

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 18 (1927)
Heft: 3

Artikel: Die elektrische Leitfähigkeit des Reinaluminiums
Autor: Bosshard, M.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058613>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des
Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des
Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke

REDAKTION
Zürich 8, Seefeldstr. 301

Secrétariat général de
l'Association Suisse des Electriciens et de
l'Union de Centrales Suisses d'électricité

Verlag und Administration

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.
Zürich 4, Stauffacherquai 36/38

Editeur et Administration

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

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et
sans indication des sources

XVIII. Jahrgang
XVIII^e Année

Bulletin No. 3

März 1927
Mars

Die elektrische Leitfähigkeit des Reinaluminiums.*)

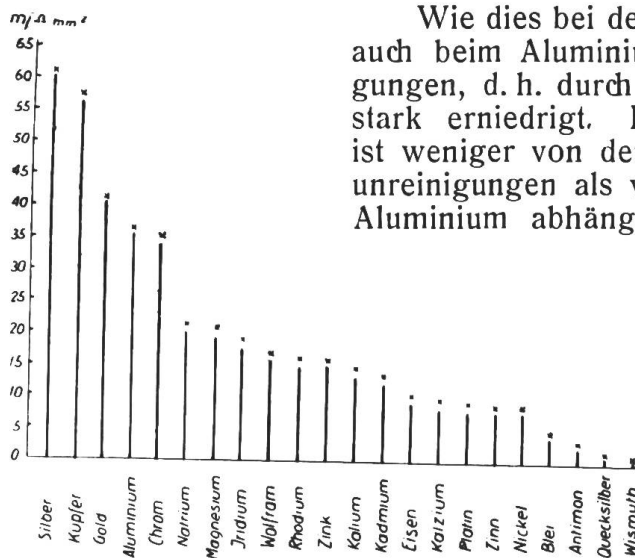
Von M. Bosshard, Aluminium-Industrie-Aktiengesellschaft Neuhausen.

Der Autor gibt an Hand einer Reihe von systematischen Untersuchungen den Einfluss an, den kleine Beimengungen von Eisen, Silizium, Titan, Kupfer, Zink und Kalzium auf die Leitfähigkeit des Aluminiums zur Folge haben. Er zeigt zugleich auch, welchen Einfluss die Wärmebehandlung und die Kaltreckung auf die Leitfähigkeit haben.

L'auteur indique l'action de faibles additions de fer, silicium, titane, cuivre, zinc et calcium sur la conductibilité électrique de l'aluminium. Il montre en outre l'influence du traitement thermique et de l'écrouissage à froid sur la conductibilité.

621.319.3

Aus der nachstehenden Zusammenstellung der elektrischen Leitfähigkeit der wichtigeren Metalle ist ersichtlich, dass das Aluminium zusammen mit Gold und Chrom den Uebergang bildet zwischen den gutleitenden Metallen Silber und Kupfer zu den übrigen Metallen, die im Vergleich zu diesen als schlechte Elektrizitätsleiter bezeichnet werden müssen.



SE V 36

Fig. 1.

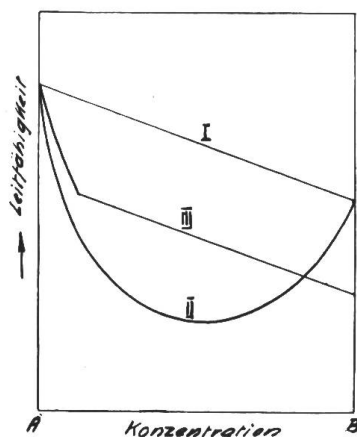
Elektrische Leitfähigkeit verschiedener reiner Metalle
bei +18° C.

Wie dies bei den übrigen Metallen die Regel ist, so wird auch beim Aluminium die Leitfähigkeit durch Verunreinigungen, d. h. durch Legierungsbildung, mehr oder weniger stark erniedrigt. Der leitfähigkeitserniedrigende Einfluss ist weniger von der chemischen Beschaffenheit dieser Verunreinigungen als viel mehr von ihrem Verteilungsgrad im Aluminium abhängig. Ist die Verteilung eine verhältnismässig grobe, so dass die Verunreinigungen mikroskopisch sichtbar in Form besonderer Kristallarten oder Einschlüsse im Aluminium vorhanden sind (als 2. Phase), so kann seine Leitfähigkeit mit grosser Annäherung nach der Mischungsregel berechnet werden; sie stellt dann eine lineare Funktion der Volumkonzentration der Komponenten dar. Anders dagegen, wenn die Verteilung eine äusserst feine submikroskopische ist, dann ist die Leitfähigkeit des Systems immer bedeutend

kleiner als die nach der Mischungsregel berechnete. Den feinsten Verteilungsgrad stellen die Lösungen dar, von welchen hier nur die festen Lösungen interessieren.

*) Von diesem Aufsatz sind Separatabzüge zum Preise von Fr. 1.— (Mitglieder) und Fr. 1.50 (Nichtmitglieder) beim Generalsekretariat des S. E. V. und V. S. E., Seefeldstr. 301, Zürich 8, erhältlich.

Solche feste Lösungen (1 Phase) mit gesetzmässigem Raumgitteraufbau werden in der Kristallographie Mischkristalle genannt. Die grösste Leitfähigkeitserniedrigung werden also mischkristallbildende Beimengungen ergeben. Wird die Konzentration solcher Mischkristalle durch Wärmebehandlung verändert, wie dies beispielsweise bei Aluminium-Silizium-Mischkristallen der Fall sein kann, so ist damit naturgemäss auch eine Veränderung der elektrischen Leitfähigkeit verbunden.



S. E. V. 37

Fig. 2.

Die vorstehend geschilderten allgemeinen Verhältnisse lassen sich an Hand der schematischen Fig. 2 leicht übersehen.

In ihr veranschaulicht Kurve I den Verlauf der Leitfähigkeit bei einem aus 2 Phasen aufgebauten Gemenge, Kurve II denjenigen bei einer ununterbrochenen Reihe von Mischkristallen, d. h. also bei vollständiger gegenseitiger Löslichkeit der Komponenten im festen Zustande, und Kurve III den Verlauf bei begrenzter Mischkristallbildung. Die Sättigungskonzentration der Mischkristalle ist durch einen Knickpunkt in der Leitfähigkeitskurve ausgeprägt.

