Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 14 (1923)
Heft: 8

Artikel: Erdungsfragen [Fortsetzung und Schluss]
Autor: Schiesser, M.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057589

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: 13.08.2025

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich,
im Januar dazu die Beilage „Jahresheft".

Alle den Inhalt des „Bulletin" betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat
des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins
Seefeldstrasse 301, Zürich 8 — Telephon: Hottingen 7320,
welches die Redaktion besorgt.

Alle Zuschriften betreffend **Abonnement, Expedition** und **Inserate** sind zu richten an den Verlag:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.
Stauffacherquai 36/38 Zürich 4 Telephon Selnau 7016

Ce bulletin paraît mensuellement. — „L'Annuaire" est distribué comme supplément dans le courant de janvier.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la **matière** du „Bulletin" au

Secrétariat général
de l'Association Suisse des Electriciens
Seefeldstrasse 301, Zurich 8 — Telephon: Hottingen 7320
qui s'occupe de la rédaction.

Toutes les correspondances concernant les **abonnements, l'expédition** et les **annonces**, doivent être adressées à l'éditeur

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Stauffacherquai 36/38 Zurich 4 Telephon Selnau 7016

Abonnementspreis (für Mitglieder des S. E. V. gratis)
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft:
Schweiz Fr. 20.—, Ausland Fr. 25.—
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 2.— plus Porto.

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A. S. E.), y compris l'Annuaire Fr. 20.—
pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 2.—, port en plus.

XIV. Jahrgang
XIVe Année

Bulletin No. 8

August
Août 1923

Erdungsfragen.[7])

Bericht, erstattet an die Kommission des S. E. V. und V. S. E. für die Revision der Bundesvorschriften von Oberingenieur *M. Schiesser*, Baden.

(Fortsetzung und Schluss.)

Nachdem der Autor im ersten Teil dieser Arbeit über die Beanspruchung der Erdungsanlagen bei verschiedenen Betriebsfällen, über Unfälle, die mit der Erdung von Anlagen zusammenhängen und über die Vor- und Nachteile zusammen oder getrennt verlegter Erdelektroden berichtet hat, bespricht er in diesem Teil Versuche an verschiedenen Erdelektroden und in verschiedenem Erdboden, die ergeben haben, dass die zweckmässigste Erdelektrode die Bandelektrode ist. Er macht darauf Vorschläge für die Ausführung von Erdungsanlagen.

Dans la 1re partie de son article l'auteur avait parlé des différences de tension entre électrodes de terre et la terre située dans leur voisinage, et des inconvénients et avantages de l'emploi d'électrodes multiples.

Il rend compte dans la 2me partie de diverses expériences qui ont démontré que les meilleures électrodes sont celles constituées par des rubans.

Il indique pour différents cas les meilleures dispositions à adopter.

7. Messungen an Erdelektroden in verschiedenem Erdreich.

Den Kommissionsmitgliedern der „Gruppe a" wurden eine Anzahl eingehender Versuchsberichte über Versuche mit Erdelektroden, die bei der A.-G. Brown, Boveri & Cie. ausgeführt wurden, zugestellt. Es soll daher auf die Details dieser Versuche hier nicht mehr eingetreten werden und nur noch ein kurzer Ueberblick daraus erfolgen.

In erster Linie ist darauf hinzuweisen, dass die zuletzt herausgekommenen Versuchsberichte in einigen, wenn auch nicht sehr wesentlichen Punkten, etwas andere Schlussfolgerungen ergaben als die ersten. Dies ist durch die im Verlaufe der Versuche gemachten Erfahrungen begründet. So ist z. B. im Versuchsbericht MFVL

[7]) *Berichtigung* des vorletzten Absatzes des ersten Teiles auf Seite 389 (Bulletin 1923, No. 7) dieser Arbeit: statt „Vereinigung der Hoch- und Niederspannung und der Betriebserdung der Hochspannungsseite . . ." soll es heissen: „Vereinigung der *Schutzerdung* von Hoch- und Niederspannung und der Betriebserdung der Hochspannungsseite . . .".

21/229 der grosse Vorteil des Einbettens der Elektroden in Holzkohle in bezug auf die Wärmekapazität hervorgehoben worden. Nach dem Ausgraben dieser Elektroden (die Elektroden lagen ca. 2 Jahre im Boden) hat sich, wie zu erwarten war, gezeigt, dass die Kohle sehr ungünstig wirkt wegen den Anfressungen und dass daher von diesem Mittel nur im Notfalle Gebrauch gemacht werden sollte.

Definition des Erdwiderstandes. Ein wichtiger Punkt dieses Abschnittes über Messungen an Erdelektroden ist die Begriffsbestimmung des Erdwiderstandes. Eine befriedigende Definition ist darüber bis heute nicht bekannt und jedenfalls auch nicht leicht zu finden.[8]) Nach Ansicht des Berichterstatters wäre es für die Beurteilung einer Erdung am interessantesten, den Widerstand als die Spannungsdifferenz

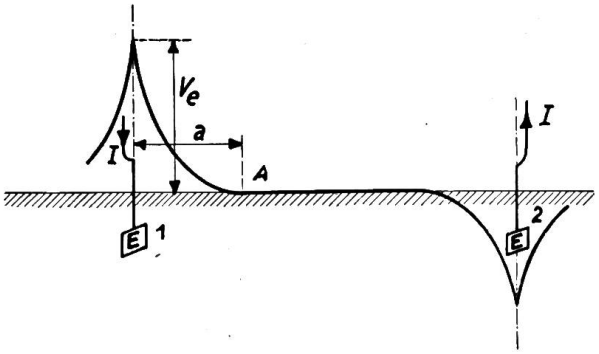

Fig. 12

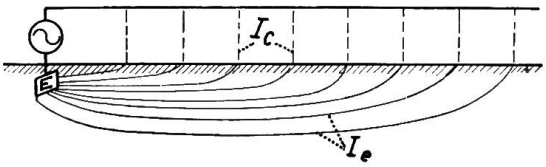

Fig. 13

I_c = Verschiebungsstrom, I_e = Erdstrom.

an der Erdoberfläche zwischen Einführungsdraht und einer einheitlich festzusetzenden Distanz (z. B. 1 m, d. h. ca. Hand- oder Fussreichweite) bei einem einheitlichen Strom (z. B. 100 oder 1000 Ampere) anzugeben. Diese Ausdrucksweise dürfte aber für die Praxis recht unbequem sein. Wir schlagen daher, in Anlehnung an die heutige Praxis, folgende Definition vor:

Betrachtet man den Spannungsverlauf an der Erdoberfläche auf den Verbindungsgeraden zwischen zwei Erdelektroden, durch die der Strom I fliesst, so erhält man stets einen Zustand, wie ihn Fig. 12 zeigt.

Lässt man eine der Erdelektroden unverändert und misst die Spannungsverteilung bei gleicher Strombelastung gegenüber verschiedenen Erdelektroden in verschiedenen Entfernungen von der ersten, so beobachtet man, dass die Spannungsverhältnisse sich mit der Entfernung der Erdelektroden von einander stark ändern, solange diese Entfernung klein ist; wird die Entfernung aber grösser als ca. 20 m, so ist ihre Veränderung um die unveränderte Erdelektrode nicht mehr messbar.

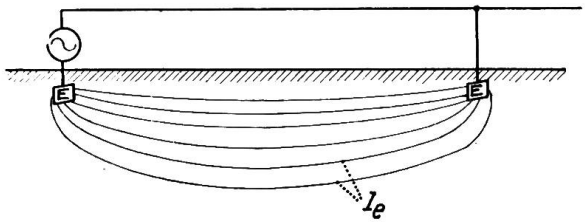

Fig. 14

I_e = Erdstrom.

