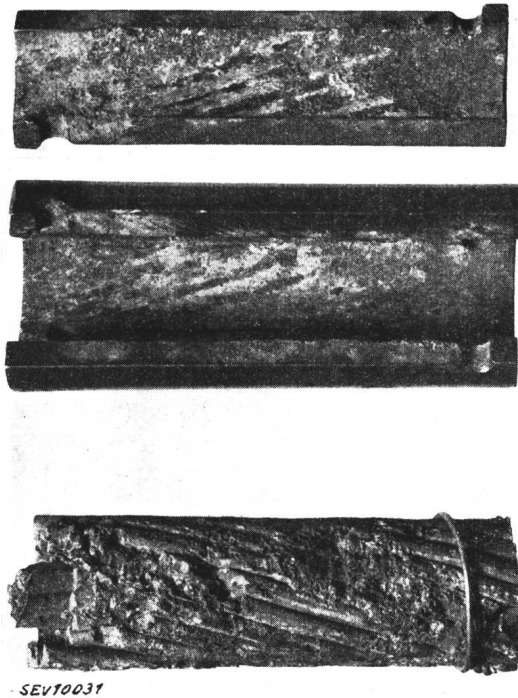


Fig. 2.

En haut: Douille de serrage laiton nickelé.
En bas: Tronçon de câble aluminium-acier.

cautions spéciales dans l'une et l'autre pièce (comme on aurait monté des conducteurs en cuivre). Les détériorations qu'on peut observer se sont produites après 4 années de service déjà.



Fig. 3.

Raccord en laiton non nickelé.

A la suite de ces constatations, plusieurs raccords du même genre furent examinés; on remarqua d'autres détériorations ou corrosions aux surfaces de serrage. Même sur des pièces qui n'avaient que quelques semaines de service seulement, des traces

blanchâtres étaient nettement visibles sur les surfaces de contact du laiton.

Pour remédier aux défauts mentionnés, les raccords très endommagés furent retirés et remplacés par des dits en bronze spécial sans zinc. Quant à ceux des raccords dont les surfaces de contact n'avaient que très peu souffert, ils furent polis à nouveau, nickelés, puis remontés. Par surcroît de précaution, les câbles d'aluminium, à leur entrée dans les raccords concentriques, furent enduits à l'extérieur d'un produit bitumineux, l'Impermo, ceci dans le but d'empêcher l'eau de pluie de se frayer un passage le long des fils d'aluminium de la couche extérieure et de pénétrer à l'intérieur des raccords. Les résultats obtenus furent bons et les raccords en question sont encore en service actuellement soit depuis 8 à 9 ans.

A notre avis, il y a lieu d'éviter l'emploi du laiton pour le serrage de conducteurs d'aluminium et le procédé de formation décrit n'est qu'un pis aller.

Pour jonctionner les lignes en aluminium aux bornes d'appareils ou à d'autres lignes en cuivre, il est bien préférable de faire emploi de raccords concentriques ou manchons spéciaux à l'abri des effets corrosifs, comme il en existe plusieurs types actuellement.

Ces raccords sont composés de deux parties; l'une en un composé d'aluminium (généralement en anticorodal) serre au moyen de pièces appropriées le conducteur d'aluminium, l'autre généralement en bronze exempt de zinc, assure le serrage de l'autre métal (borne d'appareil ou câble). Les deux parties du raccord sont reliées très soigneusement l'une à l'autre par serrage et blocage, de telle sorte que les agents extérieurs ne puissent agir sur la sur-

face de transmission du courant. Par surcroît de précautions, certains raccords bimétalliques du genre décrit sont usinés en forme de gorge sur la ligne de séparation des deux métaux et vernis ou enduits à cet endroit d'un vernis isolant; d'autres fois un boudin isolant est placé dans cette gorge. Cette mesure est destinée à soustraire à l'action des agents extérieurs la surface de contact des deux métaux.

Les résultats obtenus avec ce type de raccord sont bons, bien qu'on ne dispose pas de résultats basés sur un grand nombre d'années de service (5 à 6 ans). Leur prix d'achat est cependant assez élevé.

D'une manière générale, le problème du jonctionnement des conducteurs d'aluminium entr'eux ou à d'autres métaux doit être considéré comme un problème assez délicat et nécessitant des précautions. On fera évidemment bien de nettoyer et polir soigneusement la surface des conducteurs d'aluminium introduits dans les raccords; les actions corrosives provenant du voisinage avec un autre métal se manifestant principalement sur l'aluminium, on veillera quand c'est possible, à ce que l'eau de pluie en ruisselant ne s'écoule pas du conducteur en cuivre ou à base de cuivre vers l'aluminium, mais dans le sens contraire.

Ces considérations résument sommairement quelques expériences ou constatations faites sur le jonctionnement des conducteurs en aluminium. Nous pensons qu'elles intéresseront plus particulièrement les constructeurs d'installations en plein air et nous espérons qu'elles leur seront de quelque utilité.

Der Vorsitzende: Je remercie beaucoup M. Chioléro de son intéressant exposé et je donne immédiatement la parole aux autres rapporteurs qui se sont annoncés, soit à M. Heintelmann puis à M. Savoie des BKW.

Herr Tr. Heintelmann, Bernische Kraftwerke A.-G. (BKW), Bern: Ich habe nicht über Erfahrungen mit Aluminiumleitungen zu berichten, sondern überlasse das unserm Betriebsleiter, Herrn C. Savoie. Dagegen will ich Ihnen sagen, was die BKW bei den heutigen Verhältnissen getan haben und was sie weiter zu tun beabsichtigen.

Als sich vor einem Jahr der Mangel an Kupfer stark bemerkbar machte, trat auch bei uns die Frage auf, Aluminium wieder für Freileitungen zu verwenden. Unsere Werke haben bereits vor mehr als dreissig Jahren Aluminiumleitungen erstellt. Die damit gemachten Erfahrungen waren nicht sehr günstig. Heute verfügen wir allerdings über bessere Bau-Erfahrungen. Es ist auch bessere Zubehör — Verbindungsmuffen, Klemmen usw. — vorhanden, die früher fehlte. Im weitem steht heute auch Aldrey zur Verfügung.

Unsere Werke haben sich nach reiflicher Ueberlegung entschlossen, für unsere Regelleitungen in der Hauptsache Aldrey-Leiter zu verwenden. Die etwas geringere Leitfähigkeit von Aldrey gegenüber Reinaluminium scheint uns durch die Vorteile des Aldreys aufgewogen. Das gilt besonders für den Durchhang, der gleich gewählt werden kann wie bei Kupfer. Wir waren der Auffassung, bis 8 mm \varnothing Aldrey-Drähte verwenden zu können. Das Starkstrominspektorat machte uns dann allerdings darauf aufmerksam, dass nach Art. 78/3 der Starkstromverordnung nur Aluminiumseile verwendet werden dürfen; dieser Artikel spricht allerdings nur von Aluminium, nicht aber von Aluminiumlegierungen, z. B. Aldrey¹⁾.

¹⁾ Vgl. Bulletin SEV 1941, Nr. 24, S. 645.

Wir haben Aldrey-Seile mit den Querschnitten von 25, 35, 50, 70 und 95 mm² bestellt. Wir wählten hiefür die genormten Querschnitte. Unsere Auffassung, man sollte bis zu 50 mm² Querschnitt Drähte verwenden, bleibt bestehen. Dickere Drähte sollten nach unserer Ansicht wegen der Steifheit der Leiter nicht verwendet werden, da die Verlegung zweifellos schwierig wird.

Nebst dem Leiter-Material haben wir die nötigen Verbindungsmuffen und Klemmen — soweit solche in der Schweiz erhältlich sind — bei Schweizer Firmen bestellt. Für die andern benötigten Klemmen wählten wir die ausländischen Modelle, die im Katalog der Elektromaterial A.-G., Zürich, enthalten sind.