Ausser durch Legierungsbildung und Wärmebehandlung kann die elektrische Leitfähigkeit auch noch durch das Gefüge und durch Kaltreckung beeinflusst werden. Auf diese relativ geringfügigen Einflüsse wird später noch eingegangen werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden:

Die Leitfähigkeit des technischen Aluminiums ist im wesentlichen eine Funktion der Zusammensetzung und der Wärmebehandlung.

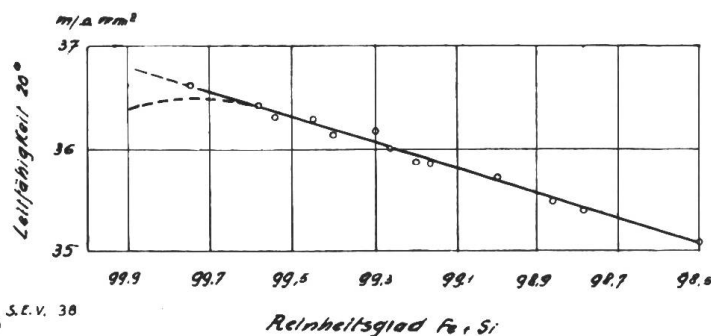
Bei gegebener Zusammensetzung wird die Leitfähigkeit durch die letzte im Laufe der Verarbeitung vorgenommene Wärmebehandlung bestimmt.

Für Aluminium ist charakteristisch, dass die Sättigungsgrenze vieler mit dem Aluminium bei höheren Glühtemperaturen mischkristallbildender Beimengungen mit fallender Temperatur sehr rasch zurückgeht und bei 300–250° C ein Minimum erreicht. Glühung bei 250–300° C ergibt daher bei gegebener Zusammensetzung ein Maximum an Leitfähigkeit.

Sind, wie dies bei gutem Handelsaluminium der Fall ist, andere Verunreinigungen ausser Eisen und Silizium nur in Spuren vorhanden, so ist die Leitfähigkeit im Zustande maximaler Leitfähigkeit (also nach Glühung bei 250–300° C) ungefähr proportional dem Gehalte an Eisen und Silizium, wie dies aus Fig. 3 ersichtbar ist.

Reinstes nach dem bisher üblichen Verfahren gewonnenes technisches Aluminium von 99,75% Reingehalt weist nach Fig. 3 bei 20° C eine Leitfähigkeit von 35,65 m/Ω mm² auf. Für je 0,2% Verunreinigungen (Fe+Si) sinkt die Leitfähigkeit um mindestens

0,25 Einheiten. Chemisch reines Aluminium würde wahrscheinlich noch eine bedeutend höhere Leitfähigkeit (40 m/Ω mm²) aufweisen; denn es ist anzunehmen, dass Verunreinigungen in Mengen von 1–2 Zehntelprozenten auch nach Glühung bei 250–300° C noch als Mischkristalle, d. h. in derjenigen Form vorhanden sind, die die grösste Leitfähigkeitserniedrigung bewirkt. Eigene Messungen, sowie



S. E. V. 38

Fig. 3.

Abhängigkeit der Leitfähigkeit nach Glühung bei 300° C vom Reinheitsgrad des Al.

solche von *Holborn*¹⁾ und von *Jaeger und Scheel*²⁾ an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt in Berlin, die an besonders gereinigtem Metall mit nur 0,1 % Fe + Si-Gehalt vorgenommen wurden, scheinen zwar im Gegenteil zu beweisen, dass die Leitfähigkeit mit zunehmendem Reinheitsgrad wieder etwas zurückgeht (punktierte Kurve in Fig. 3). Deutlicher noch als in der Leitfähigkeit kommt dieses anormale Verhalten von Aluminium mit sehr geringem Fe + Si-Gehalt im Temperaturkoeffizienten der Leitfähigkeit zum Ausdruck, indem dieser von *Holborn* an 99,9 % igem Metall kleiner gefunden wurde als an Metallproben von handelsüblichem Reinheitsgrade, kleiner selbst als derjenige eines Musters von nur 98,4 % Reingehalt. Dieses merkwürdige Verhalten, das allen bisherigen Erfahrungen bei andern Metallen widerspricht, wird wahrscheinlich auf eine Verunreinigung mit bisher nicht systematisch quantitativ ermittelten Stoffen zurückzuführen sein. *R. Apt*³⁾ glaubt aus den Ergebnissen französischer Untersuchungen⁴⁾ schliessen zu können, dass für die fragliche Wirkung der Kohlenstoffgehalt des Aluminiums verantwortlich gemacht werden müsse. Es ist jedoch klar, dass nur mischkristallbildende Beimengungen eine ähnliche Wirkung bedingen können; dass aber Kohlenstoff, auch nur in kleinen Mengen vom Aluminium unter Mischkristallbildung aufgenommen werden kann, erscheint höchst unwahrscheinlich. Viel eher wird dieses scheinbar anormale Verhalten gereinigten Aluminiums auf einen Alkalimetallgehalt zurückzuführen sein, indem nämlich die Löslichkeit für Alkalimetalle mit abnehmendem Fe – Si-Gehalt sich zu erhöhen scheint. Eine Aufnahme von Alkalimetall ist aber nicht zu vermeiden solange das Aluminium unter einer Alkalisalzdecke (Kryolith) erschmolzen wird.

Neuerdings wurden von *J. D. Edwards*⁵⁾ Messungen bekanntgegeben, die an sehr reinem Metall, welches nach dem technisch leider nicht durchführbaren Raffinationsverfahren nach *Hoopes*⁶⁾ gewonnen wurde, ausgeführt wurden. Danach wies eine Probe 99,97 % iges Metall (Si + Fe + Cu + Zn = 0,029 %) eine Leitfähigkeit

$$\lambda_{20^\circ} = 37,5 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2 \text{ auf.}$$

Eigene Messungen an nach demselben Verfahren raffiniertem Metall zeigten nur eine Leitfähigkeit

$$\lambda_{20^\circ} = 36,5 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2.$$

Dieses Metall wies allerdings eine bedeutend geringere Reinheit von nur 99,74 % auf, und zwar Fe 0,08 %, Si 0,07 % und Cu 0,08 %.