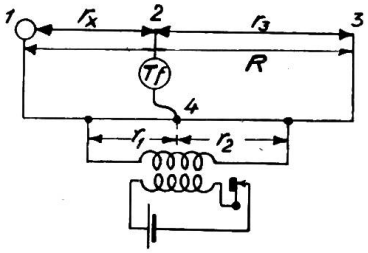

Fig. 15

Eine Erdelektrode kann in zwei verschiedenen Schaltungen in Betrieb kommen:

1. Einfacher Erdschluss: Der durchgehende Strom ist ein reiner Kapazitätsstrom (siehe Fig. 13):

2. Doppelter Erdschluss: Der durchgehende Strom ist Leistungsstrom (siehe Fig. 14):

Beim doppelten Erdschluss haben praktisch nur diejenigen Fälle Interesse, bei denen der Elektrodenabstand relativ gross ist. Für den einfachen Erdschluss gelten ähnliche Verhältnisse; denn der Ladestrom, welcher auf die ersten hundert Meter

[8]) Vergl. auch V. D. E.-Errichtungsvorschriften und „Ground connections for electrical systems by O. S. Peters", Seite 7.

einer Leitung entfällt, ist fast immer ein verschwindend kleiner Teil des Gesamtladestromes.

Daher wird folgende *Definition* vorgeschlagen:

Unter dem „Widerstand einer Erdelektrode" wird das Verhältnis

$$\frac{V_e}{I}$$

verstanden, wobei V_e die Spannungsdifferenz, gemessen zwischen der Elektrodeneinführung und einem Punkt A, der allseitig von der Erdelektrode theoretisch unendlich, praktisch mindestens 20 m entfernt ist, und I der Strom, der durch die Erdelektrode in den Boden eintritt. Bei Bandelektroden von geschlossener Form ist zu beachten, dass der Messpunkt A ausserhalb der Elektrode liege.

Messung der Elektrodenwiderstände. Es wurden die folgenden drei Messmethoden angewendet; die Resultate haben die Gleichwertigkeit derselben erwiesen.

1. Die generelle Messung der Erdwiderstände wurde nach der Nippoldtschen Methode durchgeführt unter Verwendung der Nippoldtschen Telephonmessbrücke von Hartmann & Braun. Dabei wird von 3 zu bestimmenden Widerständen, z. B. r_1, r_2, r_3, gemessen ($r_1 + r_2$, $r_2 + r_3$, $r_3 + r_1$) und daraus die gesuchten Werte berechnet.

2. (Siehe Fig. 15.) Zur Bestimmung der Spannungsverteilung in der Umgebung der Erdelektrode (1) diente die Wiechertsche Methode [9]). Dabei handelt es sich auch um eine Brückenmethode, aber mit einer festliegenden Hilfselektrode (3) und einer versetzbaren Elektrode (2), die als Erdkontakt bezeichnet wird und deren Widerstand ausser Betracht fällt. Die Art der Messung ist folgende:

R wird vorerst bestimmt z. B. mit der Nippoldschen Telephonmessbrücke, dann gilt:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_x}{r_3} \text{ und } R = r_x + r_3; \quad \text{daraus } r_3 = r_x \frac{r_2}{r_1} \text{ und } r_x = R \frac{1}{1 + \frac{r_2}{r_1}}$$

Dies gilt für den Fall, dass der Ton im Telephon ein Minimum geworden ist; wir haben dann in den Punkten 2 und 4 Stellen gleicher Spannung vor uns, das Telephon durchfliesst kein Strom; somit ist der Widerstand des Erdkontaktes 2 ohne Einfluss auf die Messung. Da wir unsere Messung auf die Uebereinstimmung der Verhältnisse von Spannungsabfällen aufbauen, bezeichnen wir die gemessenen Werte mit Volt/100 Ampere. Als Hilfselektrode diente gewöhnlich die Wasserleitung; zuerst wurde an einer Stelle eine kombinierte Erdelektrode aus einem kurzen Stück Fabrikgeleise plus Erdpfahl verwendet, doch war ihr Widerstand sehr gross ($R = 350$ statt 15 Ohm).

3. Die Strom- und Spannungsmessungen wurden so durchgeführt, dass man je zwei von einer Gruppe von 3 Erdelektroden an eine Wechselstromleitung legte, den durchgehenden Strom mass und die Spannung zwischen den beiden Elektroden bestimmte. Dann gilt:

$$(r_1 + r_2) = \frac{V_{12}}{I_{12}}; \quad (r_2 + r_3) = \frac{V_{23}}{I_{23}} \text{ und } (r_3 + r_1) = \frac{V_{31}}{I_{31}}$$

woraus r_1, r_2, r_3 zu berechnen sind.

Einfluss der Elektrodenform und Bodenbeschaffenheit. Vergleichsversuche an Elektroden verschiedener Form in verschiedenem Erdreich bei möglichst gleicher Oberfläche von ca. 1 m² Oberfläche ergaben folgende Resultate:

a) Im Kiesboden:

Kupferplatte 700 × 700 × 1 mm mit Humusschicht umgeben .	ca. 100 – 163 Ohm
Kupferplatte 700 × 700 × 1 mm mit Holzkohle umgeben . .	ca. 154 – 264 Ohm
Kupferband 2 × 25 mm × 18,2 m mit Humusschicht umgeben	ca. 25 – 61 Ohm

[9]) E. T. Z. 1893, Band XIV, Seite 726.

b) In vollständig homogenem Lehmboden:

Kupferplatte 700 × 700 × 1 mm in Holzkohlebettung . . .	ca. 10,6 – 16,6 Ohm
Kupferband 2 × 25 mm × 18,2 m (ausgestreckt verlegt) . . .	ca. 3,25 – 5 Ohm
3 Eisenrohre 2″ engl. je 2 m lang und auf ganzer Länge im Erdreich und in den Eckpunkten eines gleichseitigen Dreiecks von 2 m Seitenlänge angeordnet	ca. 4,5 – 7 Ohm

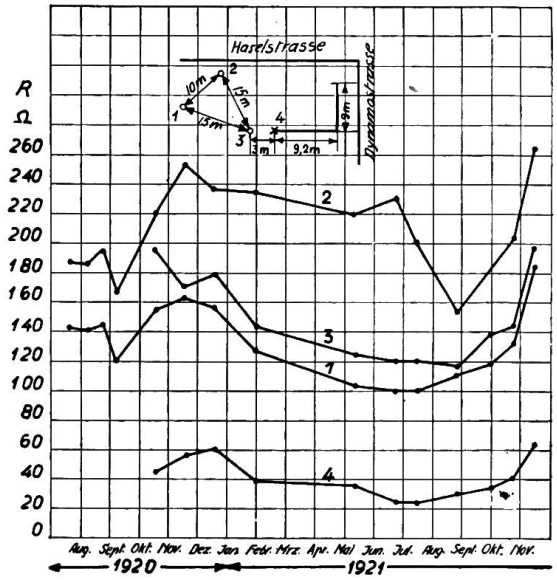

Fig. 16

Periodische Widerstandsmessungen an verschiedenartigen Erdelektroden in Kiesboden.

1 Plattenelektrode, vertikal in Humusbettung.
2 Plattenelektrode, vertikal in Holzkohlebettung.
3 Plattenelektrode, horizontal in Holzkohlebettung.
4 Bandelektrode in Humusbettung.

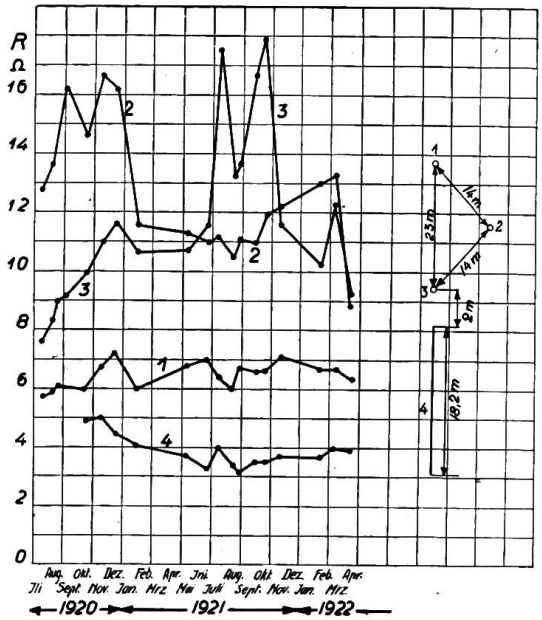

Fig. 17

Periodische Widerstandsmessungen an verschiedenartigen Erdelektroden in Lehmboden.

1 Plattenelektrode, vertikal in Holzkohlebettung.
2 Plattenelektrode, horizontal in Holzkohlebettung.
3 Plattenelektrode, vertikal in Humusbettung.
4 Bandelektrode, in Humusbettung.