Neben den Klemmen werden wir auch die Verbindungen von Aluminium auf Kupfer mit Aluminium-Röhrchen durchführen, wie dies im Bulletin SEV 1941, Nr. 5, angegeben wurde.

Die Aldrey-Leiter lassen wir in Ringen von 100 kg, die in Papier eingewickelt sind, anliefern, und einzelne Mengen werden wir auf Kabelrollen bis 300 kg liefern lassen.

Für die Verlegung der Leiter finden für unser Personal Instruktionkurse statt, um dieses für sachgemässe Arbeit auszubilden. Wir haben ihm den Sonderdruck über die Anleitung, erschienen im Bulletin SEV 1941, Nr. 5, ausgehändigt. Die künftigen Erfahrungen werden zeigen, ob noch weitere Instruktionen nötig sind und ob in der gewählten Zubehör Verbesserungen oder Erleichterungen geschaffen werden können.

Noch einige Worte zum Aldrey-Seil selbst: Für den Aufbau der Seile und den Durchmesser der einzelnen Drähte haben wir in der Schweiz keine Normen. Wir haben zwischen den Offerten, den Bestellungen und den Lieferungen Differenzen sowohl im Aufbau des Seiles selbst als auch im

Durchmesser der Drähte festgestellt. Diese Verhältnisse können sich nachteilig auswirken. Eine Normung scheint uns unbedingt nötig, oder man benütze die bereits vorhandenen DIN-Normen Nr. 8201 oder den DIN-Entwurf 48180.*

Wenn künftig Aldrey-Drähte zugelassen würden, wäre zu prüfen, ob man nicht an Stelle der Durchmesser die heutigen genormten Querschnitte von 25, 35, 50, 70 und 95 mm² festlegen könnte. Mit einer Normung wäre Garantie vorhanden, dass die Verbindungsmuffen, Klemmen und das übrige Material zu den Leitern passt. Ist eine solche Anpassung nicht vorhanden, besteht die Gefahr, dass unrichtig dimensionierte Klemmen, Muffen usw. verwendet werden und daher die Verbindungen ausreissen; die Ursachen werden dann nicht dem Mangel an richtiger Zubehör zugeschrieben, sondern man spricht dann zweifellos vom verwendeten Aluminium, das sich nicht für Freileitungen eigne. Die Möglichkeit einer solchen Kritik sollte man von vornherein zu verhindern suchen.

Herr C. Savoie, Bernische Kraftwerke A.-G. (BKW), Bern: Ich kann über die bisherigen Erfahrungen noch kurz folgendes berichten:

Wir haben seit 1921/22 eine ganze Anzahl 150 000-V-Leitungen aus Aluminiumseilen mit Stahlseele montiert. Ueber die damit gemachten Erfahrungen hat Herr Chioléro von der EOS berichtet; die Erfahrungen der BKW decken sich gänzlich mit denjenigen, über die er sich geäußert hat. Wir haben mit dem Aluminium-Stahl-Seil die besten Erfahrungen gemacht. Wir verwenden in der Hauptsache ähnliche Konstruktionen wie die EOS; ich will deshalb über die 150 000-V-Leitungen und die Erfahrungen damit nicht ausführlicher werden.

Im Hochspannungsnetz der BKW haben wir — datierend vom letzten Krieg — sowohl bei 50 000-V- als auch bei 16 000-V-Leitungen einige längere Strecken aus Aluminium. Es handelt sich um Reinaluminium-Seile von 82,4 mm² oder um Aluminium-Seile von 30 mm². Die Erfahrungen sind gut; die Leitungen haben zu keinen wesentlichen Beanstandungen Anlass gegeben. Die Schwierigkeiten, die da und dort auftraten, liegen in den Muffen. Die Leitungen haben Arlde'sche Verbindungsmuffen. Diese Verbindung scheint sich zu bewähren, solange die Belastungen nicht zu hoch sind. Wir haben beispielsweise bei der Leitung Spiez-Burgholz, die elektrochemischen Zwecken dient, 1938 das Aluminium weggenommen und durch Kupfer ersetzt, weil infolge der starken Belastungen die Würgmuffen nicht mehr befriedigten und Korrosionserscheinungen auftraten. Bei andern Leitungen haben wir uns damit beholfen, dass die Würgverbindungen vor zwei bis drei Jahren durch Muffensicherungen — es handelt sich um Klemmverbindungen mit einem als Leiter ausgebildeten Zwischenstück — überbrückt wurden, um die elektrische Belastung der Würgverbindung zu verbessern. Damit haben wir gute Erfahrungen gemacht.

Die Montage der betreffenden Leitungen erfolgte schon 1917—1920, und zwar jeweils mit dem Bögli-Bund mit eingefrästen Nuten. Wir haben aber gesehen, dass wir auch gewöhnliche Bögli verwenden können, die Einfräsung also nicht nötig ist.

Im 16 000-V-Netz bleiben uns — auch vom letzten Krieg her — eine kleine Anzahl Leitungen in Aluminium-Seilen von 30 mm². Hier sind die Erfahrungen nicht gut: wir haben häufig Drahtbrüche infolge Zusammenschlagens der Leiter. Wir konstatierten, dass sich in den Adern mangelhafte Schweißstellen befanden und haben deshalb diese Leitungen möglichst ausgemerzt.

Es dürfte Sie in erster Linie interessieren, welche Erfahrungen wir in Niederspannungsnetzen gemacht haben. Darüber ist zusammenfassend mitzuteilen, dass die Erfahrungen schlecht sind. Offenbar sind sowohl die verwendeten Leiter als auch die Zubehör — kurz alles — als Notbehelf betrachtet worden. Es handelt sich um Aluminiumdraht von 4, 5, 6 und 7 mm \varnothing und um Aluminiumseile von 22, 32 und 40 mm² Querschnitt. Rundweg kann man sagen, dass der Draht sich besser bewährt hat — oder weniger schlecht — als das Seil. Wir konstatierten, dass der Draht unter dem Zusammenschlagens der Leiter weniger Schaden erleidet als die damals verwendeten Seile.

Als Verbindungsstücke zwischen Aluminium und Alu-

minium oder Aluminium und Kupfer wurden seinerzeit verzinnete Messing-Krallenklemmen verwendet. Sie haben sich nicht bewährt. Es trat Korrosion auf, wie wir sie an der Demonstrationstafel gesehen haben²⁾.

Diese Netze wurden vor 10..12 Jahren anlässlich von Spannungsumbauten zum Teil durch Verwendung von Kupfer verbessert, zum Teil wurden die Aussenbezirke in Aluminium belassen. Bei dieser Gelegenheit wurden auch die Klemmenverbindungen ersetzt. Zur Anwendung kamen — eigentlich auch mehr behelfsmässig — verzinkte Eisenklemmen. Die Klemmen sind sehr hässlich und nicht mehr zeitgemäss; sie haben sich aber nicht schlecht bewährt, und Defekte wurden uns nicht gemeldet. — Ferner wurden verzinkte Kupferklemmen verwendet, die sich, wie herausgeschnittene Exemplare zeigen, seit 10..12 Jahren gut bewährt haben und keine Korrosion aufweisen.

Wie schon erwähnt, wurde darauf geachtet, das Kupfer möglichst unten, das Aluminium oben zu montieren.

Ueber das Einfetten solcher Verbindungen liegen keine Berichte vor; offenbar sind hier keine Vorsichtsmassnahmen getroffen worden.

Der Zustand der Aluminiumseile im allgemeinen hat im Hochspannungsnetz zu keinen Beanstandungen Anlass gegeben. Gegenwärtig holen wir beispielsweise die Aluminiumseile von 82 mm² Querschnitt, die auf der bereits erwähnten Leitung Spiez-Burgholz montiert waren und im Jahr 1938 heruntergenommen wurden, wieder hervor und verwenden sie jetzt in Sekundärnetzen. Es zeigt sich, dass die Seile gut erhalten sind.

