

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 7 (1916)  
**Heft:** 5  
  
**Artikel:** Die Verwendung von Aluminium für Freileitungen  
**Autor:** Wyssling  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1059563>

### **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:** 16.05.2025

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

Lampe und als max. Belastung nur etwa 40 % des Anschlusswertes. Die Kohlenfadenlampen sind überdies in Bezug auf die Lichtintensität sehr empfindlich bei Spannungsschwankungen, währenddem die Metaldrahtlampen diesen Nachteil in erheblich vermindertem Masse aufweisen. Man konnte denn auch früher in Lichtnetzen höchstens za. 2 bis 3 % Spannungsabfall zulassen, währenddem bei Metaldrahtlampen ein Verlust von 4 % noch keine, dem Auge bemerkbare Beeinträchtigung der Lichtintensität hervorruft.<sup>1)</sup>

Aus diesen Darlegungen geht hervor, dass viele der in den Jahren 1907—1911 gebauten Ortsnetze für die heutigen Verhältnisse unter Umständen doppelt so starke Drahtquerschnitte aufweisen, als für den vorhandenen Anschluss notwendig wäre. Selbstverständlich ist die Ersparnis beim Auswechseln der Drähte bei kleineren Querschnitten nur gering und wohl nur rationell durchführbar bei Drahtdurchmessern von etwa 5 mm an aufwärts und in Leitungssträngen mit wenig Abzweigungen. Immerhin wird es sich lohnen, in Ortsnetzen, wo keine wesentliche Anschlussvermehrung zu erwarten ist, eine Nachrechnung der Leitungsquerschnitte auf Grund der wirklichen Anschlusswerte durchzuführen und zu prüfen, ob sich eine Reduktion des Querschnittes wegen der relativ hohen Auswechslungskosten lohnt oder nicht.

Durch die verschiedenen angegebenen Mittel lassen sich sicher in der ganzen Schweiz herum ganz bedeutende Quantitäten Kupfer gewinnen, die für Erweiterungen und Neuanschlüsse gute Dienste leisten werden.

\* \* \*

## Die Verwendung von Aluminium für Freileitungen.

Von Generalsekretär *Prof. Dr. Wyssling.*

Gegenüber unserm altgewohnten Freileitungsmaterial Kupfer kann bei entsprechenden Preisverhältnissen das Aluminium die wirtschaftliche Ueberlegenheit erreichen. Das ist allbekannt. Das Vertrauen in das technische Genügen dieses Metalls für Freileitungen ist dagegen bei uns, im Gegensatz zu Nordamerika und einigen anderen Ländern, noch keineswegs allgemein. Der Grund dafür liegt zum Teil vielleicht in einigen ungünstigen Ergebnissen anfänglicher, unsachgemäss ausgeführter Anlagen, in viel grösserem Masse aber wohl in der Gewohnheit in der Verwendung von Kupfer und in der Scheu, die Verantwortlichkeit für die Anwendung eines neuen Mittels zu übernehmen, dessen Verhältnisse und Eigenschaften im allgemeinen zu wenig bekannt und geläufig sind.

Die weitgehende und rasche Einführung des Aluminiums als Freileitungsmaterial in Nordamerika mag freilich auch dadurch gefördert worden sein, dass (abgesehen von den dem Al günstigen Preisverhältnissen zur Zeit der ersten grösseren Anlagen) dort die Produzenten des weissen Metalls sich der Sache sehr intensiv angenommen zu haben scheinen, Montageregeln aufstellten, Garantien übernahmen und sich selbst der Montage annahmen, wie dies später auch in Frankreich der Fall gewesen zu sein scheint.

Der Zweck der nachstehenden Abhandlung soll sein, dem Praktiker, besonders den Leitungsbaubeamten unserer Elektrizitätswerke, die besonderen Verhältnisse der Verwendung von Aluminium für Freileitungen zusammenfassend darzulegen und die einfachen Regeln zu geben, die dabei zu befolgen sind.

Wir benützen dazu ausser unsern eigenen Berechnungen und Erfahrungen und den wertvollen Mitteilungen einiger Fachkollegen u. a. auch die am Schluss in einem besonderen Literaturverzeichnis vermerkten Publikationen.

### Uebersicht der Eigenschaften des Aluminiums.

Eine solche Uebersicht mag zunächst vorausgeschickt werden. Dabei wird es am zweckmässigsten sein, auch gleich das Kupfer als dasjenige Material, dessen Eigenschaften

<sup>1)</sup> *Anmerkung des Generalsekretärs.* Die Niederspannungs-Verteilungen für Lichtnetze demnach von vorneherein auf 4 % Spannungsabfall zu berechnen, möchten wir immerhin doch nicht allgemein empfehlen.

jedem Praktiker geläufig sind, jeweilen zum Vergleich heranzuziehen. (Man gestatte uns in der Folge die abkürzenden Bezeichnungen „Al“ und „Cu“.)

Gehen wir zuerst auf einige allgemeine Eigenschaften ein, die in der Beurteilung des weissen Metalls oft erwähnt werden.

Man hört heute noch etwa die Ansicht, Al sei nicht *wetterbeständig*, es werde von den Atmosphärrillen angegriffen. Das ist keineswegs der Fall. Sowohl die Chemie, wie ausgeführte Versuche beweisen gegenteils, dass die unter gewöhnlichen Fällen in Betracht kommenden Einflüsse dieser Art auf das Al weniger einwirken als auf das Kupfer und langjährige Erfahrungen an vielen, namentlich in Nordamerika bestehenden Al-Freileitungen geben absolut keine Anhaltspunkte dafür, dass Al stärker angegriffen würde als Cu. (In der Salzlufte des Meeres z. B. hält sich Al gegenteils viel besser als Cu.)<sup>1)</sup> Eine widerstandsfähige Haut aus Oxyd überzieht das blanke Al an der Luft sehr rasch. Selbst unter Lokomotivrauch scheint sich Al ebensogut zu halten wie Cu.<sup>2)</sup> Da wo gewisse Dämpfe wie z. B. Chlordämpfe, Dämpfe von Salz- oder Schwefelsäure in der Nähe chemischer Fabriken oder Abgase von Hüttenbetrieben und dgl. vorkommen, darf allerdings Al nicht verwendet werden. Im allgemeinen aber steht hierzulande der Verwendung von Al für Freileitungen aus diesem Grunde nichts entgegen.

Dass es für Al *kein* einfaches und gutes *Lötverfahren* gibt und es auch mit Cu nicht zusammengelötet werden kann, wird ebenfalls vielfach als ein grosses Hindernis angesehen. Diese Eigenschaft verlangt aber lediglich andere Verbindungsarten. Solche mit mechanisch durchaus genügender Festigkeit bestehen und sind gut ausgebildet. (Dabei ist noch zu bedenken, dass das Löten auch bei Cu-Freileitungen da wo es auf grosse Festigkeit ankommt schädlich und daher bekanntlich an gewissen Stellen durch die Bundesvorschriften direkt verboten ist.) Die durch das Löten am besten erzielte gute elektrische Verbindung ist auch bei Al-Verbindungsarten erfahrungsgemäss genügend erreichbar.

Bei Verbindungsstellen *mit anderen Metallen*, namentlich den meist in Betracht kommenden mit Cu wird durch auftretende galvanische Wirkung *bei Zutritt von Feuchtigkeit* auf elektrolytischem Wege eine langsame Corrosion des Al herbeigeführt, doch kann dies bei entsprechender Konstruktion der Verbindungen durch Abhaltung der Feuchtigkeit mit Sicherheit verhindert werden.

Die grosse *Weichheit* des Al begünstigt das Vorkommen von mechanischen Verletzungen, und diese Eigenschaft erfordert allerdings eine grosse Sorgfalt beim Verlegen der Leitungen, die aber sachkundigem Personal nicht schwer fällt. Auch bei der Befestigung der Leiter müssen einige einfache besondere Regeln befolgt werden, um die Abnützung durch Reibung zu verhüten.

Die Erfahrungen haben bisher gezeigt, dass, allerdings sehr ausnahmsweise, gelegentlich vereinzelte *Stellen verminderter Bruchfestigkeit* in sonst tadellos homogenen Drähten vorkommen, welche die Fabrikation bisher noch nicht mit absoluter Sicherheit vermeiden zu können schien. Derartige Stellen lassen sich aber schon bei der Montage feststellen und ausmerzen, und ihre allfällige Wirkung lässt sich dadurch verhüten, dass an Stelle *massiver Drähte, Seile* aus dünnen Drähten verwendet werden, die ausserdem grössere spezifische Festigkeit besitzen. Drahtbrüche bei montierten Leitungen scheinen bei den amerikanischen Aluminiumleitungen von enormem Umfang nicht mehr als bei Cu-Leitungen vorzukommen.