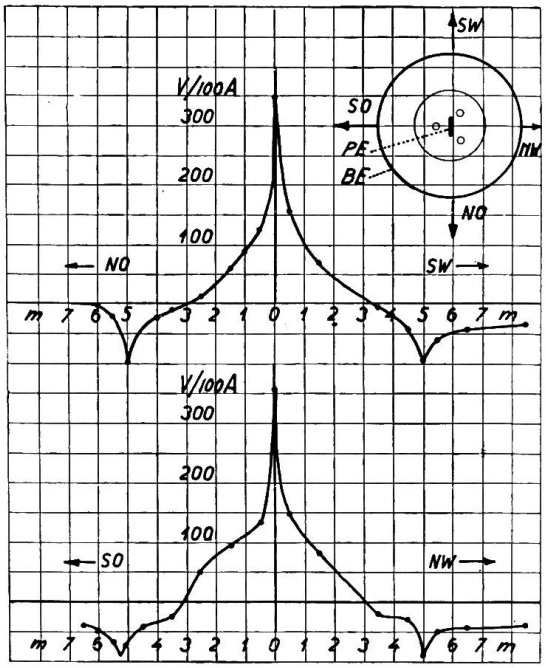

Fig. 18

Spannungsverteilung zwischen Plattenelektrode und äusserer Bandelektrode. Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.
PE = Plattenelektrode, *BE* = Bandelektrode.

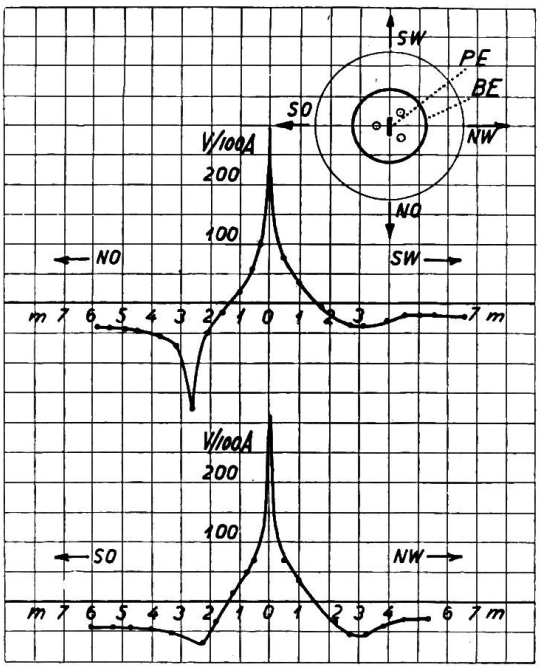

Fig. 19

Spannungsverteilung zwischen Plattenelektrode und innerer Bandelektrode. Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.
PE = Plattenelektrode. *BE* = Bandelektrode.

Die beste Elektrodenform ist somit die Bandelektrode, dann folgt die Rohrelektrode und dann die Plattenelektrode.

Nach unseren Versuchen in ganz homogenem Lehmboden nimmt der Widerstand ca. proportional mit der Bandlänge ab. Nach den Versuchen von S. O. Peters trifft dies nicht zu, vermutlich infolge von unhomogenem Erdreich.

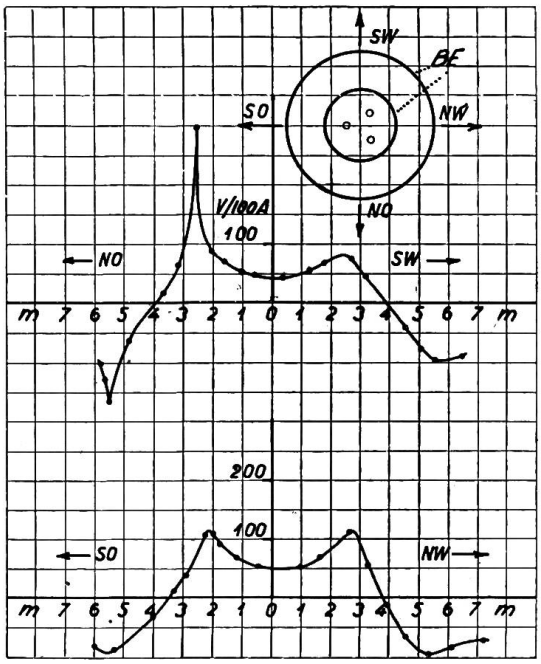

Fig. 20

Spannungsverteilung zwischen innerer und äusserer Bandelektrode. Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.
BE = Bandelektrode.

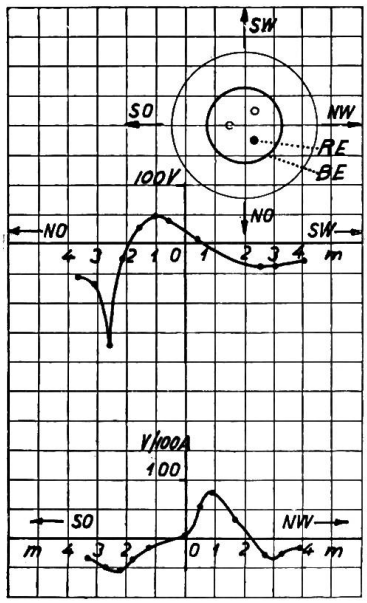

Fig. 21

Spannungsverteilung zwischen einer Rohrelektrode und der inneren Bandelektrode. Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.
RE = Rohrelektrode. *BE* = Bandelektrode.

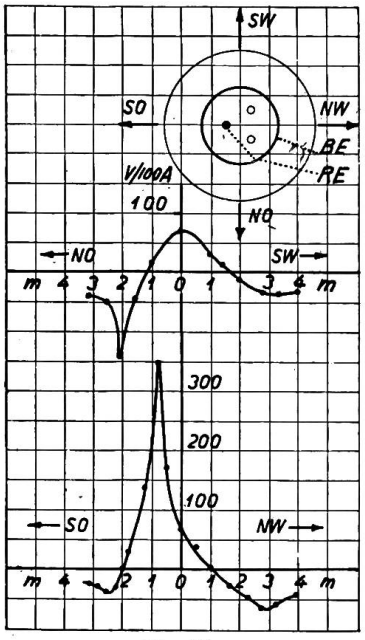

Fig. 22

Spannungsverteilung zwischen einer Rohrelektrode und der inneren Bandelektrode. Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.
RE = Rohrelektrode.
BE = Bandelektrode.

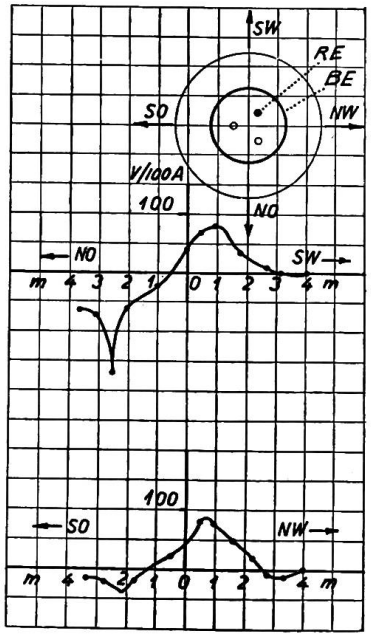

Fig. 23

Spannungsverteilung zwischen einer Rohrelektrode und der inneren Bandelektrode. Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.
RE = Rohrelektrode.
BE = Bandelektrode.

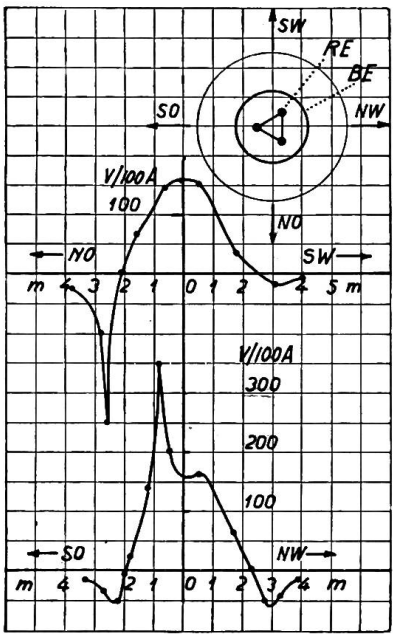

Fig. 24

Spannungsverteilung zwischen den drei Rohrelektroden und der inneren Bandelektrode. Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.
RE = Rohrelektrode.
BE = Bandelektrode.