Wenn ich zum Schluss noch kurz anführen darf, welche Erfahrungen wir mit dem von Herrn Heinzelmann erwähnten neuen Material im Betrieb gemacht haben, so ist folgendes zu sagen: Wir haben in den wenigen Wochen, seitdem wir Aluminiummaterial bzw. Aldrey erhalten haben, einige Leitungen montiert. Die Monteurgruppen berichten, dass mit den Aldrey-Seilen von 35 mm² gut zu arbeiten sei. Die Ringe von knapp 100 kg — entsprechend ca. einem km — sind vielleicht zu klein; sie werden auf dem Haspel, wie er gewöhnlich für Kupfer verwendet wurde, nicht leicht abgewickelt. Man muss die Werkzeuge ergänzen, am besten in der von Herrn Heinzelmann angeführten Weise. Durch Verwendung grösserer Ringe, von 300 kg zum Beispiel, liesse sich eine Verbesserung erzielen. Das Aldrey-Seil ist ziemlich steif und wickelt sich nicht gut ab; man verliert Zeit dabei.

Ueber die Zubehör, wie Muffen und Klemmen, kann ich noch nichts berichten, weil wir hier in einem Uebergangsstadium leben und vorerst noch mit allerhand Notbehelfen auskommen müssen, bis die definitive Zubehör erhältlich ist.

Der Vorsitzende: Je remercie sincèrement Messieurs Heinzelmann et Savoie de leurs communications qui vous auront certainement beaucoup intéressés.

Personne ne s'est annoncé pour un autre rapport; je prie ceux qui ont encore des communications à présenter ou des renseignements à demander de bien vouloir s'annoncer.

Herr R. Iselin, EW Basel: Ich möchte an Herrn Chioléro einige Fragen richten. Es hat mich sehr interessiert und war für mich neu, zu hören, dass für Stahl-Aluminium-Seile auch die Flachrohrverbindung verwendet wird. Diese Muffe ist zweifellos sehr billig und auch sehr leicht zu handhaben und zu montieren. Aber ich frage mich, ob durch das Verdrehen der Muffenenden an der Verseilung der Stahlaluminium-Leiter keine Unregelmässigkeiten im Drall auftreten, z. B. Korbildung.

Zum andern interessiert es mich, zu erfahren, ob zwischen Aluminium- und Stahlseele keine Verschiebung stattfindet, weil die Stahlseele zum grössern Teil den Zug aufnehmen muss. Bei andern Konstruktionen wird das Aluminium- und das Stahlseil getrennt verbunden.

Es wäre weiter interessant, zu erfahren, ob sich an den abgeschnittenen Enden der galvanisierten Stahlseile keine Verrostungen bilden, weil dort die Verzinkung verloren geht und, wenn ja, ob besondere Vorkehrungen getroffen werden (Anstriche).

Dann möchte ich noch fragen, ob sich diese Muffen bis heute bewährt haben und ob sie auch für Stahl-Aluminium-Seile verwendet werden.

* ETZ 1941, Nr. 6, S. 140.

²⁾ Bulletin SEV 1941, Nr. 24, S. 648.

Der Vorsitzende: Je puis répondre à M. Iselin: Avec les jonctions torsadées, il y a lieu de remarquer que pour des câbles de section plus grande il faut non seulement employer des manchons de section plus grande mais aussi à paroi plus épaisse; leur résistance mécanique doit en effet correspondre à la résistance plus grande du câble. Il s'en suit qu'il faut des efforts plus grands pour tordre le manchon de sorte qu'il peut arriver que par cette opération on écrase un peu les câbles. Cependant, comme vous l'a dit M. Chioloro, cette jonction s'est encore très bien comportée avec des câbles d'une section de 185 mm² d'aluminium et 43 mm² d'acier; mais nous croyons avoir atteint là, sa limite supérieure d'utilisation. Si l'on voulait aller plus loin il faudrait des dispositifs spéciaux pour tordre les manchons ce qui compliquerait les choses.

Comme les manchons ne sont tordus que de 3 ou 4 tours, cette torsion n'a aucune influence sur une longueur de câble de 1 km et davantage; nous n'avons jamais remarqué d'altération dans le câblage, comme la formation de ventres, par exemple.

Nous n'avons jamais constaté dans les jonctions torsadées de glissement entre l'aluminium et l'acier. On peut dire que ces jonctions sont montées une fois pour toutes et ne bougent plus. De toutes celles qui ont été établies soit en 1920 — il y a donc 21 ans — sur la ligne Lausanne-Genève pour du câble de 135 mm² d'aluminium et 31,5 mm² d'acier, soit plus tard sur d'autres lignes et pour du câble de la section de 185 mm² d'aluminium et 43 mm² d'acier, aucune ne nous a jamais donné le moindre ennui. Si depuis, nous avons utilisé des manchons à cônes Vontobel, c'est parce qu'il s'agissait de raccorder des câbles de sections plus grandes. Le montage de ces manchons à cônes doit être surveillé de très près car il doit être fait très soigneusement; si ce n'est pas le cas, on risque de voir ces manchons lâcher.

Les extrémités des cordes d'acier galvanisé qui dépassent de part et d'autre les manchons torsadés sont ligaturées par du fil d'aluminium et sont en outre peintes d'un vernis au goudron. Nous n'avons jamais fait de mauvaises expériences à ce sujet même si un peu de rouille se produit aux extrémités des fils d'acier.

Herr A. Zaruski: Wenn Zweifel über den Würgvorbinder hinsichtlich der Störung der Verseilung bestehen, so kann der Kerbverbinder angewendet werden. Er besteht aus einem platt gedrückten Al-Rohr, in welches, nachdem die zu verbindenden Leiterenden eingeschoben sind, mit einem Spezialwerkzeug Kerben eingedrückt werden. Eine Verdrehung des Rohres und der zu verbindenden Leiterenden findet somit nicht statt. Die Erfahrungen, die mit dem Kerbverbinder in Deutschland und Holland gemacht wurden, sind durchwegs gut. Die Ausfüllung des Verbinderrohres durch die Leiter ist bei dem Kerbverbinder kompakter als beim Würgvorbinder.

Der Vorsitzende: Je suis du même avis que M. Zaruski, c'est-à-dire que le joint crénelé est encore meilleur mais il demande un appareillage spécial pour le montage. Pour le joint torsadé il suffit d'avoir deux tourne à gauche; on en serre un à chaque extrémité du manchon et celui-ci peut alors être tordu. Il n'y a donc pas d'installation spéciale à avoir.

Herr R. Iselin, EW Basel: Ich möchte Herrn Zaruski anfragen, ob sich der Kerbverbinder auch für Stahl-Aluminium-Seile eignet oder bestehen in dieser Beziehung Befürchtungen?

Herr A. Zaruski: Die Verwendung des Kerbverbinders für Stahl-Aluminium-Seile ist möglich; es ist jedoch zu berücksichtigen, dass infolge der ungleichen Härten von Stahl und Aluminium mehr Kerben für einen solchen Verbinder nötig werden. Die Kerbtiefe muss verkleinert werden, um die Aluminiumdrähte nicht zu verletzen. Erfahrungen über Kerbverbindungen an Stahl-Aluminium-Seilen sind uns nicht bekannt; m. E. müssen solche Verbindungen mit äusserster Sorgfalt hergestellt werden. — Bezüglich der Bemerkung von Herrn Heinzelmänn über verseilte und massive Leiter aus Aldrey ist zu erwähnen, dass in Art. 78 der BV nur etwas über die Verwendung von Aluminium in verseilter Form, nichts aber über Aldrey bemerkt wird. Das StI begann

im Mai dieses Jahres mit seinen Untersuchungen über Aldrey; ich erwähne, dass wir keine Unterlagen über dieses Material zur Verfügung hatten. Die verbindlichen mechanischen Daten wurden dem StI im Sommer durch die AIAG mitgeteilt. Wir hielten deshalb zurück und empfahlen vorerst die Verwendung von Aldrey in nur verseilter Form. Heute kann ich sagen, dass das StI vorbehaltlich der Genehmigung durch die zuständige Behörde Aldrey in Form von massiven Drähten von 4 mm ... 8 mm \varnothing provisorisch zulassen wird. Zur Verwendung von Drähten bis 95 mm² Querschnitt erwähne ich, dass wir die Zulassung von Drähten bis 50 mm² im Sinne haben. Als dickster Draht wird heute allgemein 8-mm-Draht (50 mm²) verwendet. Wir glauben, dass die Verarbeitung von Drähten von über 8 mm \varnothing infolge ihrer Steifheit Schwierigkeiten aufweisen wird, die von den Monteuren nur noch zum Teil gemeistert werden können.