Ueber den Einfluss der häufigsten Verunreinigungen von Handelsaluminium auf seine Leitfähigkeit geben die nachfolgenden graphischen Zusammenstellungen Auskunft.

Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom Fe-Gehalt.

Der Verlauf der Leitfähigkeitskurven entspricht dem Typus der Kurve I in Fig. 2. Hieraus ist zu schliessen, dass das Eisen im Aluminium als besondere Kri-

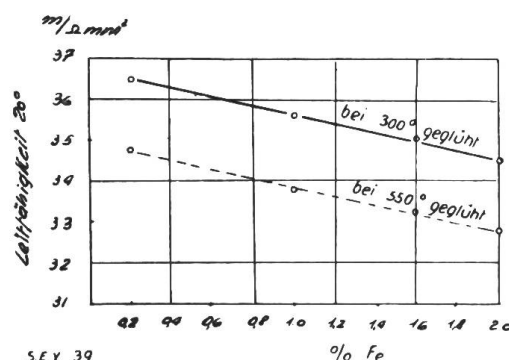


Fig. 4.

Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom Fe-Gehalt.
Si-Gehalt 0,2 % konstant.
Fe-Gehalt von 0,2–2 % steigend.

1) L. Holborn, „Untersuchungen über Aluminium“, Elektrotechnische Zeitschrift 40/1919, 151 – 153.

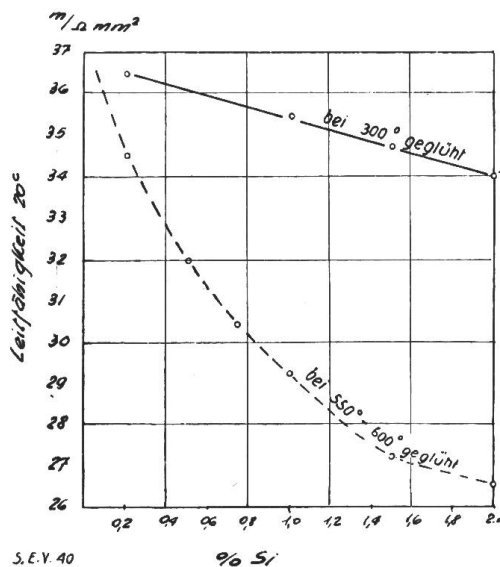
2) W. Jaeger und K. Scheel, „Untersuchungen über Aluminium“, Elektrotechnische Zeitschrift 40/1919, 150 – 151.

3) R. Apt, „Die Abhängigkeit der elektrischen und mechanischen Eigenschaften des Aluminiums von der chemischen Zusammensetzung“, Elektrotechnische Zeitschrift 40/1919, 265 – 266.

4) Revue Générale de l'Electricité 3/823.

5) J. D. Edwards, „The properties of pure Aluminium“, Trans. Am. Electrochem. Soc. 47 (1925), 287.

6) F. Frary, „The Electrolytic Refining of Aluminium“, Trans. Am. Elektrochem. Soc. 47 (1925), 275.



stallart auftreten muss. Durch metallographische Untersuchungen ist diese Schlussfolgerung längst bestätigt. Man weiss, dass Eisen mit Aluminium eine chemische Verbindung FeAl_3 bildet, welche im festen Aluminium praktisch unlöslich ist. Die Differenz der Leitfähigkeiten nach Glühung bei 550°C und 300°C ist wahrscheinlich auf eine etwas vermehrte Löslichkeit des Eisens im festen Aluminium bei höheren Temperaturen zurückzuführen. Die Sättigungsgrenze dieses Mischkristallgebietes erreicht aber 0,2% Fe nicht. 1% Eisen bewirkt eine Erniedrigung der Leitfähigkeit des reinen Aluminiums um ca. 2,7%.

Fig. 5. Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom Si-Gehalt.
Fe-Gehalt 0,2% konstant.
Si-Gehalt von 0,2–2% steigend.

Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom Si-Gehalt.

Der Leitfähigkeitsverlauf nach Glühung bei 300°C entspricht ungefähr demjenigen bei den Aluminium-Eisen-Legierungen. Silizium muss also in diesem Zustande ebenfalls als besondere Kristallart im Aluminium eingelagert sein und zwar, wie die metallographische Untersuchung zeigt, als elementares Silizium, da Silizium mit Aluminium keine chemische Verbindung bildet. Anders dagegen nach Glühung bei 550°C , hier trägt die Leitfähigkeitskurve den Charakter der Kurve III in Fig. 2. Der der Sättigungsgrenze der Aluminium-Silizium-Mischkristalle entsprechende Knickpunkt der Leitfähigkeitskurve liegt bei 1,5–1,6% Silizium. Diese Menge Silizium ist also bei 550°C im Aluminium in fester Lösung. Trotzdem die Löslichkeit mit fallender Temperatur stark zurückgeht und schon bei 300°C unter 0,2% sinkt, so gelingt es doch, den bei 550°C gesättigten Mischkristall durch Abschreckung in einen metastabilen Zustand der Uebersättigung überzuführen. Bei langsamer Abkühlung oder durch nachträgliches Anlassen der übersättigten festen Lösung wird der Zustand der Uebersättigung aufgehoben, dabei kristallisiert elementares Silizium in fein verteilter Form als sog. „graphitisches Silizium“ aus der festen Lösung aus. Der Uebergang aus dem bei höheren Temperaturen beständigen homogenen Mischkristallgebiet in das bei Temperaturen unter 300°C beständige heterogene Zustandsgebiet ist, wie aus Fig. 6 ersichtlich, ein kontinuierlicher, vollzieht sich aber naturgemäss umso langsamer, je niedriger die Anlass temperatur ist. Während bei 300°C eine ca. dreitägige Anlassdauer zur Erreichung des Gleichgewichtszustandes ausreicht, so ist hierzu bei 200°C schon eine mindestens einjährige Wärmebehandlung notwendig und bei 100°C tritt praktisch in absehbarer Zeit überhaupt keine wesentliche Veränderung ein, der metastabile Mischkristallzustand bleibt bei dieser Temperatur bestehen.