Für Rohrelektroden nimmt der Widerstand ca. proportional mit der Anzahl der verwendeten Rohre ab, wenn dieselben mindestens 2 m voneinander entfernt eingeschlagen werden. Nach S. O. Peters ist die günstigste Länge der Rohre ca. 2 m.

Das günstigste Erdreich ist der Lehmboden; dann kommt Humusboden, dann Sand, dann Kies, dann fliessendes Wasser.

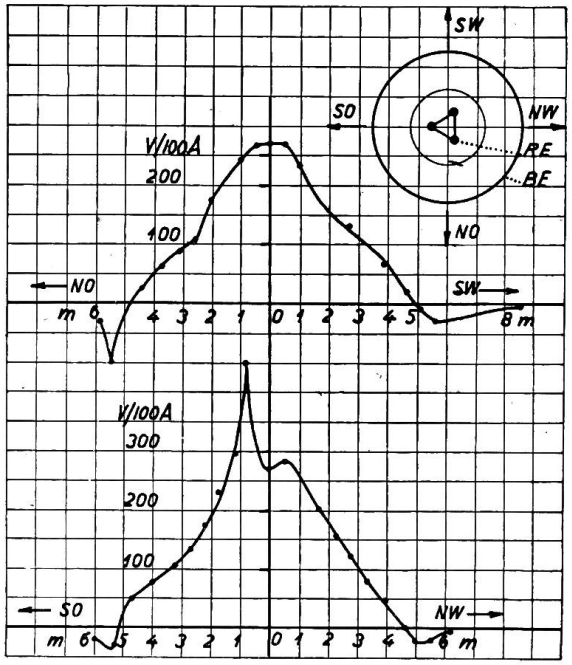

Fig. 25

Spannungsverteilung zwischen den drei Rohrelektroden und der äusseren Bandelektrode. Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.

RE = Rohrelektrode. *BE* = Bandelektrode.

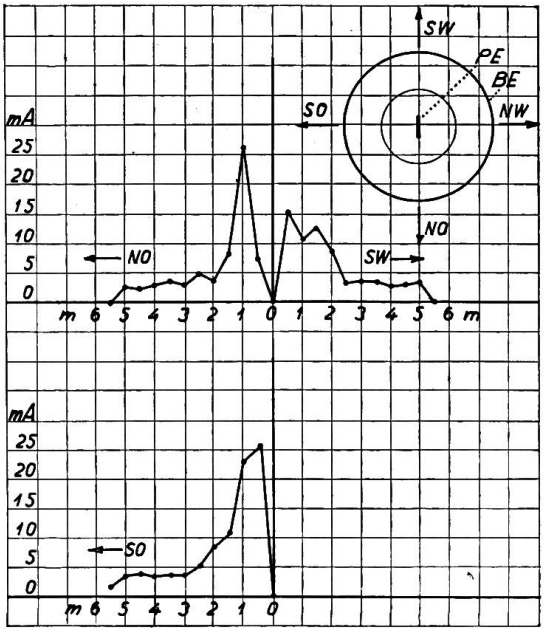

Fig. 27

Verlauf der Schrittstromstärke bei Belastung zwischen Plattenelektrode in Kohlebettung und äusserer Bandelektrode. Belastung der Elektroden während den Versuchen konstant 100 Ampere bei Annahme eines Widerstandes R_m des menschlichen Körpers zwischen Fuss-Fuss von 200 Ohm unter Voraussetzung eines mittleren Körpergewichts.

EP = Plattenelektrode. *BE* = Bandelektrode.

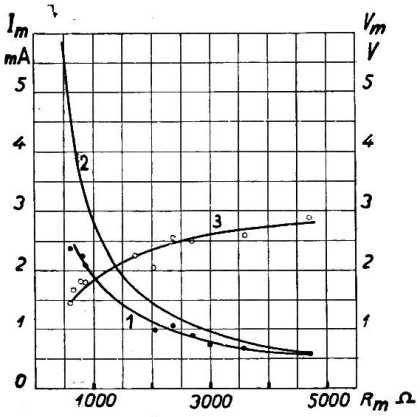

Fig. 26

Abhängigkeit der Schrittspannung und Schrittstromstärke von verschiedenen Werten R_m des menschlichen Widerstandes Fuss-Fuss bei einem mittleren Körpergewicht.

Kurve 1: Messung von I_m in Funktion von R_m.

Kurve 2: Berechnung von I_m in Funktion von R_m unter der Voraussetzung, dass die Spannungsverteilung im Boden vom Widerstand R_m unabhängig ist.

Kurve 3: Verlauf der Spannung V_m (Spannung zwischen den Fussblechen) in Funktion von R_m.
Während der ganzen Messung wurde der Strom zwischen den Hauptelektroden (Plattenelektrode in Kohlebettung, äusserer Bandelektrode) konstant gehalten. Belastung der Elektroden während den Versuchen konstant 100 Ampere.

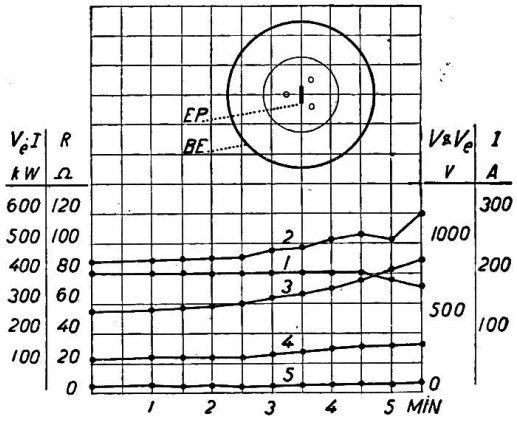

Fig. 28

Belastungsversuch zwischen Plattenelektrode ohne Kohlebettung und äusserer Bandelektrode. Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.

EP = Plattenelektrode. *BE* = Bandelektrode.

Kurve 1: Strom I zwischen Plattenelektrode und äusserer Bandelektrode.

Kurve 2: Spannung V zwischen Plattenelektrode und äusserer Bandelektrode.

Kurve 3: Spannung V_e zwischen Plattenelektrode und einer Hilfselektrode in 1 m Entfernung von ersterer.

Kurve 4: An der Plattenelektrode verbrauchte Leistung, d. h. Produkt $I \cdot V_e$.

Kurve 5: Widerstand R zwischen Plattenelektrode und äusserer Bandelektrode.

Bei gleicher Elektrodenform und den Widerstand im Lehmboden als 1 angenommen, ergeben sich für verschiedenes Erdreich ca. folgende Verhältniszahlen:

Lehm	Humus	Sand	Kies	Wasser
1	2	3	10	eher grösser als 10

Aus dieser Zusammenstellung ist auch zu ersehen, dass vom Verlegen von künstlichen Erdelektroden direkt im fliessenden Wasser unbedingt abgesehen werden soll. Dies ist dadurch verständlich, dass das Erdreich infolge seiner Salze meistens eine viel bessere Leitfähigkeit hat als das Wasser.

In Uebereinstimmung mit den Versuchen von S. O. Peters ergaben horizontal und vertikal verlegte Erdplatten keine nennenswerte Unterschiede.

Bei unseren Versuchen war die Oberkante der Platte bei der Vertikalverlegung ca. 1 m und bei der Horizontalverlegung ca. 1,3 m unter der Erdoberfläche.

Die Bandelektrode ist nach den Versuchen von S. O. Peters in leitendem Erdreich mit ca. 60 bis 90 cm tief genug verlegt und bringt Tieferlegung keinen Gewinn mehr.

Einfluss der Witterung. (Vergl. Fig. 16 und Fig. 17). Hier kommen die Einflüsse von Niederschlägen und Temperatur in Frage. Ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur lässt sich aus den Messwerten nicht feststellen, da die Widerstandsänderungen an verschiedenen Elektroden nicht selten in entgegengesetzter Richtung verlaufen. Immerhin lässt sich den gewonnenen Daten entnehmen, dass für die kältere Jahreszeit höhere und für die wärmere niedrigere Widerstandswerte zu erwarten sind. In den vorstehend unter *a* und *b*, Seite 411 und 412, angegebenen Zahlenwerten sind die max. Abweichungen infolge Witterungseinflüssen für die Widerstände verschiedener Elektroden in verschiedenem Erdreich der während ca. 2 Jahren gemachten Beobachtungen angegeben.