Wegen der anderen Ausführungen von Herrn Heinzelmänn sei auf den Vortrag vor dem SEV verwiesen.

Herr W. Howald, Elektrobank, Zürich, berichtet aus der amerikanischen Praxis der Verwendung von Aluminium. Das ausführliche Votum erschien im Bericht über die Aluminiumtagung des SEV, Bulletin SEV 1941, Nr. 24, S. 654.

Herr W. Leimgruber, Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ): Mit folgenden Ausführungen orientiere ich Sie kurz über meine Erfahrungen im Leitungsbau mit Aluminium. Während meiner Auslandspraxis in den Jahren 1911 bis 1916 in Deutschland, und zwar in Pommern und Stralsund, elektrifizierten wir dort als Leitungsbau-Unternehmer die ganze Insel Rügen und in Ostpreussen ein Gebiet, das zusammen ungefähr zweimal so gross ist wie der Kanton Zürich. Es wurde damals für Leiter aus Leichtmetall ausschliesslich Rein-Aluminium verwendet. Wir bauten dort Oberspannungsleitungen von 50 kV, Mittelspannungsleitungen von 10 kV und Niederspannungsnetze von 380 V. Man hat überall für alle drei Kategorien Seile verwendet, und zwar bei der Niederspannung als kleinsten Querschnitt 16 mm², bei den andern Leitungen 25, 50, 95 und 150 mm². Die meisten Leitungen wurden der Kräfte entlang gezogen, um bei den vorherrschenden Grossgrundstück-Verhältnissen das Land nicht mit Leitungen zu belasten.

Leiter-Verbindungen. Zugfeste Verbindungen wurden am Anfang bei Hochspannung ausschliesslich mit Rohrverbindern, Würgvorbindern (Arlsche Röhren) gemacht. Später ging man zum Kerbverbinder über. In den Ortsnetzen hatte man neben Niet- und Schraubverbindern fast ausschliesslich die Konusmuffe, und zwar ein sowohl in bezug auf die Materialmasse als auch auf die Ausführung leichteres und noch etwas kleineres Modell als das hier verwendete.

Als zuglose Verbinder in den Abzweigungen wurden Aluminium-Klauenklemmen mit zwei Schrauben verwendet, die für uns wahrscheinlich auch in Betracht kommen werden, oder Unimax-Klemmen.

Ich kam dann im Jahre 1934 wieder in die gleiche Gegend, schaute mich um und fragte nach, welche Erfahrungen gemacht worden seien. Man hat mir erklärt, dass sich die Rohr- oder Kerbverbinder für Hochspannung bewährt haben. 1938 war ich nochmals in Deutschland. Man bestätigte mir das vorherige Urteil, fügte indessen bei, man neige jetzt eher zum Kerbverbinder. Die nach dem Kriege auch für Mittelspannungsleitungen verwendeten Konusverbinder haben sich dagegen nicht bewährt und sind ein Fehlschlag gewesen. Den Beweis erbringen unsere Erfahrungen bei den EKZ.

Haus-Abzweigung. Die Hausinstallationen in Ortsnetzen wurden in Kupfer ausgeführt wie bei uns. Dort hat man sich einer ganz einfachen, allerdings gut verzinkten Eisenklemme mit Doppelschraube bedient, damit man die Seile besser pressen konnte. Die einschraubigen Verbindungen mussten ausgewechselt werden, weil bei diesen Korrosion auftrat (die Schraube wurde locker und das Aluminium überzog sich mit Aluminiumoxyd, wodurch sich die Verbindungen mit der Zeit verschlechterten). Die Betriebsleitung führte diese Erscheinung auf die schlechte Schraubverbindung und die schlechte Pressung der Seile zurück.

In Ortsnetzen wurden aus rein ästhetischen Gründen die Kerbverbinder nicht verwendet. Steht beispielsweise auf einem Platz eine Stange mit acht solchen Verbindungsroh-

ren in den Leitern, so sieht das ziemlich schwerfällig aus. Deshalb ging man zur Verwendung von Konusmuffen über. Diese Konusmuffen haben sich in Ortsnetzen sehr gut bewährt; man hört von keinen nachteiligen Erfahrungen.

Befestigung der Leiter an den Isolatoren. Die Vorschläge der Aluminium-Industrie A.-G. (AIAG)³⁾ sind schon ziemlich alt. Ich habe z. B. zu Hause einen ganz ähnlichen Bund aus dem Jahre 1913. Die heutigen Vorschläge sind annähernd von den damaligen übernommen; es werden also überall bei Hochspannung Wickelbünde, gewöhnliche oder verstärkte Kreuzbünde, durchgehender Leiter mit Reinaluminiumband 10×1 mm umwickelt. Für grössere Querschnitte und Spannweiten kommen Bögli- oder Bügelbünde in Betracht. Um Material zu sparen, wird vom gleichen Seil ein Stück als Bögli verwendet — es gibt ja immer Resten —, wobei sie schon vorher im Magazin zweckdienlich zugeschnitten und vorgeformt werden können. Damals wurde auch der Bügel im Magazin mit Band von 4×1 mm \varnothing umwickelt. Bei diesen Bündeln haben sich gar keine Nachteile gezeigt.

End- oder Schlussbünde. Das Ende des Seiles wird um den Isolatorenhalbs gebogen und bei kleineren Querschnitten mit Aluminiumband 4×1 mm und bei grösseren Querschnitten mit 10×1 mm umwickelt.

Erfahrungen der EKZ mit Aluminium-Leitungen. Gegen Ende des letzten Krieges haben die EKZ auch mit dem Bau von Aluminium-Leitungen, freilich nur für Hochspannung, begonnen. Diese Leitungen haben sich mit Ausnahme der alten Konusmuffen im allgemeinen gut bewährt. Bei Kurzschlüssen sind die Seile, vielleicht nicht schon das erste Mal, bei den Konusmuffen durchgeschmolzen. Wir haben deshalb grössere Versuche gemacht und dabei festgestellt, dass bei Verwendung von Konusmuffen im 85-mm²-Seil bei einem Kurzschlussstrom von ungefähr 10 000 bis 12 000 A die Seile restlos abschmolzen, und zwar immer unmittelbar bei den Muffen. Die Nachforschungen nach den Ursachen ergaben, dass einzelne Adern der Seile im Konus zu wenig gepresst werden, weshalb der Uebergangswiderstand dort und im Gewinde zu gross wird. Wir haben in der Folge Konus-Verbinden (Modell Vontobel) probiert, und zwar auch mit Stromstärken bis 12 000 A und damit gute Erfahrungen gemacht, so dass wir uns entschlossen, alle Muffen auf den bestehenden Leitungen auszubauen.

Im Kantonswerk Zürich haben wir ungefähr 80 km Hochspannungsleitungen mit Reinaluminium-Seilen von 85-mm²-Querschnitt. Ausser diesen hatten wir aber auch ca. 20 km Aluminium-Seile von 32 mm². Dieser Querschnitt hat nicht befriedigt, weil die Seile beim geringsten Windstoss zusammenschlugen, wodurch einzelne Adern schmolzen. Heute besitzen wir nur noch Leitungen von 85 mm² und verzeichnen praktisch nicht mehr Störungen als bei Leitungen mit Kupferleitern.