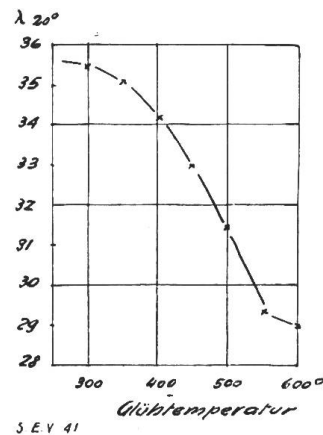


Fig. 6.
Leitfähigkeit einer 1%igen
Al-Si-Legierung, in Abhängig-
keit von der Wärmebehand-
lung. Fe-Gehalt 0,2%.

Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom Fe–Si-Gehalt.

Das Verhalten der Leitfähigkeit bei gleichzeitiger Anwesenheit von Eisen und Silizium ist in Fig. 7 wiedergegeben.

Dieser merkwürdige Kurvenverlauf lässt sich zwanglos durch die Bildung einer chemischen Verbindung zwischen Eisen und Silizium erklären, welche ähnlich wie FeAl_3 nur einen sehr engen Mischkristallbereich aufweist. Nach Glühung bei 550°C steigt die Leitfähigkeit zunächst an bis alles Silizium durch Eisen abgesättigt ist, dies ist bei dem vorliegenden Siliziumgehalt von 1% bei einem Eisengehalt von 2% der Fall. Nach Ueberschreitung dieser Konzentration tritt normale Leitfähigkeitsabnahme entsprechend Kurve I Fig. 2 ein. Nach Glühung bei 300°C scheint mit steigendem Fe-Gehalt zunächst ein sehr steiler Abfall der Leitfähigkeitskurve um etwas mehr als eine Einheit einzutreten, welcher auf beschränkte Mischkristallbildung schliessen lässt. Die Sättigungsgrenze bei dieser Temperatur liegt wahrscheinlich bei ca. $0,3\%$ Fe, von dieser Konzentration an verläuft die Kurve bis zu 2% Fe-Gehalt, d. h. bis zur vollständigen Absättigung des Siliziums sehr flach, um dann von hier ab wieder stärker abzufallen. Die metallographischen Verhältnisse des Systems Al-Fe-Si sind noch nicht vollständig aufgeklärt. Durch diese Leitfähigkeitsuntersuchungen ist aber erwiesen, dass Eisen und Silizium sich im Verhältnis Fe:Si, also im Gewichtsverhältnis 2:1, absättigen. Die hierbei sich bildende chemische Verbindung scheint aber ihrem chemischen Verhalten nach nicht ein Ferrosilizium zu sein, sondern wahrscheinlich eine ternäre Verbindung, die ausser Fe und Si noch Aluminium enthält.

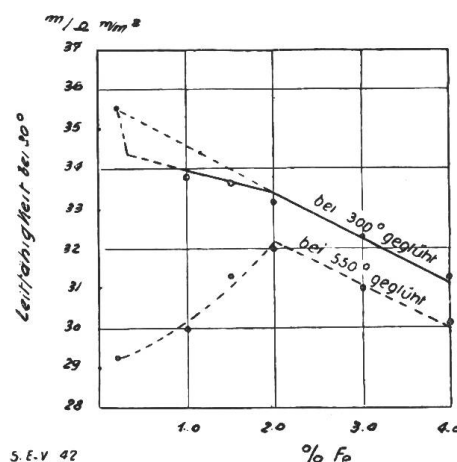


Fig. 7.
Einfluss von Fe und Si.
Si-Gehalt 1% konstant.
Fe-Gehalt von $0,2-4\%$ steigend.

Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom Titan-Gehalt.

Zu den ständigen Verunreinigungen des technischen Aluminiums ist auch das

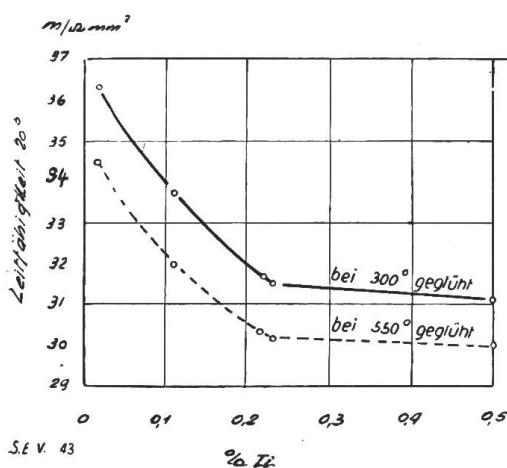


Fig. 8.
Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom Ti-Gehalt.
Fe-Gehalt $0,35-0,43\%$.
Si-Gehalt $0,16-0,18\%$.
Ti-Gehalt steigend von $0-0,5\%$.

Titan zu zählen, da die meisten Bauxite, aus denen das Rohmaterial für die Aluminiumgewinnung hergestellt wird, titanhaltig sind. Normalerweise ist Titan im Aluminium nur in Spuren vorhanden, sein Gehalt kann aber unter Umständen bis zu mehreren Zehntelprozenten ansteigen. Welchen unheilvollen Einfluss dieser dann auf die Leitfähigkeit des Metalles ausübt, geht aus Fig. 8 hervor.

Wie ersichtlich, werden geringe Mengen Titan vom Aluminium als Mischkristall aufgenommen. Die Sättigungsgrenze liegt bei ca. $0,23\%$ Titan. Da die Lage der Sättigungsgrenze keine Temperaturabhängigkeit zeigt, wie z. B. beim Silizium, so besteht hier keine Möglichkeit, die durch den Titangehalt bedingte starke Leitfähigkeitserniedrigung durch Wärmebehandlung zu verbessern.

Abhängigkeit der Leitfähigkeit von Kupfer-Gehalt.

Kupfer ist in Original-Hüttenaluminium europäischer Provenienz stets nur in Spuren vorhanden, in amerikanischem Metall dagegen meist in Mengen von ca. $0,1\%$. Auch Umschmelzmetall des Handels enthält häufig bis zu $0,2\%$ Kupfer.