Die Spannungsverteilung. (Siehe Fig. 18 und 25.) Die Anordnung der Erdelektroden, die untersucht wurden, ist aus Fig. 18 ersichtlich. Die beiden grossen Kreise deuten darin zwei Bandelektroden an, die ringförmig verlegt wurden. Die drei kleinen Kreise, in einem gleichseitigen Dreieck angeordnet, entsprechen drei senkrechten, in den Boden eingetriebenen Rohrerdern und der kräftige Strich in der Mitte einer Plattenelektrode.

Zur Aufnahme der Spannungsverteilung der zu untersuchenden Elektroden wurden in den Richtungen SW – NO bezw. SO – NW in Abständen von je 0,5 m kleine Hilfselektroden aus Kupfer von 8 mm Durchmesser ca. 15 cm tief in den Boden gesteckt und die Spannungsdifferenz zwischen diesen und der Erdplatte gemessen. Die Form der Spannungsverteilung ist im wesentlichen immer wie in Fig. 1a angegeben. In fast allen Fällen entfallen auf den ersten Meter von der Elektrodeneinführung ca. 80 % und mehr der totalen Spannungsdifferenz, somit ist diese Stelle immer sehr gefährlich.

Aus den Messungen an den Bandelektroden (Fig. 20) ergibt sich die natürliche Tatsache, dass es zweckmässig ist, die Elektrodenzuführungen möglichst unterirdisch vorzunehmen. Dadurch wird das grosse Gefälle an der Erdoberfläche ganz wesentlich reduziert und damit die Gefahr an diesem Orte.

Messung der Schrittstromstärke. Unter der Schrittstromstärke versteht man die Stromstärke, welche den Körper eines Menschen von Fuss zu Fuss durchfliesst, wenn er auf einem Boden steht, dessen Oberfläche ein gewisses Spannungsgefälle hat und dessen Füsse den normalen Schrittabstand von ca. 80 cm haben. Es interessiert hier, an jeder Stelle des Erdbodens die Schrittstromstärke durch den Menschen zu kennen, wenn er sich in Richtung der grössten Spannungsdifferenz bewegt. Die Versuchseinrichtungen sind aus dem Versuchsbericht MFVL 21/229 zu entnehmen, aus welchem auch die Schrittstromstärke in Abhängigkeit des Druckes auf die Füsse und eines veränderlich angenommenen Widerstandes Fuss – Fuss zu ersehen sind. (Vergl. auch Fig. 26 und 27.) Versuche zeigen, dass schon bei relativ kleinen Beanspruchungen der Erdelektroden (bereits über 100 Ampere) die Spannungsdifferenzen

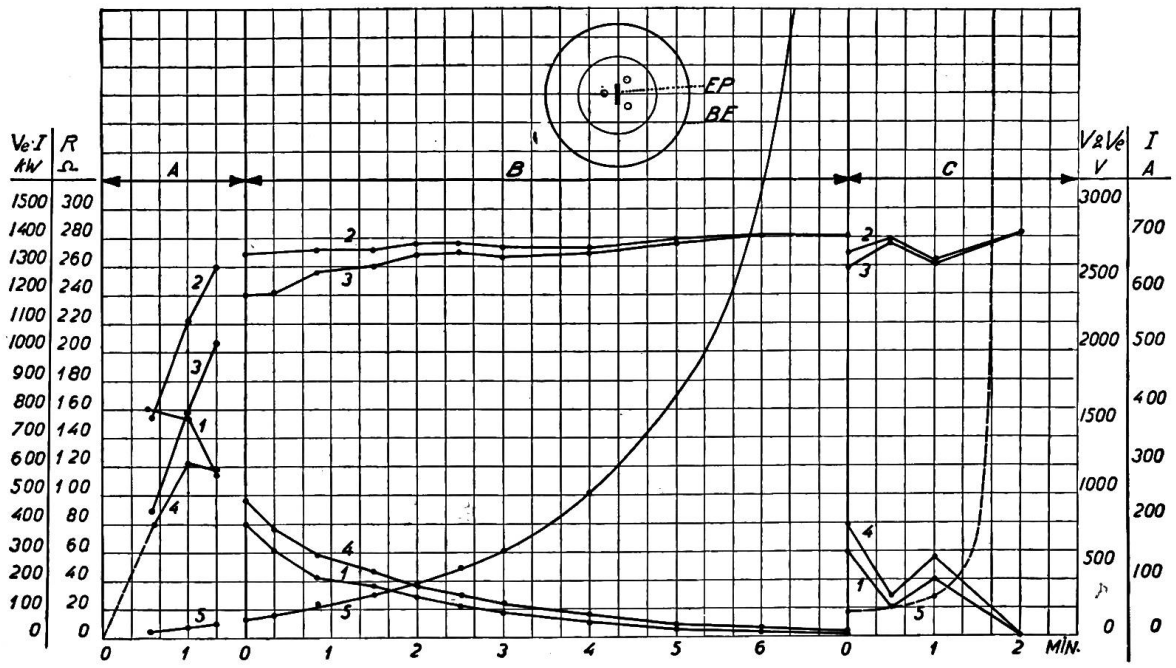

Fig. 29

Belastungsversuche zwischen Plattenelektrode ohne Kohlebettung und äusserer Bandelektrode.
EP = Plattenelektrode, *BE* = Bandelektrode.

Kurve 1: Strom *I* zwischen Plattenelektrode und äusserer Bandelektrode.
" 2: Spannung *V* zwischen Plattenelektrode und äusserer Bandelektrode.
" 3: Spannung V_e zwischen Plattenelektrode und einer Hilfselektrode in 1 m Entfernung von ersterer.
" 4: An der Plattenelektrode verbrauchte Leistung, d. h. Produkt $I \cdot V_e$.
" 5: Widerstand *R* zwischen Plattenelektrode und äusserer Bandelektrode.

Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.

Zeit zwischen Versuch *A* und *B*: ca. 5 Minuten. Zeit zwischen Versuch *B* und *C*: 15 Minuten.

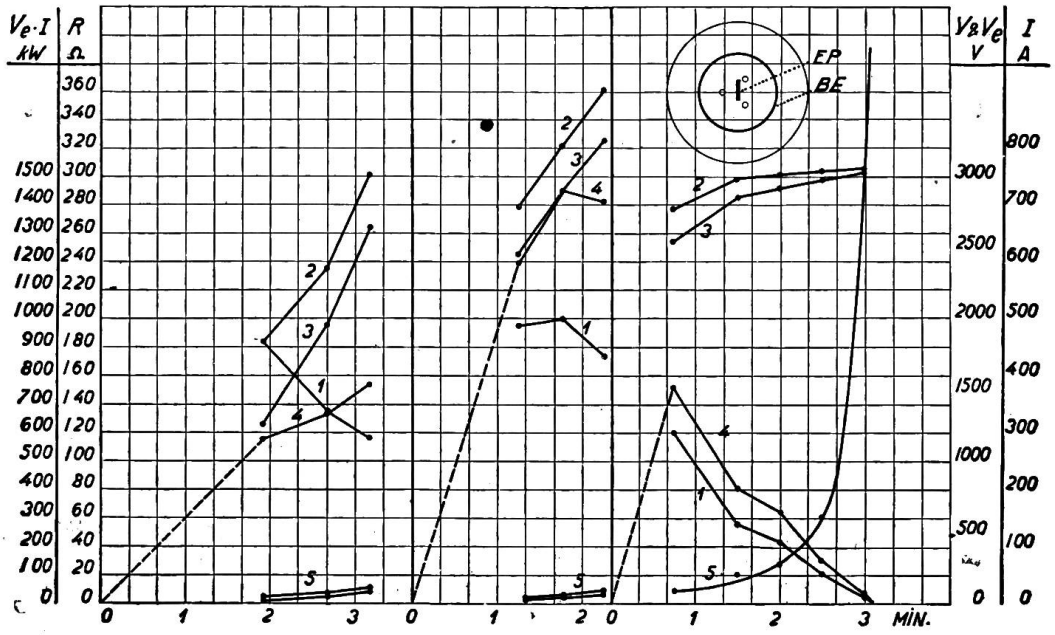

Fig. 30

Belastungsversuche zwischen Plattenelektrode ohne Kohlebettung und innerer Bandelektrode.
EP = Plattenelektrode. *BE* = Bandelektrode.