Als zugfeste Verbindungen wurden eben die nicht befriedigenden Konusverbinden gewählt. Gegen die Würig- und Kerbverbinden hatte man eine Abneigung. Als zuglose Verbinden und Uebergang, von Kupfer auf Aluminium haben wir speziell konstruierte Verbindungen verwendet, welche sich aber auch nicht bewährt haben und daher ausgewechselt werden mussten.

Es ist ferner das *Stangenbild*, senkrechte Leiterabstände, zu beachten. Die Vorschriften in der Schweiz geben Anhaltspunkte über das Stangenbild und die Distanzierung der Drähte der einzelnen Phasen voneinander für Kupferleitungen. Wir haben festgestellt, dass für Aluminium-Leitungen künftig *etwas weiter gegangen* werden soll, da die Leiter beim Abfallen von nassem Schnee oder Rauhreif leicht schnellen. Durch dieses Schnellen oder Springen entstehen Brandspuren und bei Wiederholungen brennen die Seile durch. Deshalb ist die etwas grössere Distanzierung sowohl für Mittelspannungs- als auch für Niederspannungsleitungen nötig.

Wir haben für die *Zukunft* analog wie bei der Kupferleitung die Verwendung von Aldrey-Seilen von drei verschiedenen Dimensionen, nämlich 25, 50 und 95 mm² Querschnitt, vorgesehen. Die nächstgrössere Dimension ist also jeweils ungefähr doppelt so stark wie die nächstkleinere. Das gleiche Verhältnis haben wir bei den Kupferleitern von 4, 5½ und 8 mm Durchmesser. Die Seile haben wir in den

genannten Dimensionen in Auftrag gegeben und bereits im Frühjahr 1941 einige Tonnen davon bestellt.

Beim Aufbau der Seile haben wir Rücksicht auf die Verwendung der anfallenden Resten genommen. Die Seilabfälle müssen gegläht als Binddraht verwendet werden. Wir haben die Seile deshalb wie folgt konstruieren lassen: 25 mm² in $7 \times 2,1$ mm Durchmesser, 50 mm² in $12 \times 2,3$ mm Durchmesser und 95 mm² in $19 \times 2,5$ mm Durchmesser.

Verbindungen

Zugfeste Verbinden. Wir werden, wie bereits gesagt, als Zugverbinden Vontobel-Muffen verwenden, die sich bewährt haben. Bei Mittel- und Niederspannungen genügen diese für die auftretenden Ströme.

Zuglose Verbinden. Hier beabsichtigen wir beim Uebergang von Aluminium auf Aluminium bei den Abzweigungen in Niederspannungsnetzen eine Klauen- oder Unimax-Klemme aus Aluminium oder einer Aluminiumlegierung mit zwei Schrauben zu verwenden, und zwar verzinkte Eisenschrauben mit Federung, weil die Aluminiumschrauben für unsere Handwerker zu schwach sind. Die Köpfe würden leicht abgedreht, oder sie erhalten zum mindesten den Anfang zu einem Bruch und fallen dann herunter. Diese Klemme reicht aus für Al-Seil 16...95 mm².

Verbindung Kupfer-Aluminium. Hiefür haben wir zwei Modelle vorgesehen. Das bis heute verwendete Modell ist auch im neuen Katalog der «Elektro-Material» enthalten. Es ist ein deutsches Fabrikat, die Schellen-Verbindung von Hofmann, Kötschenbroda, die sich bei uns gut bewährt hat; innerhalb zwölf Jahren haben wir nicht die geringste Störung gehabt. Zwecks Materialersparnis haben wir nur zwei Grössen eingeführt, und zwar die eine für Kupfer von 16...70 mm² und für Aluminium von 16...70 mm² und die andere für Kupfer und Aluminium von 50...150 mm².

Hausabzweigung (Verbindung der Freileitung mit der Hauseinführung). Wir haben vor, einfache, gut verzinkte Eisenklemmen, und zwar solche mit zwei Schrauben mit Federung zu verwenden. Sie sind auf der einen Seite ausgeführt zur Aufnahme von Aluminium von 25...50 mm², auf der andern Seite, inneninstallationsseits, von 6...25 mm² Kupfer. 95 mm² für Hausanschlüsse werden wir kaum erhalten.

Um möglichst wenig Muffen zu erhalten, lassen wir die Seile auf Holztrommeln liefern (ungefähres Gewicht 400...500 kg pro Trommel).

Regulieren

Was das Regulieren (Spannen) der Seile betrifft, sind wir der Meinung, man sollte das Aldrey etwas straffer spannen als das Kupfer, weil bei Niederspannungsnetzen die Gefahr des Zusammenschlagens grösser ist als bei Hochspannungsleitungen. Aus diesem Grunde haben wir für Aldrey-Leiter die Durchhangstabelle für Reinaluminium aus der Verordnung über Starkstromanlagen vom Jahr 1933 vorgesehen. Damit regulieren wir das Aldreyseil etwas straffer als Kupfer, ohne aber die höchstzulässige Beanspruchung von 18 kg/mm² zu erreichen. Wenn wir Aldrey-Seile verarbeiten, stellen wir fest, dass das Seil ziemlich stablig-steif ist und dass es nicht so leicht ist, die Drähte oder Seile so zu spannen, dass die Leitungen gut aussehen. Wir glauben, dass wir mit dieser Methode das Richtige treffen.

Bünde. Es ist überall der Wickelbund, der sich bewährt hat, vorgesehen. Diese Bünde geben allerdings etwas mehr Arbeit.

Um nicht überall den Schwierigkeiten Kupfer-Aluminium begegnen zu müssen, haben wir vorläufig vorgesehen, in Netzen, die sich besonders gut eignen, das Kupfer vollständig abzubrechen und Aluminium-Netze zu erstellen. Das dort frei werdende Kupfer wollen wir überall da wieder verwenden, wo in bestehenden Ortsnetzen kleinere Erweiterungen vorzunehmen sind.

Das Wichtigste aber ist die *Ausbildung des Personals*. Wir machen die Erfahrung, dass die älteren Monteure das Aluminium nicht mehr zuverlässig verbauen können. Wir haben seinerzeit Vorschriften gehabt; sie waren gut, aber sie wurden nicht beachtet, weil die Leute dachten, das sei «wurst» und die Vorschriften seien zu gesucht. Daraus resultierten nachher die relativ schlechten Erfahrungen. Wir sehen nun vor, eine oder höchstens zwei Gruppen im ganzen Versorgungsgebiet speziell auszubilden; wir werden Leute aussuchen, die Freude haben und sich dazu hergeben, noch

³⁾ Bulletin SEV 1941, Nr. 5, S. 83—85.

etwas Neues zu lernen. Mit solchen speziell ausgebildeten Leuten wollen wir dann Aluminium verbauen. Die Grösse der Ausbildungsgruppen beträgt 6..8 Mann.

Man sieht gelegentlich heute schon, wie Aluminium verbaut wird: Da wird irgendein Klempner oder Schlosser einer Gemeinde vom Elektrizitätswerk beauftragt, und dieser montiert die Leiter und bindet sogar mit Kupferbindendraht. Mit solchen Leuten hat man schlechte Erfahrungen gemacht; sie schimpfen nur über das Material, aber nicht über ihre Arbeit.

Wir legen bei uns grösstes Gewicht darauf, dass in dieser Richtung das möglichste getan wird: Das Personal muss ausgebildet und orientiert werden darüber, warum man die Arbeit so verlangt. So hoffen wir dann, anständige Resultate zu erhalten, so dass mit der Zeit das Aluminium dem Kupfer annähernd gleichgestellt werden kann in bezug auf Störungen usw. sowohl in Mittelspannungs- als auch in Niederspannungsnetzen.

Herr R. Vögeli, Motor-Columbus A.-G., Baden: Wir haben gehört, dass mit den Aluminiumleitungen ganz verschiedene Erfahrungen gemacht wurden. Wenn man prüft, warum das so ist, dann findet man die Ursache sehr leicht. Die Leute, die von Anfang an das Aluminium als ein neues Metall behandelt haben, das nach seinen eigenen Gesetzen behandelt sein will, haben gute Erfahrungen gemacht; diejenigen aber, die vom Kupferleitungsbau her einfach die Armaturen umgebaut und sie wieder aus Aluminium hergestellt haben, haben zum Teil schlechte Erfahrungen gemacht und machen sie wahrscheinlich noch.