Gelegentlich vernimmt man gegen die Verwendung von Al das Bedenken, es besitze keinen oder nur einen unsicheren Wert als *Altmaterial*, es bestehe dafür kein Markt. Dem ist erstens entgegenzuhalten, dass man doch Freileitungen nicht mit Rücksicht auf ihre eventuelle Verwendbarkeit als Altmaterial erstellt und ihr eigentlicher Wert nicht hierin liegt. Bei Aufstellung von Maschinen fällt es niemandem ein, deren Wahl nach ihrem Altmetallwert zu richten. An sich ist aber auch Al als Altmetall technisch verwertbar, ist auch heute schon verkäuflich und sein Altmetallmarkt wird sich wie bisher schon stetig heben, je mehr eben Al zur Verwendung kommen wird.

<sup>1)</sup> Anlagen der Société Electro-Métallurgique Française.

<sup>2)</sup> Zeugnis der Ontario-Anlage, Canada.

Gehen wir zur Betrachtung der *wichtigsten physikalischen Eigenschaften* über.

Die am meisten in die Augen springende ist die des geringen *spezifischen Gewichtes* von  $2,70 \div 2,85$ , also von etwa einem Drittel des Cu (8,9). Sie ist in verschiedenen Beziehungen ein sehr grosser Vorteil. Abgesehen von der Verbilligung des Preises pro Volumen-Einheit bewirkt sie namentlich auch eine Erleichterung des Transports bei der Montierung.

Man darf indessen selbstverständlich nicht mit den absoluten Werten der physikalischen Konstanten des Al gegenüber denen des Cu rechnen, sondern muss zum Vergleiche *dem Kupfer äquivalente Leitungen* heranziehen. Da die Freileitungen zumeist nach elektrischen Rücksichten (Spannungsverlust oder Energieverlust) gerechnet werden müssen, so sind die Vergleiche zunächst zwischen *Leitern gleichen Widerstands* vorzunehmen, für gewisse Verhältnisse sodann auch zwischen Leitern gleicher Festigkeit.

Der *spezifische elektrische Widerstand* liegt etwa in der Höhe  $0,024 \div 0,03$  Ohm pro m und  $\text{mm}^2$  gegenüber  $0,017 \div 0,018$  bei Cu, ist also rund 1,5 bis 1,7 mal so gross wie beim letztern. Für eine Fernleitung gleichen Widerstands ist demnach ein rund *1,5 bis 1,7 mal grösserer Querschnitt als für Cu* anzunehmen, der aber nur *rund halbsoviel wiegt* wie der letztere. In letzterer Zahl liegt namentlich das Mass für den *Preis, den man wirtschaftlich für das Al noch bezahlen kann*, und der also per Kilogramm rund das Doppelte dessen betragen darf, was man für Cu-Drähte zahlen muss.

In dem ungefähr halben Gewicht liegt ausser dem Mass der Transporterleichterung allerdings auch noch ein kleiner Nachteil, der durch den grösseren Querschnitt noch etwas erhöht wird und darin besteht, dass seitlicher Winddruck die Drähte weiter aus der Vertikalen abtreibt. Um dieselbe Sicherheit gegen Zusammenschlagen der Drähte zu haben, wird dies unter Umständen zur Wahl einer etwas grösseren Entfernung der Isolatoren am Gestänge Anlass geben.

Die *Festigkeitsverhältnisse* sind vor allem dadurch charakterisiert, dass die *Zerreissfestigkeit* bei Aluminium zwischen  $15$  und  $20 \text{ kg/mm}^2$  beträgt gegen  $30 \div 40$  bei halbharten Cu-Drähten, also etwa halb so gross ist wie bei letztern. Es wäre aber selbstverständlich ein Irrtum, daraus zu schliessen, dass die Solidität der Aluminiumleitungen nur halb so gross sei. Da die Leichtigkeit des Metalls bewirkt, dass der Aluminiumdraht gleichen Querschnitts nur etwa ein Drittel des Gewichts des Cu-Drahtes hat, so ist die Sicherheit gegen Bruch durch reine Eigenlast an sich  $0,5 \times 3 = 1,5$  mal so gross wie bei Cu. Es wird dies am besten dadurch illustriert, dass die sog. „Reisslänge“, d. h. die Länge eines Drahtes welcher, vertikal frei hängend, gerade noch sich selbst zu tragen vermag, nach Möllendorf beim Al ca. 6,7 km, beim Hartkupfer dagegen nur 5,1 km beträgt und beim mittleren Halbhartkupfer wie wir es gewöhnlich für Leitungen verwenden, ca. 4,5 km betragen wird (bei Stahl ca. 10,3 km). Da ferner der elektrisch äquivalente Querschnitt bei Al ungefähr 1,5 mal so gross ist wie bei Kupfer, so ist die absolute Zerreissfestigkeit des ersteren also immerhin ungefähr  $\frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{3}{4}$  so gross wie beim Cu. Da, wo eine absolute minimale Bruchfestigkeit vorgeschrieben ist, (wie z. B. an Stelle der Minimal-Durchmesser von 3 bzw. 4 mm des Cu für Nieder- bzw. Hochspannungsleitungen), muss man allerdings den Al-Querschnitt ungefähr doppelt so stark nehmen als den Cu-Querschnitt; sein Gewicht ist dann ungefähr  $\frac{2}{3}$  jener minimalen Cu-Drähte.

Die genauen Verhältnisse der *Sicherheit gegenüber Bruch* sind jedoch nur zu überblicken, wenn der *Verlauf der Drahtspannung bei den vorkommenden Durchhängen* untersucht wird, und auf diesen wirkt der Wert des Elastizitätsmoduls und das Verhalten des Al gegenüber der Wärme, das wir weiterhin besprechen, sehr wesentlich ein.

Anders als bei Cu-Draht sind auch die Verhältnisse bezügl. der *Tragfähigkeit bei einer Zufallslast*, also bei Schnee- und Eisbildung an den Drähten. Nimmt man mit den bisher aufgestellten (nach unserer Ansicht und unseren Erfahrungen zwar nicht zutreffenden) Formeln zur Berücksichtigung der Zufallslast an, dass diese linear mit dem Durchmesser des Drahtes wachse, so nähme der elektrisch äquivalente Al-Draht mehr Zufallslast auf, weil er dicker ist. Ausserdem hat er geringere absolute Festigkeit. Er ist aber trotzdem keineswegs unbedingt dementsprechend unsicherer, (auch abgesehen von dem mehrfach nach Erfahrungen behaupteten Umstand, dass an Al Schnee und Eis weniger haften soll



als an Cu). Denn es braucht lediglich der relativ grösseren Zufallslast entsprechend der *Durchhang* anders als beim Cu gewählt zu werden, so kann die Sicherheit ebenso gross sein als beim Cu. Hier zeigt sich, dass beim Spannen der Al-Leitung nach der bei uns bestehenden Vorschrift (5fache Sicherheit gegen Bruch durch Eigenlast allein bei tiefster Temperatur), auch bei Schnee- und Eisansatz genügende Sicherheit gegen Bruch ähnlich wie beim Cu erzielt wird.

Der Unterschied in den Festigkeitsverhältnissen zeigt sich namentlich auch im *Elastizitätsmodul*, der für Al zu  $5400 \div 7300$ , für hartes Cu zu 13 000 angegeben wird, und sodann aber in der *Dehnung* und *Streckung*: die Elastizitätsgrenze liegt für Al bei etwa 80 % der Zerreissbelastung, während sie beim Cu etwa 67 — 75 % der letzteren beträgt. Die Dehnung innerhalb der Elastizitätsgrenze ist bei beiden Metallen ziemlich gleich (1,4 — 1,6 %) darüber hinaus aber bis zur Bruchgrenze bei Al mit 2 bis 4 % eher grösser als bei Cu ( $2 \div 3$  %). Hierin liegt wieder eine gewisse Sicherheit für das Al: Wird dasselbe ausnahmsweise über die Elastizitätsgrenze hinaus beansprucht, so streckt es sich mehr als Cu, vergrössert dadurch den Durchhang und vermindert damit die Seilspannung, sodass eine weitere Beanspruchung und der Bruch unter Umständen vermieden werden.

Von grösster Wichtigkeit für das Verhalten in Freileitungen ist der *Wärmeausdehnungscoefficient*, der bei Al wesentlich grösser ist als bei Cu. Die Verlängerung des Al beträgt pro  $1^{\circ}$  C ungefähr 0,000023 gegenüber nur 0,000018 bei Cu. Dieser Unterschied genügt, um weit *grössere Unterschiede des Durchhangs bei Temperaturänderungen* zu erzielen als sie bei Cu auftreten. Infolgedessen ist auch bei Al eine *viel genauere Einhaltung des Durchhangs beim Montieren* nach der herrschenden Temperatur nötig, damit nicht bei niedrigen Temperaturen Reißen eintritt. Gerade in diesem Punkte scheint bei Al-Leitungen gelegentlich gefehlt worden zu sein.