Kurve 1: Strom *I* zwischen Plattenelektrode und innerer Bandelektrode.
" 2: Spannung *V* zwischen Plattenelektrode und innerer Bandelektrode.
" 3: Spannung V_e zwischen Plattenelektrode und einer Hilfselektrode in 1 m Entfernung von ersterer.
" 4: An der Plattenelektrode verbrauchte Leistung, d. h. Produkt $I \cdot V_e$.
" 5: Widerstand *R* zwischen Plattenelektrode und innerer Bandelektrode.

Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.

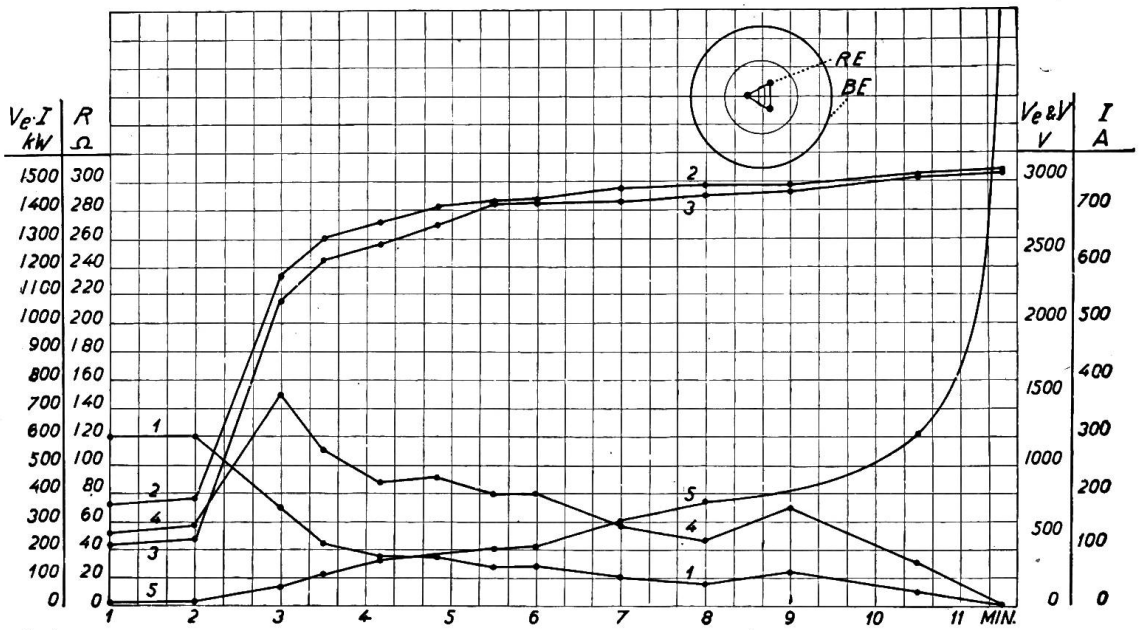

Fig. 31

Belastungsversuch zwischen den Rohrelektroden und der äusseren Bandelektrode.
RE = Rohrelektroden. *BE* = Bandelektrode.

Kurve 1: Strom *I* zwischen Rohrelektroden und äusserer Bandelektrode.
" 2: Spannung *V* zwischen Rohrelektroden und äusserer Bandelektrode.
" 3: Spannung V_e zwischen Rohrelektroden und einer Hilfselektrode in 1 m Entfernung von einer Rohrelektrode.
" 4: An den Rohrelektroden verbrauchte Leistung, d. h. Produkt $I \cdot V_e$.
" 5: Widerstand *R* zwischen Rohrelektroden und äusserer Bandelektrode.

Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.

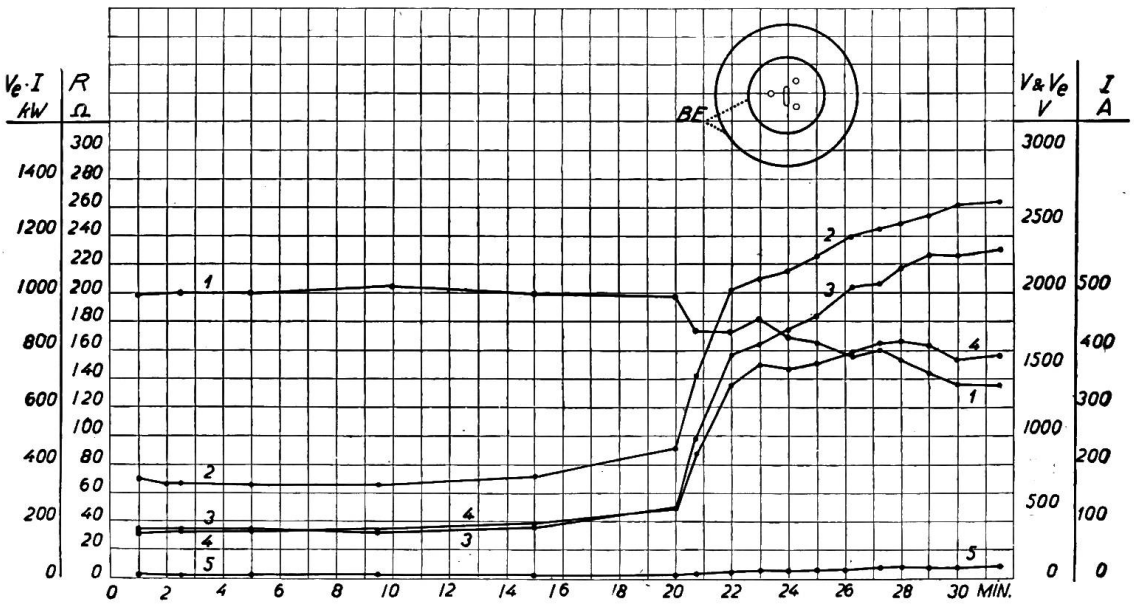

Fig. 32

Belastungsversuch zwischen innerer und äusserer Bandelektrode.
BE = Bandelektroden.

Kurve 1: Strom *I* zwischen innerer und äusserer Bandelektrode.
" 2: Spannung *V* zwischen innerer und äusserer Bandelektrode.
" 3: Spannung V_e zwischen innerer Bandelektrode und einer Hilfselektrode in 1 m Entfernung von ersterer.
" 4: An der inneren Bandelektrode verbrauchte Leistung, d. h. Produkt $I \cdot V_e$.
" 5: Widerstand *R* zwischen innerer und äusserer Bandelektrode.

Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.

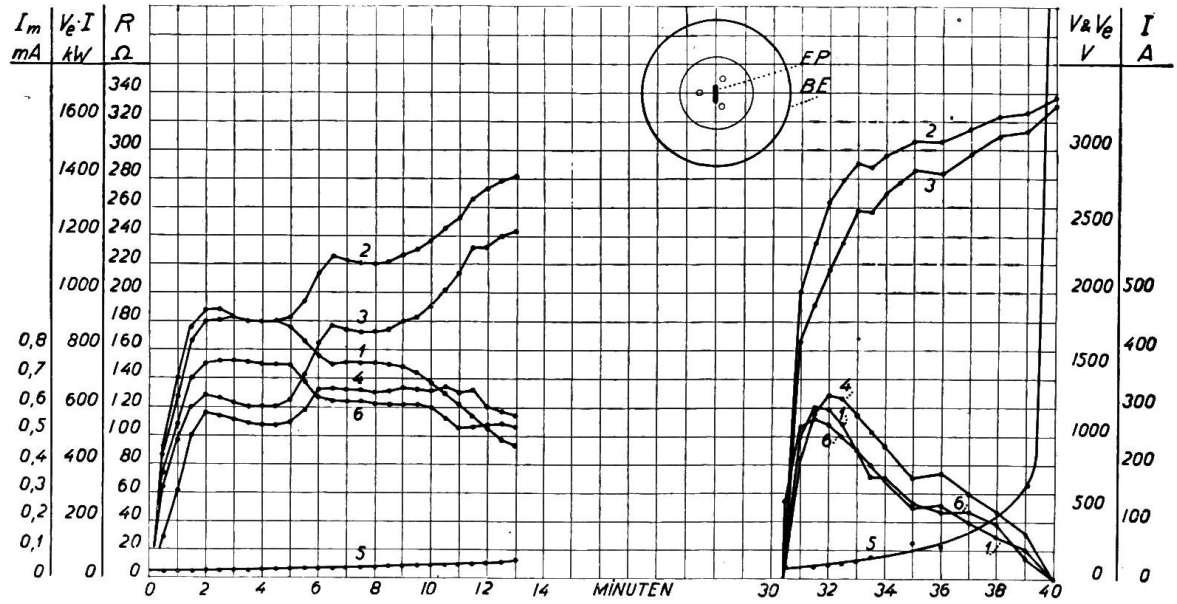

Fig. 33

Belastungsversuche zwischen Plattenelektrode in Kohlebettung und äusserer Bandelektrode.
EP = Plattenelektrode. *BE* = Bandelektrode.