Das Kupfer ist wenig heikel in seiner Verwendung, da seine Oxydationsprodukte gut leitend sind. Das Aluminium dagegen ist schwieriger zu behandeln, weil die Oxydationsprodukte Isolatoren sind und daher beim geringsten Auftreten von Oxydationsprodukten eine rapide Verschlechterung jeder Verbindung eintritt. Es tritt dann jene Erwärmung ein, die noch raschere Oxydation erzeugt, und da gibt es dann die zerstörten Verbindungsstellen, die Sie kennen.

Ich habe einige Muster von solchen defekten Verbindungsstellen mitgebracht, die an Aluminiumleitungen auftreten können; die Ursache ist bei allen dieselbe: ungenügender Kontaktdruck. Wenn in einem solchen Verbinder der Leiter sich infolge des Stromdurchgangs erwärmt und dann wieder abkühlt, reduziert sich der Kontaktdruck, und die Folge ist eine beginnende Zerstörung, die fortschreiten kann, bis der Verbinder völlig zerstört ist.

Klemmen eignen sich nur dann für Aluminium-Seile, wenn sie dauernd den Kontaktdruck aufrecht erhalten. Sie haben gehört, dass Würgeverbinder wie auch die von den BKW verwendeten Pressverbinder sich sehr gut

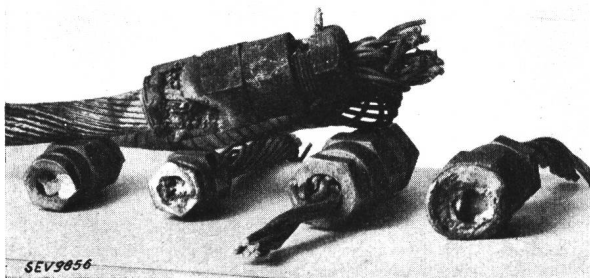


Fig. 1.
Defekter Konusverbinder.

gehalten haben. — Das sind Verbinder, die ganz speziell für Aluminium- und Stahl-Aluminium-Seile hergestellt wurden und sich daher auch entsprechend gehalten haben. — Die Konusverbinder haben sich auf allen Kupferleitungen sehr gut bewährt; sie wurden dann aus Aluminium hergestellt auch auf Aluminiumleitungen verwendet. Das Resultat war um so schlechter, je kleiner der darauf entfallende Seilzug war. Ganz unbefriedigend war

das Verhalten in Seilschlaufen. Da ist ein Konusverbinder für ein Seil von 190 mm²; die Stromstärke an diesem Leiter war ungefähr 1 A/mm². Es sind da andere Seile: das genau gleiche Bild mit kleineren Querschnitten. — An einer Leitung sind am selben Morgen — einem kalten Januar morgen — hintereinander vier Verbinder durchgebrannt, nicht etwa alle miteinander — das wäre noch nicht so schlimm gewesen —; aber sobald die Leitung wieder in Betrieb war, kam ein neuer Verbinder dran. Das einzig verbleibende Mittel war die Ueberbrückung dieser Verbinder durch leitende Stücke, die den Strom nicht mehr durch den Verbinder gehen lassen, so dass den Verbindern nur noch die Aufgabe der mechanischen Kraftübertragung bleibt. Hiefür haben sie sich gut gehalten, und es ist nichts dagegen einzuwenden.

Es gibt noch andere Eigenschaften, die man beim Bau von Aluminiumleitungen beachten muss — Herr Leimgruber hat das bereits angetönt —: es sind die Leiterabstände. Wenn wir die Leiterabstände von Kupferleitungen einfach auf Aluminiumleitungen übertragen, dann werden sich die Erfahrungen wiederholen, die sich beim Verbinder gezeigt haben. Für Höchstspannungsleitungen — schweizerische Verhältnisse — von 150 000 kV waren die Erfahrungen gut, deswegen, weil dort notwendigerweise grosse Leiterabstände gewählt werden müssen. Bei Mittelspannungsleitungen waren, wie Sie gehört haben, die Erfahrungen unbefriedigend, bei Niederspannungsleitungen noch schlechter. Das rührt von den geringen Leiterabständen her. In Amerika und in Deutschland ist man dazu übergegangen, für Aluminiumleitungen neue Mastbilder zu wählen; ich glaube, dass wir in der Schweiz auch dazu kommen werden und kommen müssen, wenn wir allgemein zum Aluminium-Leitungsbau übergehen werden.

Es gibt drei Ursachen, die bei gleichem Mastbild bei Aluminium- und Aldrey-Leitern — bei Leichtmetall-Leitern ganz allgemein — eher zu Kurzschlüssen führen können als bei Kupferleitern. Einmal ist es die grössere Durchhangsänderung der Leichtmetall-Leiter bei Zusatzlast als Folge des kleineren Elastizitätsmoduls, dann aber, noch wichtiger, die grössere Schnellhöhe der Leichtmetall-Leiter beim Abfallen dieser Zusatzlast und endlich die grössere Auslenkung der Leiter durch den Wind.

Ueber die Durchhangsänderungen zufolge Ansetzens von Zusatzlasten an den Leitern und das Hochschnellen der Leiter beim Abfallen von Zusatzlasten sind in jüngster Zeit eingehende Untersuchungen durchgeführt worden. Die für die Leitungen gefährlichsten, ungleichmässig verteilten Zusatzlasten und das Abfallen derselben, namentlich wenn es nicht gleichzeitig erfolgt, sind der Berechnung unzugänglich. Es ist aber jetzt gelungen, diese Erscheinungen an Modellen nachzubilden und zu untersuchen. Ueber diese Untersuchungen wird wahrscheinlich in der Fachliteratur bald Näheres erscheinen. Sicher ist, dass man die Mastbilder von Kupferleitungen nicht einfach verwenden darf für Aluminiumleitungen, speziell nicht bei Mittelspannungs- und Niederspannungsleitungen.

Will man für die Zukunft Rückschlüsse in der Verwendung von Leichtmetallen im Leitungsbau vermeiden, so müssen jetzt alle besonderen Eigenschaften derselben berücksichtigt werden.

Herr Böhi, EW Bürglen: Wir hörten Mitteilungen, die sich jedenfalls auf Drehstrom beziehen. Es interessiert mich, zu erfahren, ob auch für Gleichstrom Erfahrungen vorliegen und ob sie anders sind als für Drehstrom.

Herr A. Zaruski: Spezielle Erfahrungen über Aluminium in Gleichstrombetrieben sind uns keine gemeldet worden.

Herr E. Wydler, Aargauisches Elektrizitätswerk (AEW), Aarau: Im letzten Weltkrieg und auch seither wurde für Regelleitungen vorwiegend Reinaluminium verwendet, von dem dann im Laufe der Zeit wegen unangenehmen Begleiterscheinungen wieder viel demontiert wurde und ohne weiteres als Altmaterial eingeschmolzen und für andere Zwecke verarbeitet werden konnte. Aus den Voten der Herren Vorredner geht indessen hervor, dass heute mehr das Aldrey

auch für Regelleitungen verwendet werden sollte, einmal wegen seiner grösseren Zerreihsfestigkeit und der Möglichkeit, dass Aldrey jedenfalls auch als massiver Draht bis ca. 8 mm \varnothing zugelassen werden kann. Immerhin ist doch zu sagen, dass bei Reinaluminium in elektrischer Beziehung eine Materialeinsparung möglich ist, was mit Rücksicht auf die gegenwärtig grosse Materialknappheit gerade auch in diesem Metall doch nicht vernachlässigt werden darf. Dann interessiert es mich, zu erfahren, ob es richtig ist, dass Aldrey zum Einschmelzen sich wegen der darin enthaltenen Verunreinigungen nicht eignet und somit gegebenenfalls wertlos würde, wenn das Kupfer wieder einmal so billig werden sollte wie in den Jahren 1930....1939 und da und dort Aldrey demontiert werden müsste.