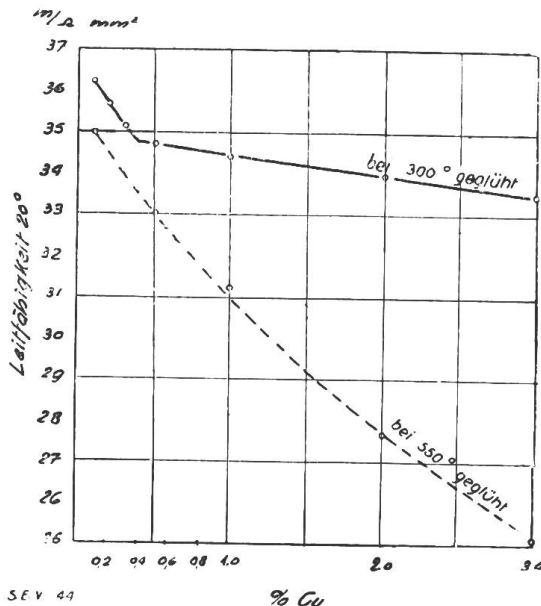


Fig. 9.

Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom Cu-Gehalt.
Fe-Gehalt 0,20 %
Si-Gehalt 0,15 %
Cu-Gehalt steigend von 0,1–3 %.

Fig. 9 gibt den Verlauf der Leitfähigkeitskurven mit steigendem Kupfergehalt wieder. Durch metallographische Untersuchungen ist erwiesen, dass Kupfer in Gegenwart eines grossen Aluminiumüberschusses mit Aluminium eine chemische Verbindung CuAl_2 eingeht. Diese bildet bei höheren Temperaturen von 500–550° C mit Aluminium Mischkristalle. Die Sättigungsgrenze ist aus Fig. 9 allerdings nicht ersichtlich, denn sie liegt bei einer Temperatur von 550° C bei ca. 4,7–4,8 % Cu. Ähnlich wie beim Silizium geht hier die Löslichkeit mit fallender Temperatur sehr rasch zurück und beträgt bei 300° C, wie aus dem Knickpunkt der Leitfähigkeitskurve zu ersehen ist, nur noch ca. 0,4 % Cu. Auch mit relativ hohem Kupfergehalt kann daher Aluminium bei geeigneter Wärmebehandlung noch eine gute Leitfähigkeit aufweisen.

Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom Zink-Gehalt.

Im Hütten-Aluminium ist Zink immer, aber nur in Mengen von einigen Hundertstelprozenten vorhanden. Es stammt hier wahrscheinlich aus dem bei der Aluminiumelektrolyse verwendeten Kryolith. In Umschmelzmetall des Handels kann Zink dagegen bis zu mehreren Zehntelprozenten auftreten. Der Einfluss des Zink-Gehaltes auf die Leitfähigkeit ist aus Fig. 10 ersichtlich.

Aus diesen Kurven muss geschlossen werden, dass Zink nur in sehr geringen Mengen Mischkristalle zu bilden vermag. Die Sättigungskonzentrationen liegen nach Glühung bei 550° C bei ca. 0,35 % Zink, nach Glühung bei 240° C bei ca. 2,5 % Zink. Dieser Befund steht im Widerspruch mit den Ergebnissen zahlreicher metallographischer Untersuchungen. Dennoch kann aber nicht daran gezweifelt werden, dass diese Legierungen oberhalb der oben erwähnten Sättigungskonzentrationen bei gewöhnlicher Temperatur aus 2 Phasen bestehen.

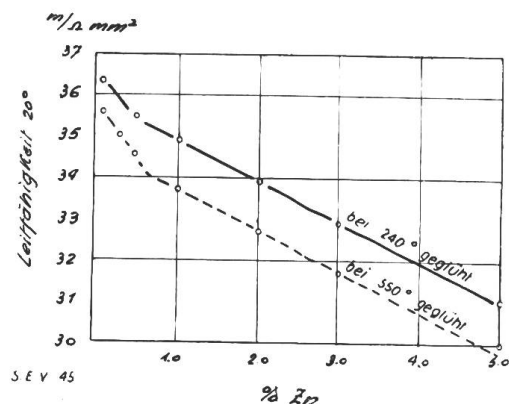


Fig. 10.

Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom Zn-Gehalt.
Fe-Gehalt 0,2 %
Si-Gehalt 0,15 %
Zn-Gehalt von 0–5,0 % steigend.

Abhängigkeit der Leitfähigkeit vom Kalzium-Gehalt.

Von *Rosenhain und Grogan*⁷⁾ wurde festgestellt, dass die Leitfähigkeit von siliziumhaltigem technischem Aluminium durch Kalzium-Zusatz sich erhöhen lässt. In einer diesbezüglichen Patentschrift wird als Beispiel ein Aluminium mit 0,14 % Fe und 0,46 % Si angeführt, dessen Leitfähigkeit durch 0,35 % Kalziumzusatz von 58,3 auf 62,0 % (Cu = 100) erhöht werden konnte. Nimmt man für Kupfer bei 20° C eine Leitfähigkeit von 57,5 m/Ω mm² an, so ergibt sich durch Umrechnung für das im Beispiel erwähnte Aluminium eine Leitfähigkeitserhöhung von 33,5 auf 35,6 m/Ω mm².

⁷⁾ British Patent 211,027 vom 18. Feb. 1924.

Rosenhain und Grogan erklären diese Wirkung durch die Bildung eines im festen Aluminium unlöslichen Kalziumsilydes. Es liegt hier also offenbar eine ganz ähnliche Wirkung vor, wie diejenige bei der Absättigung des Siliziums durch Eisen (vergl. Fig. 7). Nach eigenen Untersuchungen bedingen auch Cer und Vanadin ein analoges Verhalten wie Eisen und Kalzium, indem auch diese Metalle mit Silizium im festen Aluminium unlösliche Silizide bilden.