Bezüglich des Verhaltens gegenüber der Wärme wären noch zu nennen: Die *Widerstandsänderung*, die beinahe gleich ist wie beim Cu, nämlich pro Grad 0,0039 gegenüber 0,004, sowie die *Wärmeleitungsfähigkeit*, die mit 0,34 für Al ganz wesentlich kleiner ist als bei Cu (0,81). Diese beiden Grössen haben jedoch auf das Verhalten in Freileitungen keinen nennenswerten Einfluss. Auch der Umstand, dass wegen der viel grösseren *spezifischen Wärme* (0,222 bei Al gegenüber 0,093) das Cu bei Wärmezufuhr sich rascher erhitzt als das Al, hat bei den praktisch vorkommenden Dimensionen und Zeitverhältnissen der Abkühlung von Freileitungen wohl keine Bedeutung. Eher kommt eine solche dem niedrigeren *Schmelzpunkt* von  $625^{\circ}$  beim Al gegenüber  $1100^{\circ}$  beim Cu zu. Aus diesem könnte man schliessen, dass Al-Leitungen bei Kurzschluss durch Zusammenschlagen der Leitungen, vielleicht auch bei Kurzschluss durch Vögel unter Umständen rascher durchschmelzen werden als Cu-Leitungen. Dies mag abermals als Fingerzeig dafür dienen, die Entfernungen der Drähte auf den Freileitungen eher etwas höher zu halten als bei Cu.

Bei dieser Gelegenheit mag der Vollständigkeit halber noch erwähnt sein, dass durch die Erhöhung dieser Entfernung keine entsprechende Vergrösserung der *Selbstinduktion* der Freileitungen herbeigeführt wird, da im Vergleich zur widerstandsgleichen Cu-Leitung grössere Durchmesser des Leitungsdrahtes in Anwendung kommen.

Unter Umständen kann die etwas vergrösserte Drahtdistanz eine unbedeutende Erhöhung der Masten veranlassen, wogegen wieder Vergleichsrechnungen zeigen, dass das Biegemoment, mit dem die *Gestänge beansprucht* werden, beim Al im allgemeinen nicht viel grösser, sondern meist eher kleiner als bei Cu wird. Ueberhaupt ergibt sich aus Vergleichen mit Berücksichtigung aller Umstände, dass das Gestänge der Al-Leitungen im allgemeinen nicht stärker beansprucht wird und auch nicht teurer wird.

### **Die Bedingung der Wirtschaftlichkeit des Aluminiums für Leitungen.**

Wie bereits angeführt, hängt es natürlich vom Verhältnis der Preise beider Metalle pro kg ab, ob das Al gegenüber dem Cu mit Wirtschaftlichkeit angewendet werden kann. Bezeichnet man mit  $k_a$  den Preis eines Kilogramms Leitungs-Aluminium und mit  $k_c$  den analogen Preis beim Cu, so ergibt sich für das Verhältnis der Gesamtkosten des Metalls für elektrisch äquivalente Leitungen der Ausdruck

$$\frac{\text{Al-Kosten}}{\text{Cu-Kosten}} = \frac{k_a}{k_c} \times \frac{2.84 \times 1.66}{8.91} = 0,53 \frac{k_a}{k_c}$$

Da das Verhältnis der Einheitspreise  $k_a : k_c$  zumal zur heutigen Zeit sich fortwährend ändert, so muss in jedem einzelnen Fall auf Grund der Tagespreise entschieden werden, ob die Verwendung von Al wirtschaftlichen Vorteil bietet. *Solange der Al-Preis kleiner als  $1 : 0,53 = 1,89$  mal dem Cu-Preis ist, wird die Metallbeschaffung in Al billiger sein.* Dazu ist freilich gegebenenfalls noch zu berücksichtigen, dass die Montagekosten für das Al vielleicht etwas teurer sind als diejenigen für das Cu, und wäre es auch nur weil sehr zuverlässiges, geübtes und daher vielleicht etwas teureres Personal dafür unbedingt notwendig ist.

Nachstehende Tabelle gibt an, wie für die verschiedenen Verhältnisse der Metallpreise die Kosten der Al-Beschaffung sich prozentual zu derjenigen des widerstandsgleichen Cu verhalten.

Tabelle 1.

#### Wirtschaftlichkeit des Preisverhältnisses von Al und Cu.

| Bei einem<br>Preisverhältnis<br>Al : Cu | sind die Kosten des Leitungsmaterials<br>der widerstandsgleichen Aluminium-<br>Leitung |                |                                                                               |  |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------------------------------------------------------------------|--|
| 0,4                                     | 78,8                                                                                   | } % billiger   | } als die Kosten des Leitungsmaterials der<br>widerstandsgleichen Cu-Leitung. |  |
| 0,6                                     | 62,2                                                                                   |                |                                                                               |  |
| 0,8                                     | 57,5                                                                                   |                |                                                                               |  |
| 1,0                                     | 47,0                                                                                   |                |                                                                               |  |
| 1,2                                     | 36,4                                                                                   |                |                                                                               |  |
| 1,4                                     | 25,6                                                                                   |                |                                                                               |  |
| 1,6                                     | 15,0                                                                                   | } gleich teuer |                                                                               |  |
| 1,8                                     | 4,5                                                                                    |                |                                                                               |  |
| 1,89                                    |                                                                                        |                |                                                                               |  |
| 2,0                                     | 6,0                                                                                    | } % teurer     |                                                                               |  |
| 2,2                                     | 16,5                                                                                   |                |                                                                               |  |
| 2,4                                     | 27,0                                                                                   |                |                                                                               |  |

Der erwähnte Unterschied in den Montagekosten und der allfällige Unterschied in den Kosten der Masten wird da am wenigsten Einfluss haben, wo noch verhältnismässig grosse Querschnitte mit einfacher Montage zusammenfallen. Dies dürfte bei unsern Verhältnissen am ehesten bei den Leitungen mittlerer Hochspannung der Fall sein, also den üblichen Zwischenspannungsnetzen von  $5 \div 10\,000$  Volt. Grösser dürfte der Einfluss der Montagekosten bei stark verzweigten Leitungen sein; auch bei den Leitungen sehr hoher Spannung werden die im Verhältnis zu den Leitungsmaterialkosten höheren Beträge für Isolatoren und Masten das Ganze etwas mehr beeinflussen.

#### Die physikalischen Konstanten des Aluminiums.

Diese seien im Nachstehenden nun genauer aufgeführt. Die erhältlichen Angaben darüber schwanken etwas. Insbesondere sind Unterschiede vorhanden bei grösserer oder geringerer Reinheit des Fabrikats. Da diese stark auf den elektrischen Widerstand einwirkt, ist auf möglichste Reinheit des verwendeten Al zu halten. Um sicher zu gehen, wird man jedoch praktisch besser mit nicht mehr als 98 % Reinheit des Handels-Aluminiums rechnen. Die Daten der Festigkeit variieren wie bei jedem Metall ziemlich erheblich von den dünneren zu den dickeren Drähten. Für die, bei Al die Regel bildende Verwendung verseilter Leiter auch für geringere Querschnitte, könnte mit der grösseren Festigkeit der dünneren Drähte gerechnet werden. Da aber andererseits mit der genau gleichmässigen Beanspruchung aller Einzeldrähte des Seils auch bei sorgfältiger Montage nicht mit absoluter Sicherheit gerechnet werden kann, so wird man auch hier vorläufig besser die ungünstigeren Zahlen verwenden. Wir haben diejenigen Werte, die man aus diesen Gründen heute bei den Berechnungen für die praktische Anwendung als unbedingte Sicherheit bietend empfehlen möchte und die wir auch unsern Berechnungen zugrunde gelegt haben, in der nachstehenden Tabelle durch *Fettdruck* hervorgehoben.

Tabelle 2.