Herr A. Zaruski: Die Verwendung von Aluminium in Form von massiven Drähten kann infolge seiner mechanischen Eigenschaften nicht empfohlen werden. Die Drähte können nur schwach gespannt werden, was bei kleinen Drahtdurchmessern beim Zustand 0° mit Schnee zu grosse Durchhänge zur Folge haben wird. Ueber die Einschmelzung von Aluminiumlegierungen und deren Wiederverwendung wird vielleicht Herr Preiswerk von der AIAG in der Versammlung des SEV berichten.

Herr Ch. Jean-Richard, Bernische Kraftwerke A.-G. (BKW), Bern: Die Schweissverbindungen von Aluminium-Drähten haben gegenüber dem Draht eine Festigkeit von etwa 50%; bei 30 Drähten, wie im Stahl-Aluminium-Seil für die 150-kV-Leitungen der BKW, bedeutet diese Verschlechterung der Festigkeit eine nicht sehr grosse, aber doch beachtliche Abnahme der gesamten Festigkeit.

Es ist nun im Heft «Archiv für Elektrotechnik» vom 26. August 1940 eine Arbeit erschienen über Untersuchungen des Kondensator-Schweissverfahrens zur Erreichung hoher Zugfestigkeit bei hartgezogenen Aluminiumdrähten. Nach dieser Arbeit soll es möglich sein, die Festigkeit der Schweissverbindung auf etwa 90% zu erhöhen; damit würde die Festigkeit des Seiles mit 30 Drähten praktisch unvermindert sein.

Der Vorsitzende: Je remercie beaucoup M. Jean-Richard de sa communication.

Revenant à une question qui a été soulevée tout à l'heure, je désire confirmer que l'aluminium doit être employé de préférence à l'aluminium pur sur les lignes aériennes; à cause de leur plus grande résistance mécanique, les conducteurs en aldreï peuvent être tendus davantage que ceux en aluminium pur, de sorte que des contacts accidentels entre conducteurs se produisent moins facilement. Par contre le câble aluminium-acier est particulièrement recommandable pour des conducteurs d'une certaine section. L'expérience a montré que les conséquences d'un arc de courte durée sont en général moins sérieuses pour l'aluminium-acier que pour l'aldreï ou l'aluminium pur. D'autre part pour les lignes à très haute tension, le câble aluminium-acier présente, à cause de son âme d'acier, une section totale et donc un pourtour plus grands, ce qui diminue l'effet de couronne.

Herr A. Kleiner, Generalsekretär des SEV und VSE: Es wäre doch schade, wenn wir schon aufhören würden; denn ich bin überzeugt, dass noch viele sehr interessante Probleme nicht zur Sprache gekommen sind. Herr Präsident Schmidt hat eben von den guten Erfahrungen mit Stahl-Aluminium-Leitern gesprochen. Man hört aber gelegentlich auch von schlechten, so z. B. der sog. Korbildung, von der man aber nicht weiss, ob sie eintrat, weil sich die Klemmen nicht ganz bewährten, oder aus andern Gründen. Vielleicht haben die Werke, die Stahl-Aluminium-Seile verwendet haben, in dieser Beziehung Erfahrungen gesammelt und können heute mitteilen, wie man solche Defekte verhindern kann.

Auch würde wohl sehr interessieren, wie die von Herrn Howald erwähnten besonderen Klemmen, die von Amerika kommen und meines Wissens auch von den BKW verwendet werden, montiert werden. Soviel mir bekannt ist, werden die Stahlseele und Aluminiumdrähte sorgfältig je für sich verbunden, während man bei den Würgverbindern diese Komplikation umgeht. Es wäre interessant, etwas darüber zu hören, wie sich die beiden Verbindungsarten bewähren.

Dann hätte mich noch ein Weiteres interessiert: In den Kriegsjahren 1914/18 wurde beim Kraftwerk Mühleberg in Schaltanlagen sehr viel Aluminium verwendet. Es wurden damals unter der Leitung von Herrn Thut Konusverbinder entwickelt mit links- und rechtsgängigen Verschraubungen, an denen wir endlose Erwärmungsversuche durchführten. Nun interessiert es mich, wie sich dieses Material in den 25 Jahren bewährt hat, und zwar hauptsächlich deshalb, weil man häufig dem Aluminium in Schraubverbindungen nicht recht traut und ein Lockern der Verbindungen mit der Zeit infolge Fliessens des Materials befürchtet. Zeigen die Erfahrungen, dass diese Befürchtungen übertrieben sind, oder sind sie berechtigt?

Von Herrn Böhi wurde die Frage aufgeworfen, ob Erfahrungen über das Verhalten des Aluminiums in Gleichstromanlagen vorliegen. Ich glaube, hier muss vor allem daran erinnert werden, dass bei Gleichstromnetzen der Lichtbogen bedeutend gefährlicher ist als bei Wechselstrom. Da er schlechter löscht und eher länger stehen bleibt, ist es, wie wenn er «heisser» wäre. Daher muss bei Gleichstromnetzen offenbar noch viel sorgfältiger vorgegangen werden, damit die Leitungen nicht zusammenschlagen und Lichtbogen überhaupt nicht entstehen können.

Herr Ch. Savoie, Bernische Kraftwerke A.-G., Bern: Ich möchte Herrn Kleiner auf seine Fragen ganz kurz antworten.

Was die Anlagen in Mühleberg anbelangt, so haben sich die betreffenden Verbindungen in Aluminium absolut gut bewährt; es ist alles in Ordnung.

Nun die Kerbverbindung (Pressmuffe), die wir im 150 000-V-Netz verwenden: Es handelt sich um Aluminium-Stahl-Seil — Aluminium 170,5 mm², Stahlseele 39,8 mm². Da haben wir von jeher eine Pressmuffe benützt, wie Herr Kleiner geschildert hat. Die Stahlseele wird separat behandelt, und das Aluminium, das die elektrische Funktion übernimmt, wird bei der Montage ebenfalls getrennt behandelt. Da benützen wir die Muffenpressen, von denen uns Herr Howald berichtet hat.

Diese Muffenpressen sind eigentlich Instrumente, die in das Laboratorium oder in die Maschinenfabrik gehören; für Neuverbindungen sind sie gut zu gebrauchen. Was wir jedoch vom Betriebsstandpunkt aus bei diesen Kerbverbindungen beanstanden müssen, ist die Tatsache, dass sie sicher Schwierigkeiten bieten, wenn sie betriebsmässig unter schlechten Verhältnissen hergestellt werden müssen. Wir haben zunächst einmal den Transport der Muffenpresse — das geht bei unsern Verhältnissen nicht so bequem, wie es Herr Howald geschildert hat —; wir müssen auf Gebirgsstrecken mit Transportschwierigkeiten rechnen. Die Muffenpresse wiegt alles in allem 150 kg und übersteigt beinahe die Traglast oder die Schlittenlast. Ausserdem bietet sie bei niedrigen Temperaturen Schwierigkeiten; ihr Funktionieren ist bei 10...15° unter Null nicht sichergestellt. Immerhin: man kann damit arbeiten; aber wenn Herr Chioléro seine Würgverbindungen uns schildert, wird man ganz neidisch, wie einfach die Sache zu machen ist gegenüber dem Verfahren der Kerbverbindungen unter Anwendung der Muffenpresse.

Die Erfahrungen mit diesen Pressmuffen selbst sind absolut gut; wir haben nicht das geringste zu berichten über Defekte.

Damit glaube ich Herrn Kleiner die gewünschte Auskunft gegeben zu haben.