Da bei Anwesenheit freien, nicht an Eisen gebundenen Siliziums im Aluminium, wie wir gesehen haben, schon durch blosse Wärmebehandlung eine ebenso erhebliche Leitfähigkeitserhöhung erzielt werden kann wie durch Kalzium-Zusatz, so wird das Verfahren von Rosenhain und Grogan kaum technische Bedeutung erlangen.

Den Einfluss des Kalziums auf die Leitfähigkeit, praktisch Fe- und Si-freien Aluminiums von 99,94% Feingehalt, haben kürzlich *Edwards und Taylor*⁸⁾ festgestellt. Ihre Messresultate sind in Fig. 11 dargestellt.

Die Leitfähigkeit sinkt proportional dem Kalzium-Gehalt, Kalzium vermag demnach mit Aluminium keine Mischkristalle zu bilden, sondern ist als besondere Kristallart — CaAl_3 — im Aluminium vorhanden, welche bei ca. 8% Ca mit Aluminium ein Eutektikum bildet.

Einfluss des Gefüges auf die Leitfähigkeit.

In Fig. 11 sind 2 Kurven eingezeichnet. Die ausgezogene Kurve gibt Messungen an kaltgewalztem Material, die punktierte dagegen solche an gegossenem Material wieder. Wie ersichtlich, tritt mit steigendem Kalzium-Gehalt eine zunehmende Divergenz auf. Edwards und Taylor erkannten die Ursache dieser Divergenz im Gefügeunterschied des Materials.

Solche Unterschiede machen sich immer dann bemerkbar, wenn in einem zweiphasigen Gebilde die Kristallite der besserleitenden Phase durch Zwischenschichten der schlechter leitenden Phase getrennt sind. Dies ist bei nicht vollkommen reinen Metallen im Gusszustande die Regel, da die primär aus der Schmelze abgeschiedenen Kristalle der reinen Metalle durch nachträglich erstarrende eutektisch kristallisierende Verunreinigungen eingehüllt werden. Durch plastische Verformung bei der Verarbeitung zu Blech oder Draht wird der Zusammenhang dieser schlechter leitenden Zwischenschichten zerstört, wodurch eine Erhöhung der Leitfähigkeit erzielt wird. Bei technischem Reinaluminium von 99,45% Reingehalt mit 0,33% Eisen und 0,22% Silizium konnten folgende Leitfähigkeiten festgestellt werden:

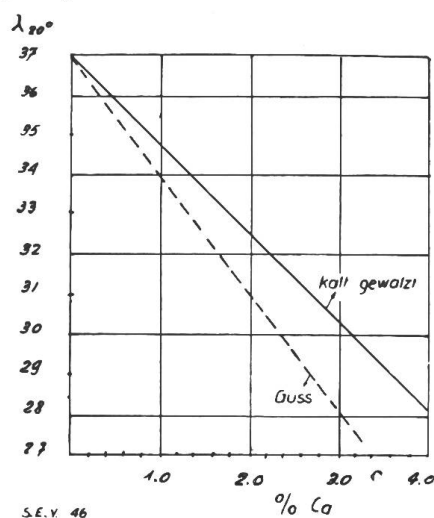


Fig. 11.
Abhängigkeit der Leitfähigkeit
vom Kalzium-Gehalt nach
Edwards & Taylor
Al 99,94%.

Zustand		Leitfähigkeit 20 m/Ω mm ²
Kokillenguss:		
Ohne Wärmebehandlung		32,8
3 × 24 Std. geglüht bei 300° C		33,5
1 mm-Blech:		
Kaltgewalzt		34,6
8 Std. geglüht bei 300° C		35,8
1 Std. geglüht bei 550° C		34,3

⁸⁾ J. D. Edwards and C. S. Taylor, „Electrical resistivity of Aluminium-Calcium-alloys“, Paper to be presented at the Fiftieth General Meeting of the American Electrochemical Society, Washington, October 1926.

Das ungünstige Gefüge des Gussmetalles bewirkt also auch in diesem Falle eine erhebliche Beeinträchtigung der Leitfähigkeit des Metalles.

Im Gegensatz zu dieser Beeinflussung scheint die Korngrösse (Kristallitengrösse) des Materials keinen bedeutenderen Einfluss auf seine Leitfähigkeit auszuüben.

Temperaturkoeffizient der Leitfähigkeit.

Der Temperaturkoeffizient der Leitfähigkeit 2 mm dicker Probedrähte von Handelsaluminium verschiedener Reinheit und Vorbehandlung wurde im Temperaturbereiche von 0–50° im Petrolbad bestimmt. Es ergab sich folgende Abhängigkeit desselben von der Leitfähigkeit des Materials.

Als Mittelwert für gutes Handelsaluminium kann 0,0039, für sehr reines Metall 0,0040 angenommen werden.

Einfluss der Kaltreckung⁹⁾ auf die Leitfähigkeit.

Dieser Einfluss äussert sich bei den meisten Metallen in einer geringen Erniedrigung der Leitfähigkeit¹⁰⁾. Es gibt jedoch auch Ausnahmen von dieser Regel.

Bei Aluminium lässt sich feststellen, dass der Betrag der Leitfähigkeitserniedrigung durch Kaltreckung verschieden ist, je nachdem, ob freies Silizium als Mischkristall vorhanden ist oder nicht. Sehr deutlich geht dies aus der nachstehenden Zusammenstellung hervor, in welcher für verschiedene Metallqualitäten und Reckgrade von 96% durch Ziehen die prozentuale Leitfähigkeitserniedrigung eingetragen ist.

Einfluss der Kaltreckung auf die Leitfähigkeit.