**Vergleichung der wichtigsten physikalischen Konstanten von Kupfer  
und Aluminium für Freileitungszwecke.\*)**

| Eigenschaft                                                                                                  | Kupfer<br>halbhart        | Aluminium           |              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------|--------------|
|                                                                                                              |                           | massive<br>Leiter   | Seile        |
| <i>Spezifisches Gewicht:</i>                                                                                 |                           |                     |              |
| Annahme f. Leitungsdrähte n. d. Normen des S. E. V. . . . .                                                  | <b>8,91</b>               |                     |              |
| International vereinbart (C. E. I.) für reines Normalkupfer . .                                              | 8,89                      |                     |              |
| Für Handels-Leitungsmaterial (98 ÷ 99% Reinheit) nach<br>Angabe der Al. Ind. Ges. . . . .                    |                           | 2,7                 | <b>2,84</b>  |
| <i>Spezifischer Widerstand:</i>                                                                              |                           |                     |              |
| Höchstzulässiger Wert für Leitungsdrähte nach den Normen<br>des S. E. V. . . . .                             | Bei 15°:<br><b>0,0175</b> |                     |              |
| International vereinbart (C. E. I.) für reines Normalkupfer:<br>Bei + 20°: $\frac{1}{58}$ . Ergibt . . . . . | 0,0169                    |                     |              |
| Für Handels-Leitungsmaterial (98 ÷ 99% Reinheit) nach An-<br>gabe der Al. Ind. Ges. . . . .                  |                           | Bei 15°<br>0,0286 ÷ | <b>0,029</b> |
| Für 99,6% reines Material nach Angabe der Al. Ind. Ges.                                                      |                           | Bei 0°<br>0,0245    |              |
| Für gebräuchliche Handelsware . . . . .                                                                      |                           | 0,0275              |              |
| <i>Bruchfestigkeit in kg/mm<sup>2</sup> gegen Zerreißen:</i>                                                 |                           |                     |              |
| Minimalwert nach Bundesvorschriften über Starkstroman-<br>lagen für Drähte von Dm. . . . . mm 3              | <b>32</b>                 |                     |              |
| 4                                                                                                            | <b>30,5</b>               |                     |              |
| 5                                                                                                            | <b>29</b>                 |                     |              |
| 6                                                                                                            | <b>28</b>                 |                     |              |
| 7                                                                                                            | <b>27,5</b>               |                     |              |
| 8 u. mehr                                                                                                    | <b>27</b>                 |                     |              |
| Nach Versuchen laut Angaben der Al. Ind. Ges. für Drähte<br>von Dm. . . . . mm 1,0                           |                           | 26,0                |              |
| 1,5 ÷ 2,0                                                                                                    |                           | 23,0                |              |
| 2,5                                                                                                          |                           | 22,0                |              |
| 3 ÷ 3,5                                                                                                      |                           | 20,0                |              |
| 4 ÷ 4,5                                                                                                      |                           | 19,0                |              |
| Nach Hobart ebenso . . . . .                                                                                 |                           | 19,0                |              |
| Für Handelsware i. allg. n. Angabe der Al. Ind. Ges. f. Seile                                                |                           |                     | <b>18,0</b>  |
| " " f. Drähte von 2 ÷ 3 mm Dm. nach Angabe<br>der Al. Ind. Ges. . . . .                                      |                           | 19 ÷ 23             |              |
| <i>Elastizitätsmodul in kg/mm<sup>2</sup></i>                                                                |                           |                     |              |
| Nach Angabe der Al. Ind. Ges. für hartgezogenen Draht . .                                                    |                           | 6650 ÷<br>6750      |              |
| Ebenso nach Möllendorff . . . . .                                                                            |                           | 6500                |              |
| Für richtig geglühte Drähte und Seile nach Ang. d. Al. Ind. Ges.                                             |                           |                     | <b>5400</b>  |
| Für Draht . . . . .                                                                                          | <b>13000</b>              |                     |              |
| <i>Dehnung bis zum Zerreißen, %</i>                                                                          |                           |                     |              |
| Nach Versuchen für die Al. Ind. Ges. f. Draht v. Dm. mm 1 ÷ 1,5                                              |                           | 2                   |              |
| 2 ÷ 3                                                                                                        |                           | 3                   |              |
| 3,5 ÷ 4                                                                                                      |                           | 3,2                 |              |
| 4,5                                                                                                          |                           | 3,7                 |              |
| Nach Al. Ind. Ges. im Mittel für Handelsware . . . . .                                                       |                           | 2 ÷ 3               |              |
| <i>Wärmeausdehnungskoeffizient für 100° C</i>                                                                |                           |                     |              |
| Nach verschiedenen Handbüchern . . . . .                                                                     | 0,00168                   |                     |              |
|                                                                                                              | 0,00187                   |                     |              |
| Nach Angaben der Al. Ind. Ges. . . . .                                                                       |                           | <b>0,002336</b>     |              |
| <i>Wärmeleitfähigkeit</i>                                                                                    |                           |                     |              |
| Nach Handbüchern bzw. Angaben d. Al.-Lieferanten bei 0°                                                      | 0,819                     | 0,343               |              |
| " " " " " " bei 100°                                                                                         |                           | 0,362               |              |
| <i>Spezifische Wärme</i>                                                                                     |                           |                     |              |
| Nach Handbüchern bzw. Angaben d. Al.-Lieferanten bei 0°                                                      | 0,093                     | 0,222               |              |
| " " " " " " bei 100°                                                                                         |                           | 0,232               |              |
| " " " " " " bei 625°                                                                                         |                           | 0,284               |              |
| <i>Schmelztemperatur</i>                                                                                     |                           |                     |              |
| Nach Handbüchern bzw. Angaben d. Al.-Lieferanten ° C                                                         | 1100                      | 625                 |              |

\*) Diejenigen Werte, die wir unsern Berechnungen zu Grunde gelegt haben, sind in dieser Tabelle fett gedruckt.

### Die dem Cu äquivalenten Al-Querschnitte.

Der Praktiker muss sich an marktgängige Querschnitte halten. Allgemeine, passende Normalquerschnitte, die von den Fabriken überall hergestellt werden, sind für Al noch nicht eingeführt. Wir greifen im Nachstehenden auf Querschnitte und Seilzusammensetzungen, die bisher von namhaften Fabriken z. T. wiederholt ausgeführt, z. T. auch als Normalien festgestellt wurden, und die einigermassen elektrisch äquivalent zu normalen Cu-Querschnitten sind.

In den meisten Fällen wird es sich darum handeln, an Stelle eines Cu-Leiters das *elektrisch äquivalente Al-Seil*, d. h. ein solches gleichen Widerstands, zu verwenden und dieses zu bestimmen. Aus der nachstehenden Tabelle können diese Querschnitte und deren Gewichte entnommen werden.

Tabelle 3.

#### Gebräuchlichen Kupferquerschnitten widerstandsgleiche Aluminiumleiter.

(Kleinere Querschnitte siehe Tabelle 4.)

| Widerstand<br>pro km<br>bei 15° C<br>$\Omega$ | Zu ersetzender Kupferleiter                                                               |                                           |                         | Ersatz-Aluminiumleiter         |                                                               |                         |
|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------|
|                                               | Querschnitt<br>mm <sup>2</sup>                                                            | Durchmesser<br>mm                         | Gewicht<br>pro km<br>kg | Querschnitt<br>mm <sup>2</sup> | Zusammensetzung des Seils<br>Drahtzahl $\times$<br>Durchm. mm | Gewicht<br>pro km<br>kg |
| 1,082                                         | za. $\left\{ \begin{array}{l} 16 \\ 20 \\ 24 \\ 30 \\ 33 \\ 40 \\ 50 \end{array} \right.$ | 4,5                                       | 142                     | 26,5                           | 7 $\times$ 2,19                                               | 68,5                    |
| 0,875                                         |                                                                                           | 5,0                                       | 178                     | 32,9                           | 7 $\times$ 2,45                                               | 85,5                    |
| 0,723                                         |                                                                                           | 5,5                                       | 214                     | 40,0                           | 7 $\times$ 2,70                                               | 104,0                   |
| 0,578                                         |                                                                                           | 6,0                                       | 267                     | 50,0                           | 7 $\times$ 3,00                                               | 130,0                   |
| 0,526                                         |                                                                                           | 6,5                                       | 294                     | 55,0                           | 19 $\times$ 1,92                                              | 143,0                   |
| 0,435                                         |                                                                                           | 7,1                                       | 335                     | 66,5                           | 19 $\times$ 2,11                                              | 173,0                   |
| 0,349                                         |                                                                                           | 8,0                                       | 445                     | 82,4                           | 19 $\times$ 2,35                                              | 214,0                   |
|                                               |                                                                                           | Seil:<br>Drahtzahl<br>$\times$ Durchm. mm |                         |                                |                                                               |                         |
| 0,249                                         | 70                                                                                        | 19 $\times$ 2,17                          | 624                     | 115,3                          | 19 $\times$ 2,78                                              | 300,0                   |
| 0,184                                         | 95                                                                                        | 19 $\times$ 2,52                          | 846                     | 156,5                          | 19 $\times$ 3,24                                              | 407,0                   |
| 0,145                                         | 120                                                                                       | 19 $\times$ 2,84                          | 1070                    | 197,6                          | 19 $\times$ 3,64                                              | 514,0                   |

Mit Rücksicht auf die allgemeine Sicherheit schreiben unsere Bundesvorschriften über Starkstromanlagen in Art. 49, Absatz 3,<sup>1)</sup> für Hochspannungs- und für Niederspannungsfreileitungen je einen *Minimal-Querschnitt* für Kupferleiter vor, nämlich 3 bzw. 4 mm  $\varnothing$ . Für Leitungen aus anderem Material ist allgemein gleiche absolute Bruchfestigkeit vorgeschrieben. Analoge Vorschriften für die Einhaltung einer absoluten minimalen Bruchfestigkeit sind in den Bundesvorschriften für Bahnkreuzungen aufgestellt.<sup>2)</sup> Da der elektrisch

<sup>1)</sup> Diese Vorschrift lautet: „Für Freileitungen aus Kupfer oder anderem Material von gleich grosser Festigkeit beträgt der geringste zulässige Drahtdurchmesser 3 mm (Querschnitt 7 mm<sup>2</sup>) für Niederspannungsleitungen, 4 mm (Querschnitt 12 mm<sup>2</sup>) für Hochspannungsleitungen. Für Drähte aus Material von anderer Zugfestigkeit gilt als untere Grenze ein derselben absoluten Festigkeit entsprechender Querschnitt.“

<sup>2)</sup> Art. 38 Absatz a besagt: „Für die Ueberführung von Schwach- und Starkstromleitungen über elektrische Bahnen mit oberirdischer Kontaktleitung gelten, sofern keine besonderen Schutzvorrichtungen angebracht sind, noch die folgenden besonderen Bestimmungen: Die kleinste absolute Bruchfestigkeit und die höchst zulässige Spannweite sollen betragen:

|        |     |             |        |      |
|--------|-----|-------------|--------|------|
| 380 kg | für | Spannweiten | bis zu | 30 m |
| 600 kg | „   | „           | „      | 40 m |
| 800 kg | „   | „           | „      | 50 m |

äquivalente Al-Draht kleinere Festigkeit als der Cu-Draht hat, müssen demnach grössere Al-Querschnitte, berechnet nach absoluter gleicher Zerreißfestigkeit, als minimale angewendet werden. Die Rechnung ergibt als noch anwendbar die in nachstehender Tabelle aufgeführten.