Herr H. Jäcklin, EW Bern, macht darauf aufmerksam, dass neben der Frage der Verwendung von Aluminium in Transformatoren- und Schaltstationen vermutlich auch bald die speziell die Städtewerke interessierende Frage der Verwendung von Aluminium in Kabelnetzen akut werden wird. Bei Hochspannungskabeln, die in der Regel nur am Anfang und am Ende eine Muffe bekommen, wird die Verwendung von Aluminium keine besondern Schwierigkeiten bereiten; anders liegen die Verhältnisse aber wegen den vielen Abzweigungen bei den Niederspannungskabeln.

Es dürfte von allgemeinem Interesse sein zu erfahren, ob vielleicht das Starkstrominspektorat in dieser Richtung schon Versuche gemacht und abgeklärt hat, ob man bei Abzweigungen von Aluminium auf Aluminium oder von Aluminium auf Kupfer allgemein mit einem einfachen Lötver-

fahren auskommen kann, oder ob es zweckmässiger ist, solche Verbindungen nach dem im Ausland schon häufig angewandten Schweissverfahren herzustellen.

Herr B. Rey, Elektra Birseck, Münchenstein: Mit Aluminium-Lötverbindungen haben wir bereits Versuche gemacht bei Kabelmuffen und andern. Ich glaube, es ist den Herren allen bereits bekannt, dass die Kabelwerke ein Lötmetall herausgebracht haben, ähnlich wie Zinn, und ein pulverförmiges hygroskopisches Salzgemisch als Bindemittel, welches aus der Flammenfärbung zu schliessen wahrscheinlich eine Kalium-Metallsalz-Verbindung ist. Es lässt sich damit sehr gut lüten. Man muss die Lötstelle vorher sorgfältig reinigen, mit Asbest abbinden, auf schätzungsweise 350° erwärmen und dann ganz leicht lüten. Wir haben, wie gesagt, bereits einige Versuche mit Aluminium-Kupfer-Verbindungen gemacht; die Lötstellen sind sehr gut gelungen, nur müssen nachher die Verbindungsstellen verstrichen und vollständig verschlossen werden. Das scheint mir nun eine etwas kritische Sache zu sein. Die Kabelfabriken verlangen, dass die Enden mit einem Lack oder etwas ähnlichem vollständig überdeckt werden. Gefühlsmässig fragt man sich, warum man das machen muss. Es scheinen also Verbindungen zu sein, die sich an der Luft nicht vollständig halten. Das in wässriger Lösung sonst neutrale Bindemittel erzeugt aber beim Erhitzen stark saure Dämpfe. Dieses Lötmetall läuft nun leicht in die verseilten Kabeladern hinein, möglicherweise bis tief in die Isolation. Ob hier mit der Zeit eventuell Schäden an Metall oder an der Isolation zu beobachten sind, kann ich nicht beurteilen. Ueber den ganzen Lötvorgang ist von den Kabelfabriken eine ausführliche Anleitung erhältlich⁴⁾.

Der Vorsitzende: Je remercie M. Rey et puis dire que dans les câbleries on soude couramment les fils d'aluminium entre eux. Les fils étant chauffés pour effectuer la soudure, ils subissent un recuit qui diminue leur résistance mécanique

⁴⁾ Vgl. Bulletin SEV 1941, Nr. 24, S. 664—667.

dans le voisinage immédiat de la soudure. C'est pourquoi il ne faut pas admettre plus d'une soudure dans la même section d'un câble pour ligne aérienne; il faut si possible employer des fils assez longs pour faire la longueur complète d'un câble; si des soudures sont inévitables, il faut les espacer le plus possible le long du câble.

Les fabriques de machines qui font des bobinages en aluminium soudent aussi couramment ce métal.

Herr R. Iselin, EW Basel: Herr Kleiner hat von der Korbbildung gesprochen, eine Erscheinung, die zum Glück sehr selten und nur bei Höchstspannweiten auftritt. Nach unseren Erfahrungen auf der 40 km langen Freileitung (150 kV) Bickigen-Basel kann Korbbildung auftreten bei ganz grossen Ueberlastungen der Stahl-Aluminium-Seile durch Rauhreif und Schnee. Bei solchen Ueberbeanspruchungen machen beide Leitermaterialien die gleiche Längenänderung mit. Weil sich die Stahlseele nach der Entlastung, infolge ihrer Elastizität, annähernd wieder auf die ursprüngliche Länge einstellt — was bei dem Aluminiumleiter nicht der Fall ist —, finden örtliche Aufstauhungen im Drall der Aluminiumdrähte, die sogenannte Korbbildung, statt.

Der Vorsitzende: Je puis ajouter ce que beaucoup d'entre vous savent aussi, qu'on soude actuellement des fils d'aluminium simplement en présentant bout à bout leurs extrémités chauffées jusqu'à la fusion. Il n'est fait emploi d'aucune poudre à souder ou autre produit. Pour effectuer l'opération il faut évidemment être outillé convenablement et acquérir l'habileté nécessaire; c'est un travail délicat qu'on ne réussit pas du premier coup.

Personne ne demandant plus la parole je voudrais vous dire, avant de clore cette discussion, que chacun de vous est libre de faire à la séance de cet après-midi toutes les communications qu'il lui plaira et en particulier de répéter celles qui viennent d'être faites.

Je lève notre assemblée en remerciant sincèrement tous ceux qui ont alimenté la discussion et aussi ceux qui lui ont prêté leur attention.

Der Ausgleichsvorgang beim Ansprechen von Ueberspannungsableitern und seine Berechnung unter Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit der Widerstände

Von H. Meyer, Baden

621.316.933

Beim Ansprechen von Ableitern, die betriebsmässig an eine Wechselspannung (Netz) geschaltet sind, entstehen, wie K. Berger erstmals gezeigt hat, Ausgleichsvorgänge, die die Ableiter mehr beanspruchen, als bisher angenommen wurde. In diesem Aufsatz sollen die Betrachtungen Bergers ergänzt werden, einerseits durch Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit der Ableiterwiderstände, andererseits durch die an Hand eines durchgerechneten Beispiels ermöglichte Beurteilung der verschiedenen massgebenden Grössen.

K. Berger a montré pour la première fois que les parafoudres reliés normalement à un réseau à courant alternatif sont, lorsqu'ils fonctionnent, le siège de processus d'équilibre qui sollicitent beaucoup plus fortement le parafoudre qu'on ne le pensait. L'auteur de cet article complète les considérations de K. Berger, d'une part en tenant compte de la relation qui existe entre la tension et la résistance du parafoudre et, d'autre part, en interprétant, à l'aide d'un exemple numérique, les différentes grandeurs qui entrent en jeu.

I. Einleitung

Beim Ansprechen von Ableitern, die betriebsmässig an eine Wechselspannung (Netz) geschaltet sind, haben diese nicht nur den kurzzeitigen Stossstrom abzuleiten und hierauf den durch die Netzspannung erzeugten und durch die Widerstandscharakteristik auf einen kleinen Wert begrenzten stationären betriebsfrequenten Strom bis zur Löschung auszuhalten, sondern sie werden noch durch Ausgleichsvorgänge beansprucht, worauf K. Berger¹⁾ erstmalig hingewiesen hat. Zweck dieser Ausführungen soll sein, in Anbetracht der Wichtigkeit des Problems die Betrachtungen Bergers in dem Sinne zu ergänzen, dass einerseits die Ausgleichs-

vorgänge berechnet werden bei Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit der Ableiterwiderstände, und dass andererseits an Hand von Beispielen eine Beurteilung der Bedeutung der verschiedenen mitspielenden Grössen ermöglicht wird.

2. Allgemeines über den Ausgleichsvorgang

Der Ausgleichsvorgang kommt dadurch zustande, dass während der Ableitung des Stoßstromes, wobei am Ableiter die Restspannung besteht, auch ein Strom in die Induktivität der speisenden Anlage (Transformator) fliesst; dieser Induktivitätsstrom und die damit verbundene magnetische Energie kann nach beendigter Ableitung des Stoßstromes nicht plötzlich verschwinden, sondern verursacht

¹⁾ Bull. SEV 1941, Nr. 12, S. 257.