Kurve 1: Strom *I* zwischen Plattenelektrode in Kohlebettung und äusserer Bandelektrode.
" 2: Spannung *V* zwischen Plattenelektrode in Kohlebettung und äusserer Bandelektrode.
" 3: Spannung V_e zwischen Plattenelektrode in Kohlebettung und einer Hilfselektrode in 1 m Entfernung von ersterer.
" 4: An der Plattenelektrode verbrauchte Leistung, d.h. Produkt $I \cdot V_e$.
" 5: Widerstand *R* zwischen Plattenelektrode und äusserer Bandelektrode.
" 6: Schrittstrom I_m an einer Stelle in 2,5 m Entfernung von der Plattenelektrode (Widerstand des Menschen R_m = 2000 Ω).

Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.

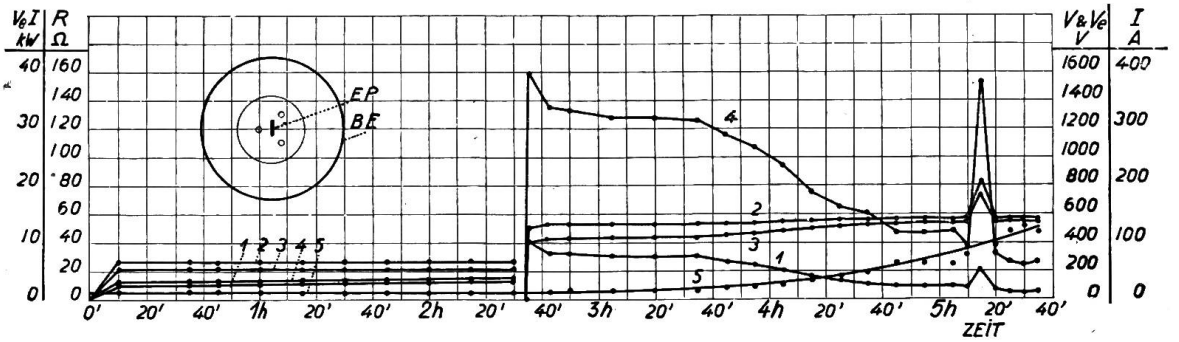

Fig. 34

Belastungsversuch zwischen Plattenelektrode in Kohlebettung und äusserer Bandelektrode.
EP = Plattenelektrode. *BE* = Bandelektrode.

Kurve 1: Strom 1 zwischen Plattenelektrode in Kohlebettung und äusserer Bandelektrode.
" 2: Spannung *V* zwischen Plattenelektrode in Kohlebettung und äusserer Bandelektrode.
" 3: Spannung V_e zwischen Plattenelektrode in Kohlebettung und einer Hilfselektrode in 1 m Entfernung von ersterer.
" 4: An der Plattenelektrode verbrauchte Leistung, d.h. $V_e \cdot I$.
" 5: Widerstand *R* zwischen Plattenelektrode und äusserer Bandelektrode.

Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.

in der Nähe der Elektroden so gross werden, dass die Schrittstromstärke über 0,02 Ampere, d. h. über den höchst zulässigen Grenzwert ansteigt. Fig. 27 zeigt auch die Nützlichkeit der unterirdisch verlegten Zuleitung zur Bandelektrode.

Verhalten der Erdelektroden bei Dauerbelastung. Der über die Erdelektrode fliessende Strom erzeugt in der Elektrodenumgebung Wärme. Da die Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens sehr klein ist, ist die Wärmeableitung gering, infolgedessen wird das Wasser in der Umgebung der Elektrode bei längerer Belastung verdampft. Dadurch steigt der elektrische Widerstand der Erdelektrode an, bei genügend langer Belastungsdauer wird dieselbe im Erdboden vollständig isoliert.

Es war daher interessant, auch über diesen Punkt durch Versuche Aufschluss zu erhalten. Besonders heute, wo in Anlagen bis zu ca. 70 bis 80 kV häufig Löschspulen verwendet werden, werden Erdelektroden, in Ausnützung dieses Vorteiles der Löschspulen, oft bei einem einpoligen Erdschluss stundenlang, allerdings mit

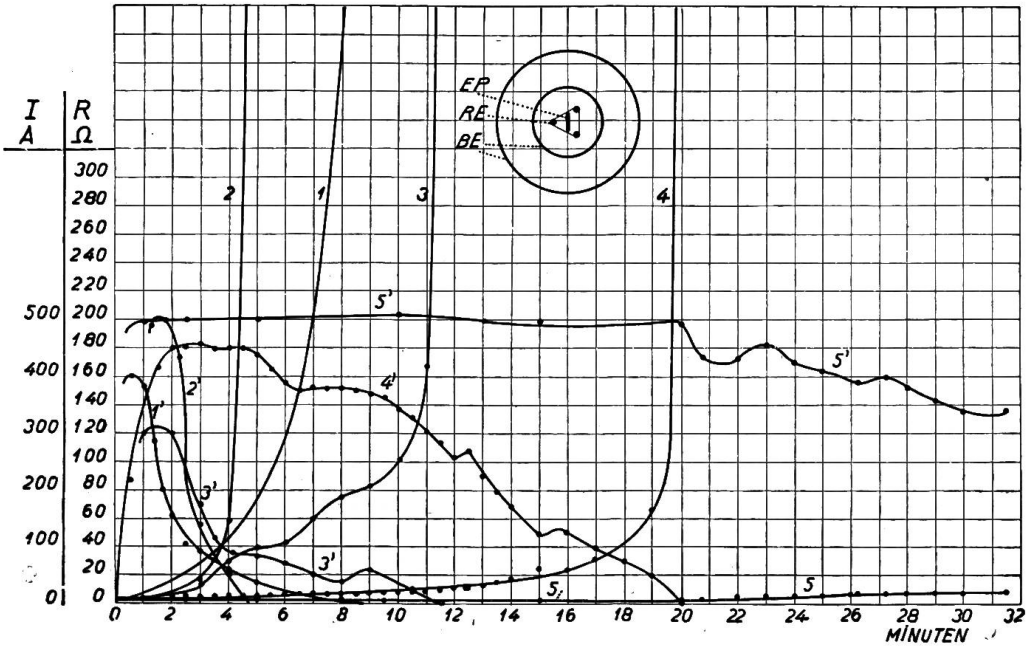

Fig. 35

Zusammenstellung von Ergebnissen der Belastungsversuche zwischen Erdelektroden.

EP = Plattenelektrode. *BE* = Bandelektrode. *RE* = Rohrelektrode.

Kurve 1: Widerstandsverlauf; 1' Stromverlauf bei Versuch zwischen Plattenelektrode und äusserer Bandelektrode (Siehe Fig. 29).

„ 2: „ 2' Stromverlauf bei Versuch zwischen Plattenelektrode und innerer Bandelektrode (Siehe Fig. 30).

„ 3: „ 3' Stromverlauf bei Versuch zwischen Rohrelektroden und äusserer Bandelektrode (Siehe Fig. 31).

„ 4: „ 4' Stromverlauf bei Versuch zwischen Plattenelektrode in Kohlebettung und äusserer Bandelektrode (Siehe Fig. 33).

„ 5: „ 5' Stromverlauf bei Versuch zwischen innerer und äusserer Bandelektrode (Siehe Fig. 32).

Bodenbeschaffenheit: Feuchter Lehmboden.

begrenzter Stromstärke, belastet, d. h. so lange, bis sich ein günstiger Moment zeigt, den Defekt zu beheben.