Tabelle 4.

**Zulässige Minimal-Querschnitte für Al-Freileitungen**  
aus Rücksicht auf absolute Festigkeit gemäss schweizerischen Vorschriften.

| Anwendbar gemäss<br>Vorschrift für                              | Kupferdraht            |                                     |                         | Absolute<br>Zerreiß-<br>festigkeit<br>des<br>Leiters<br>kg | Entsprechender, zulässiger<br>minimaler Aluminiumleiter |                                                                                 |                         |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|                                                                 | Durch-<br>messer<br>mm | Quer-<br>schnitt<br>mm <sup>2</sup> | Gewicht<br>pro km<br>kg |                                                            | Quer-<br>schnitt<br>mm <sup>2</sup>                     | Zusammen-<br>setzung des<br>Seils, Draht-<br>zahl $\times$ Durch-<br>messer, mm | Gewicht<br>pro km<br>kg |
| Niederspannungs-<br>leitung B. V. § 49<br>Abs. 2 und 3          | 3                      | 7                                   | 62,5                    | 224                                                        | 12,5                                                    | $7 \times 1,5$                                                                  | 32,5                    |
| Hochspannungs-<br>leitung B. V. § 48<br>Abs. 2 und 3            | 4                      | 12                                  | 107                     | 366                                                        | 22,0                                                    | $7 \times 2$                                                                    | 57                      |
| Bahnkreuzungen<br>über elektr. Bahnen<br>f. Spannweiten b. zu m | ca 4,5                 | 16                                  | 142                     | 380                                                        | 22,0                                                    | $7 \times 2$                                                                    | 57                      |
| B. V. § 38 a                                                    | ca 5,5                 | 24                                  | 214                     | 600                                                        | 38,0                                                    | $7 \times 2,63$                                                                 | 99                      |
| 50                                                              | ca 6                   | 30                                  | 267                     | 800                                                        | 46,0                                                    | $7 \times 2,9$                                                                  | 120                     |

Für Al wären somit als kleinst zulässige Querschnitte in Freileitungen für Niederspannung 12,5 mm<sup>2</sup> und für Hochspannung 22 mm<sup>2</sup> und bei Bahnkreuzungen über elektrische Bahnen 22, 38 bzw. 46 mm<sup>2</sup> entsprechend den maximalen Spannweiten von 30, 40 bzw. 50 m anzuwenden. Allerdings sind die behördlichen Vorschriften für Kupfer zweifellos auch mit Rücksicht auf die sichere Tragung einer gewissen Zufallsbelastung aufgestellt worden, und hierfür ergeben sich beim Al-Draht etwas andere Resultate, allein dieser Unterschied ist nicht von nennenswerter Bedeutung und wird durch die Form der Vorschriften zugelassen.

**Die gebräuchlichen Querschnitte für Al-Leiter und deren Konstanten.**

Für Al-Freileitungen ist die Verwendung einlitziger *Seile* auch für kleinere Querschnitte an Stelle massiver Drähte dringend zu empfehlen, schon wegen des weiter oben angegebenen Grundes und weil Seile grössere Bruchfestigkeit und grössere Fabrikationslänge als querschnittsgleiche einfache Al-Drähte aufweisen. Allerdings ist auch der spezifische Widerstand für Seile etwas höher (nach Dusaugy für einlitzige Seile um 5 %, für mehrlitzige um 10 % höher) als bei massiven Drähten. Dies ist aber in der nachstehenden Tabelle bereits berücksichtigt, in der wir eine Zusammenstellung über Widerstand, Bruchfestigkeit und Gewicht für Al-Seile geben, deren Querschnitte bei uns gebräuchlichen Kupferleitern entsprechen und die z. T. bisher schon als normale Fabrikate geführt wurden. Die Konstanten dieser Leiter sind nach denjenigen (in der frühern Tabelle fett gedruckten) Zahlenwerten berechnet worden, mit denen man für Handels-Al für Leitungen rechnen darf.



Tabelle 5.

**Widerstand, Zerreiissfestigkeit und Gewicht von Aluminium-Seilen**  
die gebräuchlichen Kupferleitern äquivalent sind.

| Querschnitt<br>mm <sup>2</sup> | Zusammensetzung,<br>Drahtzahl $\times$ Durch-<br>messer, mm | Widerstand<br>pro km bei<br>15° C<br>$\Omega$ | Zerreiss-<br>festigkeit<br>kg | Gewicht<br>pro km<br>kg |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| 12,5                           | 7 $\times$ 1,5                                              | 2,319                                         | 32,5                          | 225                     |
| 22,0                           | 7 $\times$ 2,0                                              | 1,316                                         | 57,5                          | 396                     |
| 26,5                           | 7 $\times$ 2,19                                             | 1,082                                         | 68,5                          | 472                     |
| 32,9                           | 7 $\times$ 2,45                                             | 0,875                                         | 85,5                          | 593                     |
| 40,0                           | 7 $\times$ 2,7                                              | 0,723                                         | 104,0                         | 720                     |
| 50,0                           | 7 $\times$ 3,0                                              | 0,578                                         | 130,0                         | 900                     |
| 55,0                           | 19 $\times$ 1,92                                            | 0,526                                         | 143,0                         | 990                     |
| 66,5                           | 19 $\times$ 2,11                                            | 0,435                                         | 173,0                         | 1186                    |
| 82,4                           | 19 $\times$ 2,35                                            | 0,349                                         | 214,0                         | 1480                    |
| 115,3                          | 19 $\times$ 2,78                                            | 0,249                                         | 300,0                         | 2070                    |
| 156,5                          | 19 $\times$ 3,24                                            | 0,184                                         | 407,0                         | 2710                    |
| 197,6                          | 19 $\times$ 3,64                                            | 0,145                                         | 514,0                         | 3550                    |

**Die bei der Montage einzuhaltenden Durchhänge der Al-Leitungen.**

Wie in der Einleitung bemerkt, ist die Veränderung der Länge der Al-Leiter mit der Temperatur viel bedeutender als beim Cu. Auch die elastischen Veränderungen sind andere. Ein bei Sommertemperatur mit dem bei Cu üblichen, oft nur „gefühlsmässig“ bemessenen Seilzug straff gespannter Al-Draht würde im Winter sicher reissen. Soll der Al-Leiter bei niedrigen Temperaturen nicht reissen, so erhält er bei höheren Temperaturen im allgemeinen grösseren Durchhang als der Cu-Draht. Die grosse Veränderung der Länge erfordert auch eine genaue Einhaltung des errechneten Durchhangs bei der Montage.

Für die Berechnung des Durchhangs bei verschiedenen Temperaturen genügt bei Al die „angenäherte“ Methode, welche die elastische Dehnung nicht berücksichtigt, noch viel weniger als bei Cu, wo man sie noch öfter angewendet findet, wo sie aber auch schon viel zu grosse Fehler gibt. Sie würde bei Al zu ganz falschen Daten führen. Wir haben im Nachstehenden mit dem für die heute erhältlichen gut geglühten Al-Seile gebräuchlicher Stärken erwiesenen Elastizitätsmodul = 5400 gerechnet.

Die Berücksichtigung der nötigen *Sicherheit gegen Bruch* wird bekanntlich in verschiedener Weise ausgeführt. Die deutschen Normalien für Freileitungen rechnen mit einer zusätzlichen Belastung für Eis und Schnee nach einer bestimmten Formel, die aber nach unserer Ueberzeugung ziemlich weit von den wirklichen Verhältnissen entfernt ist. Unsere *Bundesvorschriften* dagegen berücksichtigen die Zufallslast, angesichts der Unsicherheit ihrer Werte, nicht direkt, sondern mittelbar durch die Forderung einer sehr grossen, nämlich einer fünffachen, Bruchsicherheit bei niedrigster Ortstemperatur. Diese Forderung werden wir in der Schweiz demnach bei der Feststellung der Durchhänge auch für Al-Leitungen erfüllen müssen. Wir haben auf dieser Grundlage die Durchhänge für verschiedene der gebräuchlichsten Spannweiten, wie sie bei Holz- und Betonmasten vorkommen, berechnet und zwar zunächst unter Zugrundlegung einer Minimal-Temperatur von  $-20^{\circ}$ , die für die meisten Orte der Schweiz genügen wird. Für besondere, bei uns immerhin vorkommende Fälle haben wir auch eine zweite Berechnung für fünffache Sicherheit bei  $-30^{\circ}$  durchgeführt. Die angegebene Grundlage unserer Bundesvorschriften liefert dann für *alle* Querschnitte *denselben* Durchhang für eine bestimmte Spannweite.