Metallzusammensetzung		Wärmebehandlung vor dem Ziehen	Reckgrad %	Leitfähigkeit vor dem Ziehen	20° m/Ω mm ² nach dem Ziehen	Erniedrigung %
% Fe	% Si					
0,33	0,13	8 Std. 300° C gegl.	96	36,5	35,9	1,64
		2 " 550° C "	96	35,2	34,7	1,42
0,69	0,14	8 " 300° C "	96	36,0	35,4	1,67
		2 " 550° C "	96	34,5	34,0	1,45
0,26	0,47	8 " 300° C "	96	36,3	35,7	1,65
		2 " 550° C "	96	32,5	32,1	1,23
0,29	0,84	8 " 300° C "	96	35,5	34,9	1,69
		2 " 550° C "	96	30,0	29,9	0,34

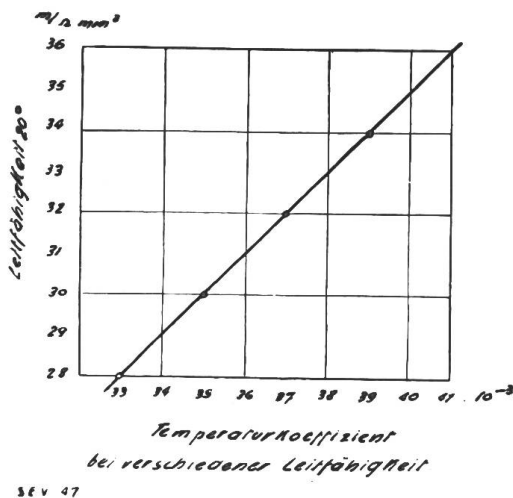


Fig. 12.

Bei vollständiger Abwesenheit von Silizium im Mischkristallzustand beträgt die Leitfähigkeitserniedrigung 1,6–1,7%. Mit zunehmendem Gehalt an Silizium-Mischkristall wird diese aber immer geringer, so dass unter Umständen sogar an Stelle einer Leitfähigkeitserniedrigung eine geringe Leitfähigkeitserhöhung treten kann. Die durch Kaltreckung bedingte Leitfähigkeitserniedrigung wird in diesen Fällen ganz oder teilweise durch einen zweiten Vorgang überdeckt, der darin besteht, dass der bei gewöhnlicher Temperatur übersättigte Al–Si-Mischkristall durch die Erwärmung beim Reckvorgang (Drahtziehen) eine Zersetzung unter Ausscheidung sehr fein verteilten Siliziums erfährt. Es zeigt sich nämlich,

⁹⁾ D. h. Ziehen von Draht im kalten Zustande.

¹⁰⁾ G. Tammann, Lehrbuch der Metallographie, 3. Auflage, 1923, Seite 145–154.

dass dieser Vorgang durch starke Kaltreckung in ganz ausserordentlicher Weise erleichtert und beschleunigt wird. Als Beispiel hierfür seien Messungen an einer Handelsaluminiumsorte mit 0,84% Silizium und 0,29% Eisen angeführt.

Vorbehandlung

Leitfähigkeit 20° C m/Ω mm

Geglüht bei 550° C und abgeschreckt	30,0
6 Std. angelassen bei 180° C	31,0
24 Std. angelassen bei 180° C	32,0
Nach dem Abschrecken 95% kaltgereckt	29,9
6 Std. angelassen bei 180° C	34,5
24 Std. angelassen bei 180° C	34,9
24 Std. geglüht bei 300° C	35,5

Die Geschwindigkeit der Entmischung der Al-Si-Mischkristalle, die im ersten Falle zu ihrer Vervollständigung bei 180° C mehrere Wochen benötigte, wird durch die 95% ige Kaltreckung auf etwa das 1000-fache erhöht. Da die Entfestigung gezogener Drähte durch Rekristallisation bei dieser Temperatur noch sehr gering ist, so gewinnt der Vorgang praktische Bedeutung für die Herstellung von Leitungsdräht mit hoher Festigkeit und guter Leitungsfähigkeit.

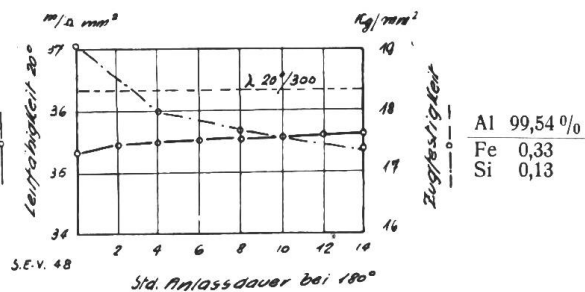


Fig. 13.

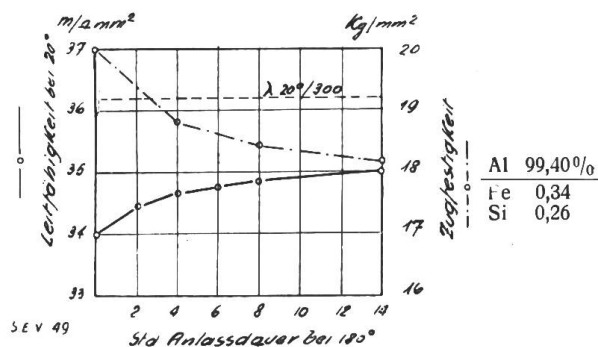


Fig. 14.

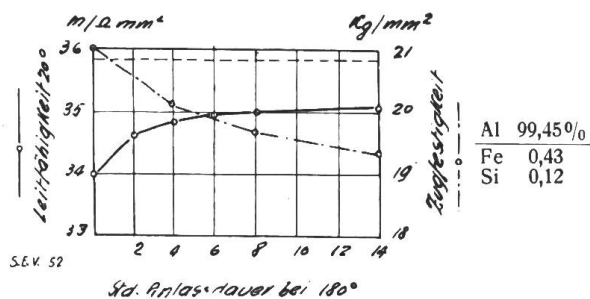


Fig. 15.

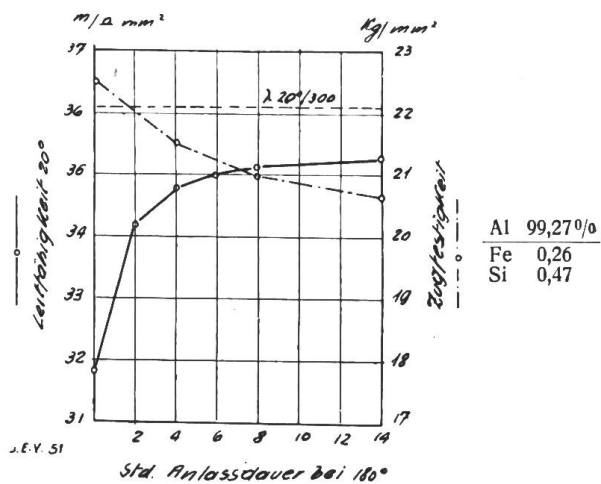


Fig. 16.