Die nachstehenden Tabellen geben das Resultat unserer Rechnung. Man ersieht daraus, bei Vergleich mit entsprechenden Durchhängen von Cu-Drähten, dass die Al-Leitung viel mehr „arbeitet“, die Durchhänge namentlich bei kleinen Spannweiten mit der Temperatur viel mehr wechseln als bei Cu.

**Durchhang f von Aluminiumseilen, die fünffache Sicherheit gegen Bruch aufweisen**

|                      | bei minus 20° C   |    |    |    |    | bei minus 30° C   |    |    |    |    |
|----------------------|-------------------|----|----|----|----|-------------------|----|----|----|----|
| Spannweite in m      | 30                | 35 | 40 | 45 | 50 | 30                | 35 | 40 | 45 | 50 |
| bei Temperaturen von | Durchhang f in cm |    |    |    |    | Durchhang f in cm |    |    |    |    |
| — 30°                |                   |    |    |    |    | 9                 | 12 | 16 | 20 | 25 |
| — 20°                | 9                 | 12 | 16 | 20 | 25 |                   |    |    |    |    |
| 0°                   | 18                | 26 | 32 | 38 | 45 | 29                | 36 | 43 | 51 | 59 |
| + 10°                | 29                | 36 | 43 | 51 | 59 | 38                | 46 | 54 | 62 | 72 |
| + 20°                | 38                | 46 | 54 | 62 | 72 | 46                | 55 | 64 | 73 | 84 |
| + 30°                | 46                | 55 | 64 | 73 | 84 | 53                | 63 | 74 | 84 | 94 |

In der Schweiz müssen somit bei der Montage von Al-Leitern die Durchhänge genau entsprechend der vorstehenden Tabelle eingehalten werden. Es bleiben dann die Beanspruchungen innerhalb der gesetzlichen Vorschriften. Die Zugbeanspruchung des Al bleibt dabei wesentlich geringer als nach den Vorschriften des V. D. E. Unsere Vorschriften verlangen also auch bei Al wesentlich grössere Sicherheit als die deutschen, bieten aber auch bei vorkommender zusätzlicher Belastung mit Schnee und Eis volle Gewähr für Erhaltung der Leitungen in gutem Zustand. Einzelne in der Schweiz ausgeführte Al-Leitungen sind mit noch grösseren Durchhängen, noch weitergehender Sicherheit erstellt worden.

**Montage-Vorschriften für Aluminium-Freileitungen.**

Die besonderen Eigenschaften des Al machen eine sachgemässe Montierung und die sorgfältige Einhaltung der daherigen Vorschriften ganz besonders wichtig. Die unglaublich nachlässige, gleichgültige und unsachgemässe Art, in der man leider immer noch gelegentlich die Montierung von Cu-Leitungen vornehmen sieht, die aber auch für diese Art Leitungen nicht vorteilhaft ist, lässt sich das Al nicht gefallen ohne eine schlechte Anlage zu liefern.

Die grosse *Weichheit des Materials* verlangt vor allem eine sehr sorgfältige Behandlung der Leiter; es muss besser auf Vermeidung von Verletzungen gesehen werden, weil diese leichter entstehen und schwerere Folgen haben als beim Cu. Das Al darf nicht mit harten Gegenständen in bruske Berührung kommen, es dürfen die Werkzeuge, die bei der Cu-Montage verwendet werden (wie Feilkloben, Froschklemmen und dgl.), nicht ohne weiteres beim Al gebraucht werden. Die Werkzeuge sind an den Berührungsflächen mit Al-Einlagen zu versehen. Transportrollen oder Haspel mit Al-Leitern dürfen niemals derart auf dem Boden gerollt werden, dass das Metall selbst mit dem Erdboden in Berührung kommt. Noch weniger dürfen solche Leiter jemals über den Erdboden geschleift oder auf ihn geworfen werden.

Beim *Nachziehen des Drahtes bei der Montage* auf dem Gestänge darf er nicht einfach auf die Isolatorenstützen, Eisentraversen oder dgl. gelegt werden, sondern der Leiter muss sorgfältig über Seilrollen aus Holz oder Al nachgezogen werden, die zum seitlichen Einlegen des Drahtes eingerichtet sind und an den Isolatorenstützen befestigt werden können. Gleich wie eigentlich schon bei der, leider so seltenen, richtigen Montierung von Cu-Draht, darf auch der Leiter aus Al nicht von liegendem Ring oder Rolle abgezogen werden, sondern er muss von der Transportrolle oder einer Montagerolle (Haspel), die sich um eine horizontale, senkrecht zum Leitungstracé liegende Axe beim ersten Maste dreht, langsam abgerollt werden. Die Rolle muss dazu mit Bremsvorrichtung versehen sein. Zu empfehlen ist es, den Leiter dabei durch die Hand gleiten zu lassen, um allfällige Knicke oder Fehler besser aufzufinden. Nachdem das Ende an ein Zugseil angebunden und sorgfältig über die erste Rolle gelegt wurde, hat das Nachziehen über die Gestänge langsam und gleichmässig zu geschehen und

über nicht zu viele Spannweiten in einem Zuge. Die Zahl dieser Spannweiten wird sich nach den Verhältnissen richten, ist aber kleiner als bei Cu; in keinem Falle darf über eine Ecke des Tracés weg gezogen werden.

Die genaueste *Einregulierung des Durchhangs* vor dem Festbinden entsprechend der obigen Tabelle ist nunmehr die Hauptsache. Beim Nachziehen wird sich der Durchhang wegen der Reibung in den Aufhängestellen nicht über die ganze Strecke sofort einstellen, sondern in den Spannweiten zunächst am Zuge kleiner sein. Es empfiehlt sich daher, den Durchhang zunächst an einer der in der Mitte liegenden Spannweiten zu regulieren. Bindet man alsdann zuerst nur an den Enden der Zugstrecke fest, und im übrigen auf den einzelnen Masten derselben erst nach 1 — 2 Tagen, so werden sich Zug und Durchhang auf den einzelnen Strecken von selbst ziemlich ausgeglichen haben. Für die Einhaltung des richtigen Durchhangs verweisen manche Anleitungen auf die Messung der zugehörigen Spannung mittelst der Federwage. Dabei werden sich aber die vorhin erwähnten Ungleichheiten zufolge der Reibung an den Auflagepunkten ebenfalls bemerkbar machen und müssten berücksichtigt werden. Bewährt hat sich bei den Elektrizitätswerken des Kantons Zürich ausser den oben erwähnten Massregeln folgende für die Einstellung des Durchhangs angewandte Methode sehr gut: Es werden zwei Visiervorrichtungen verwendet, bestehend aus einem Stab mit farbiger Centimetereinteilung und darauf verschiebbaren Scheiben mit horizontalem Fenster. Sie werden aufgehängt an den Isolatorenträgern der beiden Masten der zu regulierenden Spannweite und eingestellt auf den der Temperatur entsprechenden Durchhang. Ein Arbeiter sieht durch das Fenster der einen Scheibe nach der gegenüberliegenden während die Seilspannung mittelst Flaschenzug reguliert wird. Die Einstellung ist auf einen Zentimeter genau möglich. Zur Messung der Temperatur und zwar möglichst derjenigen des Al selbst, bedienen sich die E. K. Z. eines Thermometers in Aluminiumhülle.

Zur *Befestigung der Leiter an den Isolatoren* darf natürlich nur Al-Bindedraht verwendet werden, und zwar je nachdem es sich um kleine oder grössere Seil-Querschnitte handelt, solcher von 1½ bis 4 mm Durchmesser. Da er weicher ist als Cu-Bindedraht und ohne Zange, nur von Hand gewickelt werden sollte, so wird die Wickelstelle etwas länger gemacht als bei Cu üblich. Nach verschiedenen Angaben aus der Praxis wäre Kopfbund wie Seitenbund zulässig, wir möchten aber raten den letzteren lieber zu vermeiden, da sich dabei nach amerikanischen Beobachtungen der Al-Leiter mit der Zeit durchscheuern kann. Auch sogen. „Bögli-Bünde“ sind anwendbar, wobei der Bügel aus einem starken Al-Draht und das ganze natürlich ohne Löten hergestellt wird. Dieser Bund wird namentlich für starke Seile empfohlen. Bei dünneren Seilen wird vor dem Binden eine Umwicklung des Leiters an der Bundstelle mit einem Streifen dünnen Al-Blechs angeraten.

Die *Verbindungen* von Al-Leitern sind selbstverständlich nur Klemm-, Press- und Würgverbindungen, da es keine Lötung gibt und Schweissung für solche Leiter bis jetzt nicht praktisch ausführbar ist. Am meisten empfohlen und jedenfalls für Seile bis etwa zu 120 mm<sup>2</sup> gut anwendbar und in Amerika bewährt ist die Verbindung durch flache Al-Röhren, sogen. Arld'sche Röhren in welche die Seilenden von beiden Seiten eingesteckt werden, worauf durch etwa 3 — 4 maliges Verdrehen der Röhre mittelst eines Spezial-Werkzeugs oder einer Zange mit Al-Einlage eine Verbindung von grosser Reissfestigkeit und gutem elektrischem Kontakt entsteht. Zur Verbindung von Querschnitten verschiedener Grösse werden dabei Einlagen aus Al-Drahtstücken oder Al-Blech verwendet. Die auch für Kupfer verwendeten Flachröhren mit Ausbuchtungen, bei denen zwischen die zu verbindenden Leiter unter Anwendung eines Spezialwerkzeuges Niete getrieben werden, werden (selbstverständlich ganz in Al ausgeführt) ebenfalls empfohlen und dürften für mittlere Querschnitte eine gute Verbindung liefern; doch ist dabei wohl der elektrische Kontakt weniger gut. Die Verdrehung des Materials wird vermieden bei einer Verbindungsart, die sich für Seile ganz vorzüglich bewährt hat (z. B. bei den Elektrizitätswerken des Kantons Zürich) und deren Anwendung namentlich für grössere Querschnitte am ehesten zu empfehlen ist: Sie besteht aus mehrteiligen Verbindungsmuffen, bei denen das Ende jedes Seils mit auseinander gespreizten Drähten in ein Endstück gebracht wird, das einen Hohlconus bildet. In diesem werden die Drähte durch einen conischen Kern angepresst, indem eine Schraubenmuffe mit Gegen-

gewinden das ganze zusammenzieht. Alle Stücke sind, wie bei allen solchen Verbindungen nötig, aus Al gefertigt.<sup>1)</sup> Für Endverbindungen wie für Abzweigungen haben sich namentlich auch Klemmverbindungen aus relativ langen Al-Klötzen bewährt, die mit Längsrillen für die einzulegenden Leiter versehen sind und mit mehreren Mutterschrauben zusammengezogen werden. Für grössere Seile wird auch eine spezielle Art Verbindungsstücke hergestellt, bei denen die Seilenden unter starkem hydraulischem Druck mit einer Verbindungsmuffe zu einem Ganzen zusammengepresst werden, das elektrisch und mechanisch vorzüglich verbindet. Für grössere Anlagen sind dafür besondere kleine transportable hydraulische Pressen zur Anwendung gekommen.

Für *Abzweigungen* sind alle für Endverbindungen verwendete Konstruktionen ohne weiteres anwendbar, die eine seitliche Abbiegung des abzweigenden Leiters ermöglichen, so besonders die erwähnten Flachrohre und die Klemmen mit Längsschlitz. Alle Abzweigungen müssen *von Zug entlastet*, also auf einem Gestänge zwischen zwei Isolatoren montiert werden.

Das letztere muss auch der Fall sein für die *Verbindungen zwischen Al- und Cu-Leitungen*. Für diese können erfahrungsgemäss die guten, für die Endverbindung von Al unter sich verwendeten Verbindungsstücke ebenfalls gebraucht werden, wenn dafür gesorgt wird, dass *die Feuchtigkeit von dem Eindringen zur Berührungsstelle der beiden Metalle abgehalten* wird. Empfohlen wird für grössere Seile auch eine einfache gute Verspleissung des Al-Seiles und des Cu-Seils auf etwa 80 bis 100 cm Länge unter Umwindung mit Bindendraht; auch diese Verbindung muss natürlich vor dem Eindringen von Feuchtigkeit geschützt werden. Es wird dazu z. B. das Ueberschieben einer Ebonitröhre unter Ausgiessen derselben mit Asphalt oder Chattertonmasse als bewährt empfohlen. Dieses Mittel kann auch für die anderen Klemmenverbindungen verwendet werden, oder es werden dafür zweiteilige Muffen aus wetterbeständigem Isoliermaterial übergelegt und mit Kabelmasse ausgegossen. Auch ein mehrfacher Anstrich mit Asphaltlack kann bei einfach gestalteten guten Klemmverbindungen das Eindringen der Feuchtigkeit erfahrungsgemäss genügend verhindern. Die Konstruktion dieser Verbindungen zwischen Al und Cu für Freileitungen ist ohne Zweifel noch sehr verbesserungsfähig und es tauchen auch stets neue Vorschläge und neue Konstruktionen auf. Wenn man indessen bedenkt, dass derartige Stücke für eine sehr lange Leitung gewöhnlich nur an einer Stelle vorkommen und leicht überwacht werden können, so liegt darin keine wesentliche Unzukömmlichkeit. Sie wäre allerdings vorhanden, wenn man in bestehenden stark verzweigten Netzen, z. B. Niederspannungsnetzen, nachträglich Abzweigungen aus dem andern Metall als dem der Hauptleitungen machen wollte, welche Anordnung deshalb selbstverständlich *nicht zu empfehlen* ist.

\* \* \*

### Literatur über Aluminium für elektrische Leitungen.

1. 1898. *Aluminium as a rival of copper and brass for electrical conductors*. (Engineer 22. 7. 98) A. E. Hunt.
2. 1899. *Notes on aluminium and its alloys*. The British Aluminium Comp. Ltd.
3. 1899. *The Snoqualmie Falls aluminium transmission line*. (Electrical Review Sept. 27. 1899).
4. 1899. *Aluminium for switch work, bus bars, etc.* (Electrical Review 26. 5. 99.) E. K. Scott.
5. 1899. *Tests and calculations for a forty mile aluminium wire-transmission line*. (Electrical Review 4. Oct. 99. Electrician 20. Oct. 99.) Perrine.
6. 1900. *Elektrische Leitungen aus Aluminium*. (Elektrotechn. Zeitschrift Berlin 1900, S. 797.) Perrine & Baum.
7. 1900. *Elektrische Leitungen aus Aluminium*. (Elektrotechn. Zeitschrift Berlin 1900, S. 813.)
8. 1900. *Aluminium versus copper for electrical purposes* (second edition). The British Aluminium Comp. Ltd.

<sup>1)</sup> Als Bezugsquelle für diese „Raccords à coincement conique“ wird uns die Firma J. Reiss, ingénieur, 85 Rue Saint Lazare, Paris, angegeben, die übrigens auch alle vorher erwähnten Verbindungen s. Z. lieferte, ebenso wie die bekannten deutschen Firmen Stotz & Cie. Mannheim und Carl Berg, Evcking i. Westf. Die auf Seite 118 erwähnten Schweizer Fabrikationsfirmen für Al-Artikel dürften aber ohne weiteres auch in der Lage sein, passende Verbindungen zu fertigen und heute mehr als je für die Lieferung in Frage kommen.