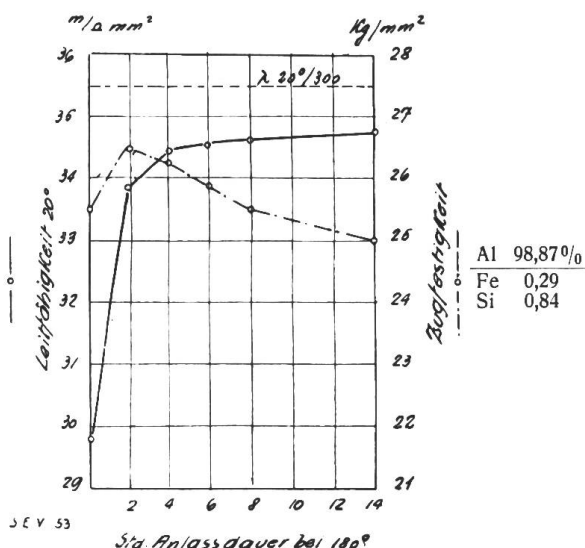


Fig. 18.

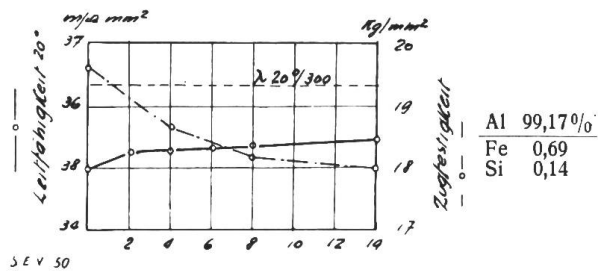


Fig. 17.

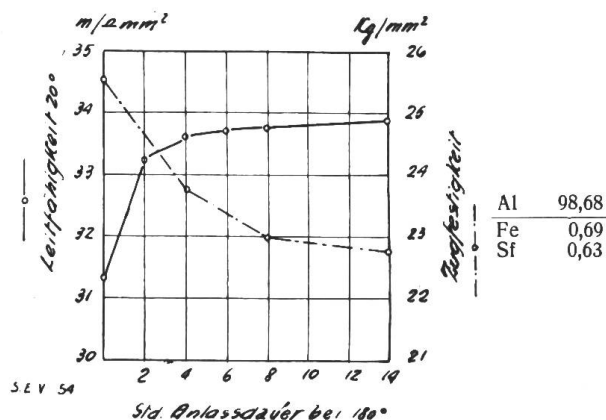


Fig. 19.

bei einer Leitfähigkeit von $34,5 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$ aufweist, also eine um ca. 30 % höhere Festigkeit als diejenige normaler hartgezogener Reinaluminiumdrähte.

Noch bedeutend höhere Effekte können nach diesem Verfahren erzielt werden, wenn an Stelle des Siliziums andere mit dem Aluminium mischkristallbildende Legierungskomponenten zulegiert werden, z. B. Kupfer oder noch besser *Magnesiumsilizid*. Auf diese Weise ist es gelungen, ein für Freileitungen hervorragend geeignetes Drahtmaterial herzustellen, welches bei einer Leitfähigkeit bei 20° C von $31 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$ eine mittlere Festigkeit von $33\text{--}34 \text{ kg}/\text{mm}^2$ und eine Bruchdehnung von $6\text{--}8\%$ aufweist. Dieses Material das unter der Bezeichnung „Drahtlegierung 3“ von der Aluminium-Industrie-A.-G. Neuhausen in den Handel gebracht wird, scheint berufen, Kupfer und Stahlaluminium aus dem Hochspannungs-Leitungsbau zu verdrängen.¹¹⁾

Selektivschutz von Hochspannungsnetzen.

Von J. Biermanns, Chefelektriker der AEG-Fabriken für Transformatoren und Hochspannungsmaterial, Berlin.

621.317.8 (005) + 621.317.4 (005).

Der Autor macht Mitteilungen über die Bedeutung des Ueberstromschutzes in Hochspannungsnetzen. Er bespricht die bisher gebräuchlichen Relais (Definitivzeit-Relais, abhängiges Ueberstromzeitrelais, Unterspannungszeitrelais) und erwähnt ihre Nachteile, um sodann ein neues Relais, das sog. Impedanz- oder Distanzrelais, in der von den Firmen Haefely, Basel und AEG Berlin entwickelten Form näher zu beschreiben. Die Auslösezeit dieses Relais ist proportional der Impedanz zwischen der Kurzschlussstelle und dem Aufstellungsort des Relais und praktisch unabhängig von der Kurzschlussstromstärke.

Der Autor sucht darauf an Hand einer Reihe von Beispielen nachzuweisen, dass das Relais den Anforderungen des Betriebes entspricht.

L'auteur parle d'abord de l'importance de la protection contre les surintensités dans les réseaux à haute tension. Il passe ensuite aux relais utilisés jusqu'ici (à temps fixe, à action différée suivant la surintensité ou la sous-tension) en signalant leurs inconvénients, puis il décrit un nouveau relai, dit relai d'impédance ou relai à distance, dans la forme que lui ont donnée la maison E. Haefely de Bâle et l'AEG de Berlin. Le temps de déclenchement de ce relai est proportionnel à l'impédance entre l'emplacement du relai et le court-circuit; il est pratiquement indépendant de l'intensité de court-circuit.

À l'aide d'une série d'exemples l'auteur cherche enfin à démontrer que le relai en question répond à toutes les exigences de l'exploitation.

Die Anwendung elektrischer Energie in den verschiedensten Wirtschaftszweigen hat in den letzten Jahren einen derartigen Umfang angenommen, dass heute die Elektrizitätswerke ein mitbestimmender Faktor im Wirtschaftsleben eines jeden

¹¹⁾ Legierter Aluminiumdraht „Drahtlegierung 3“ (Mitteilung der Aluminium-Industrie A.-G. Neuhausen) Schweiz. Bauzeitung 87, No. 26, 26. Juni 1926.