9. 1901. *Niagara Falls transmission line.* (Engineer, April 12. 01.)
10. 1901. *Italian aluminium transmission lines.* (Electrical Review. 1. 3. 01.)
11. 1901. *Long distance power transmission from Niagara Falls.* (Inventions 11. 5. 01.) H. W. Buck.
12. 1902. *Power distribution in California.* (Electrical Engineer 20. 6. 02.)
13. 1903. *The use of aluminium as an electrical conductor.* (Electrical Review 3. 10. 03.) Kershaw.
14. 1904. *Aluminium electrical conductors.* (Electrical Review 29. 9. 04 und 2. 7. 04; Electrician 27. 7. 04.) Parke.
15. 1904. *The use of aluminium as an electrical conductor.* (St.-Louis International Electrical Congress, 1904; Bericht Elektrotechn. Zeitschrift Berlin 1904, S. 94 und 1905 S. 8.) H. W. Buck.
16. 1904. *Aluminium Conductors for Electric Transmission Lines.* (Engineering Magazine S. 873.) A. D. Adams.
17. 1905. *Aluminium conductors.* (English Mechanic & World of Science 11. 1905.)
18. 1906. *The erection of aluminium wires and cables.* The Pittsburgh Reduction Comp.
19. 1907. *Aluminium as a substitute for copper for electrical transmission purposes.* (Electrical Review 15. und 22. Nov. 07.) J. B. Sparks.
20. 1907. *Verwendung des Aluminiums als Leitungsmaterial.* (Elektrotechn. Zeitschrift Berlin, 1907, S. 467.)
21. 1907. *Aluminium for electrical conductors.* Aluminium Company of America (Pittsburgh).
22. 1907. *The transmission plant of the Niagara, Lockport and Ontario Power Company.* Ralph D. Mershon, M. E. Chief Engineer.
23. 1908. *Aluminium versus copper for electrical conductors.* The British Aluminium Comp. Ltd.
24. 1908. *Rapport sur l'emploi de l'aluminium comme conducteur électrique* (Marseille Internat. Congress, 1908). E. Dusauguey, ingénieur, directeur général du Sud Electrique.
25. 1908. *Hochspannungskabel- und Hochspannungs-Kraftübertragungen.* (Elektrotechn. Zeitschr. Berlin 1908, Hefte 8 u. 9.) Richard Apt.
26. 1909. *Mitteilungen aus dem Kabelwerk,* N. 52. Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft, Berlin.
27. 1910. *Bare aluminium cables* (The Electrical Times, London). H. A. Hobart.
28. 1910. *Metalle für Freileitungen.* (Elektrotechn. Zeitschr. Berlin, 1910, Heft 44, S. 1107.) W. v. Möllendorff, Dipl. Ingenieur.
29. 1910. *Anwendung des Aluminium als Leiter der Elektrizität.* (L'Elettricista 1909, Hefte 10—13, Bericht Elektrotechn. Zeitschr. Berlin, 1910, Heft 29, S. 738.) E. Soleri.
30. 1910. *Ueber blanke Aluminium-Leitungen.* (El. Times, London 24. 3—21, 4. 1910; Bericht Elektr. & Masch. Wien, 1910, Heft 23, S. 486). Hobart.
31. 1910. *Die elektrische Leitfähigkeit von Kupfer- und Aluminiumdraht.* (Proc. of Am. Inst. El. Eng. Bd. 29 1910 S. 198, Bericht Elektrotechn. Zeitschr. Berlin, 1911, Heft 32, S. 808, F. A. Wolf & S. H. Dellinger.
32. 1911. *Leitungsverbindungen für Aluminium-Freileitungen.* British Insulated & Helsby Cables Ltd. (The Electrician. Bd. 66 1911, S. 907; Bericht Elektrotechn. Zeitschr. Berlin, 1911, Heft 21, S. 527.)
33. 1911. *Sur le calcul de la flèche des lignes aériennes en aluminium.* (Bull. techn. de l'Association de l'Inst. électr. de Grenoble, III. 1911, pag. 48; Bericht Elektr. & Masch. Wien, 1911, Heft 45, S. 927). G. Baron.
34. 1911. *Metalle für Freileitungen.* (Arch. für Post und Telegr. No. 19, 1911; Bericht Elektr. & Masch. Wien, 1911, Heft 50, S. 1028.) W. v. Ollendorf.
35. 1911. *Renseignements généraux sur l'emploi de l'aluminium pur et de haute conductibilité comme conducteur électrique.* Société Electro-Métallurgique Française.
36. 1911. *Aluminium versus copper cables for low-tension feeders and distributors on underground networks* (Electrical Engineering. Nov. 24. 1910 a. Febr. 9. 1911). F. C. Raphael a. J. B. Sparks.
37. 1911. *Aluminium für elektrische Leitungen.* (Turin, Internat Kongress 1911) E. Huber-Stockar, Ingenieur.
38. 1911. *Die Anwendung von Aluminium für Starkstromleitungen.* Frankfurt a. M. Hedderheimer Kupferwerk und Süddeutsche Kabelwerke.
39. 1912. *Die wirtschaftliche Verwendung des Aluminium für Freileitungen.* (Electrical World, 6. 7. 1912; Bericht Elektr. & Masch. Wien, 1912, Heft 39, S. 818). Ch. L. Johnson.
40. 1912. *Aluminiumleitungen für Kraftübertragung.* Carl Berg A.-G. Evekling i. W.
41. 1912. *Les conducteurs d'électricité en aluminium.* E. Dusauguey, Ing.-Conseil, Paris 1912; H. Dunod et E. Pinat.
42. 1912. *Charakteristiken von Aluminium- und Kupfer-Leitungen.* (Electrical Review, Bd. 70 1912, S. 771, Bericht Elektrotechn. Zeitschr. Berlin, 1913, Heft 30, S. 864). E. V. Panel
43. 1912. *Zur Berechnung des Durchhanges von Leitungen.* (Electrical World 13. 7. 1912). Carpenter.
44. 1913. *Duralumin.* (Elektr. & Masch. Wien, 1912, Hefte 39 und 40, S. 809 bzw. 829; 1913, Heft 20, S. 430). Ing. L. M. Cohn.
45. 1913. *Elektrische Leiter aus Aluminium.* (Engineering Bd. 95 1913, S. 812, Bericht Elektrotechn. Zeitschr. Berlin, 1914, Heft 36/37, S. 982.) B. Wellbourn.
46. 1915. *Graphische Bestimmung der Zugbeanspruchung von Freileitungen.* (Elektrotechn. Zeitschr. Berlin, 1915, Heft 26, S. 327). J. Sumec.



### Anmerkung.

Nachdem wir im Vorstehenden über die Verwendung von Al für Freileitungen zunächst das gebracht haben, was der Praktiker unmittelbar für die sofortige Anwendung wissen muss und was für die gewöhnlichen Fälle vollkommen ausreicht, werden wir in der nächsten Nummer des „Bulletin“ noch einige *Ergänzungen* zu diesem Artikel veröffentlichen, welche einzelne auftretende Verhältnisse und namentlich die rechnerische Behandlung und zahlenmässigen Ergebnisse etwas näher erörtern.

Die so vervollständigte kleine Monographie werden wir dann als Ganzes auch in *Separatabzügen* erscheinen lassen, hoffend, damit einem aktuellen Bedürfnis zu genügen.

Das Generalsekretariat.



## Berichtigung

zum Artikel

### „Ueber Messungen an Hochspannungskabeln im Leerlauf- und Kurzschluss-Versuch“

von Prof. Dr. W. Kummer, Zürich.

Auf Seite 67, „Bulletin“ No. 3 von 1916, 3. Zeile von oben, ist in der Formel für  $I_2$  die Zahl 2 im Zähler der zweiten Quadratwurzel durch die Zahl 4 zu ersetzen und damit ein Druckfehler zu korrigieren.

Das Generalsekretariat.

## Miscellanea.

**Inbetriebsetzung von schweizerischen Starkstromanlagen.** (Mitgeteilt vom Starkstrominspektorat des S. E. V.) In der Zeit vom 20. März bis 20. April 1916 sind dem Starkstrominspektorat folgende wichtigere Anlagen als betriebsbereit gemeldet worden:

#### Hochspannungsfreileitungen.

**Aargauisches Elektrizitätswerk, Aarau.** Hochspannungsverbindungsleitung zwischen der Leitung Würenlos-Rudolfstetten und der 8000 Volt-Zuleitung Würenlos. Drehstrom, 8000 Volt, 50 Perioden.

**Elektrizitätswerk des Kantons Thurgau, Arbon.** Leitungen nach Gloten bei Wil und Karlshub bei Affeltrangen. Drehstrom, 8000 Volt, 50 Per. Leitung zur Transformatorstation Sägerei Horn. Drehstrom, 10 000 Volt, 50 Perioden.

**Nordostschweizerische Kraftwerke A.-G. Baden.** Leitungen nach dem „Berg“ in Seengen, Hettenswil und Rückleitung auf dem gleichen Gestänge zur Stromversorgung der Gemeinde Reuental, zur Sodafabrik Zurzach, von der Mess- und Transformatorstation Sodafabrik Zurzach in Reckingen, zur gemeinschaftlichen Transformatorstation in Rietheim, nach Mellikon. Drehstrom, 8000 Volt, 50 Perioden.

**Bernische Kraftwerke A.-G., Betriebsleitung Biel.** Leitung zur Sägerei Renfer & Co. A.-G., Bözingen. Drehstrom, 8000 Volt, 40 Perioden.

**Service de l'Electricité de la Ville de La Chaux-de-Fonds.** Ligne à haute tension aux Eplatures. Courant triphasé, 4000 volts, 50 pér.

**Administration des Eaux et Forêts, Entreprise de Fribourg, Fribourg.** Ligne à haute tension à la station transformatrice Pérolles-Glâne. Courant triphasé, 8000 volts, 50 périodes.

**Kraftwerk Laufenburg, Laufenburg.** Leitung von Kaisten nach Sulz. Drehstrom, 6000 Volt, 50 Per.

**Cie. Vaudoise des Forces motrices des lacs de Joux et de l'Orbe, Lausanne.** Ligne pour alimenter la station transformatrice sur poteaux à Villars-sous-Yens. Courant monophasé, 12500 volts, 50 périodes. Ligne pour l'usine de carbure du Day près Vallorbe. Courant triphasé, 13500 volts, 50 périodes.

**Services Industriels de la Ville du Locle, Le Locle.** Lignes pour la scierie de la Jalouse à la Foula, entre Montperreux et la Combe-Robert et pour la scierie du Verger. Courant triphasé, 4000 volts, 50 périodes.

**Officina Elettrica Comunale, Lugano.** Leitung von der Abzweigleitung der Generosoleitung in Mendrisio nach Capolago. Drehstrom, 3600 Volt, 50 Perioden.

**Elektrizitätswerk der Stadt Luzern.** Leitung zur Stangen-Transformatorstation im Weiler Blättig bei Kriens. Drehstrom, 5300 Volt, 50 Per.

**Elektrizitätswerk Murg.** Verstärkung der Leitung Unterstation Unterterzen-Zentrale Murg und Verlegung derselben beim Kalkofen Quarten. Drehstrom, 6000 Volt, 50 Perioden.

**Société des usines Hydro-électriques de Montbovon, Romont.** Ligne à haute tension de Vucherens à Mézières-le-Jorat. Courant triphasé, 8000 volts, 50 périodes.