Diese Versuche wurden an den, im ganz homogenen Lehmboden, verlegten Elektroden, wie sie vorstehend beschrieben wurden, vorgenommen. Es wurden geprüft bei etwa gleicher Oberfläche von 1 m²:

Plattenelektrode direkt im Lehmboden,
Plattenelektrode in Holzkohlenbettung im Lehmboden,
Rohrelektroden,
Bandelektroden.

In allen Fällen wurde als zweite Hilfselektrode eine Bandelektrode von ca. 1,7 m² Oberfläche (2×25 mm und ca. 32 m Länge) verwendet.

Die mit Wechselstrom durchgeführten Versuche mit Stromstärken bis zu ca. 500 Ampere und Spannungen bis zu ca. 2500 Volt sind in den Fig. 28÷35 zusammengestellt.

Die Kurven zeigen, wie verhältnismässig rasch die Austrocknung der Erdelektrode erfolgt, bis dieselbe vom Erdboden vollständig isoliert ist, d. h. vom Anfangswiderstand auf den Widerstand ∞ ansteigt.

Die Arbeit in kWsek, um vom Anfangswiderstand auf den Wert ∞ zu kommen, war für die verschiedenen Erdelektroden etwa wie folgt:

Plattenelektrode direkt im Lehmboden ca. . .	135000 kWsek
Plattenelektrode in Holzkohlenbettung im Lehmboden	580000 kWsek
Rohrelektrode	113000 kWsek

Die Bandelektrode wurde während ca. 30 Minuten mit konstant ca. 460 Ampere bei einer Anfangsspannung von ca. 700 Volt und einer Endspannung von ca. 2500 Volt belastet, d. h. ca. 710000 kWsek, dabei stieg der Endwiderstand nur auf ca. 6,8 Ohm. Diese Elektrodenform hat sich somit auch betreffend Belastbarkeit als die weitaus günstigste erwiesen.

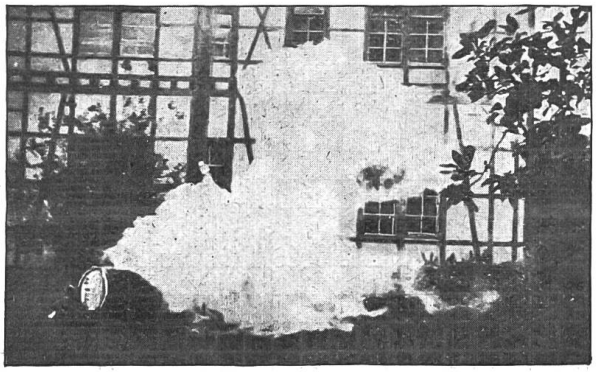

Fig. 36

Belastung: Plattenelektrode—äussere Bandelektrode. Explosionsartiger Dampfaustritt an der Plattenelektrode.

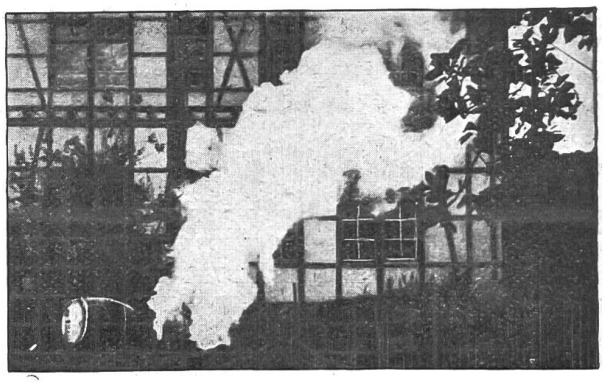

Fig. 37

Belastung: Plattenelektrode—äussere Bandelektrode. Lichtbogen an der Einführung der Plattenelektrode gegen Erde.

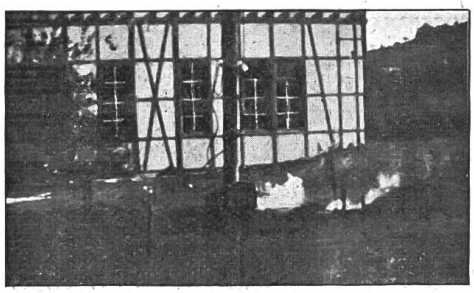

Fig. 38

Belastung: Rohrelektrode—äussere Bandelektrode. Lichtbogen an der Rohrelektrode gegen Erde.

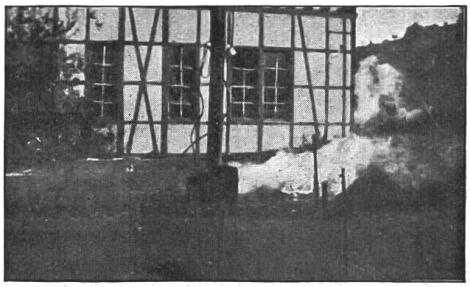

Fig. 39

Belastung: Rohrelektrode—äussere Bandelektrode. Lichtbogen am Verbindungsdraht zwischen den Rohrelektroden gegen Erde.

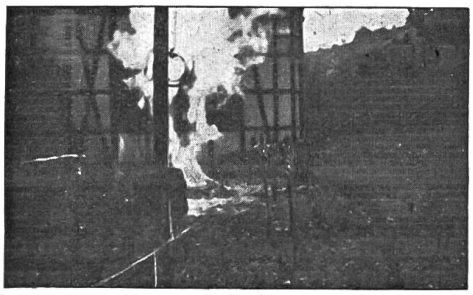

Fig. 40

Belastung; Plattenelektrode—innere Bandelektrode. Lichtbogen an der Einführung der Plattenelektrode gegen Erde.

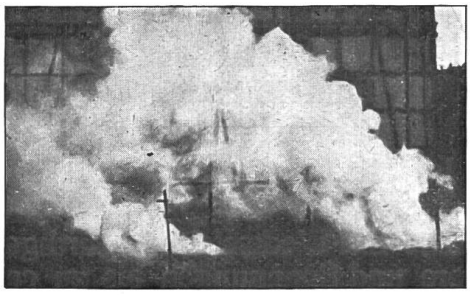

Fig. 41

Belastung: innere und äussere Bandelektrode. Dampfentwicklung längs der inneren Bandelektrode; Lichtbogen an ihrer Einführung.

Interessant ist aus obiger Zusammenstellung herauszulesen, dass die Belastbarkeit der Plattenelektroden durch Einbetten in Holzkohle auf etwa den vierfachen Betrag gestiegen ist. Dies war zu erwarten, da durch die Holzkohlenbettung eine künstliche Oberflächenvergrösserung erzielt wird.

Bei allen diesen Versuchen wurde nach einer gewissen Belastungsdauer in der Nähe der Elektrode ein zuerst brodelndes Geräusch gehört und darauf sehr viel Dampf ausgestossen. An den Dampfaustrittstellen wurde die Erde mehr oder weniger stark aufgeworfen und es bildeten sich Krater in der Grösse von grossen Maulwurfshaufen. Je mehr die Elektrode isoliert wurde, desto mehr nahm das Dampfausstossen ab und das brodelnde Geräusch ging in ein brummendes über, als Folge von Lichtbogenüberschlägen. Diese Ueberschläge waren auch besonders gut zwischen der Erdoberfläche und der Elektrodeneinführung (Fig. 36÷39) zu sehen.

Nach den Versuchen wurden die Elektroden ausgegraben, um die Wirkung der Lichtbogenbildung zu ersehen.

Die Plattenelektrode direkt im Lehmboden zeigte viele Lichtbogenansatzstellen und viele kleine Löcher.

Die Plattenelektrode in Holzkohlenbettung zeigte eher noch stärkere Anbrennungen als die Plattenelektrode direkt im Lehmboden und die Zuleitung war an der Erdoberfläche durchgebrannt.

Die Rohrelektroden zeigten viele Lichtbogenansätze, waren aber ganz intakt.

Die Bandelektrode war an drei Stellen im Boden durchgeschmolzen. Im folgenden Abschnitt wird noch angegeben werden, wie diesem Uebelstand in der praktischen Anwendung zu begegnen ist.

8. Ausführung der Erdungsanlage.

Nachdem die hauptsächlichsten Fragen über die Erdung besprochen wurden, sollen noch einige Angaben über die Ausführung der Erdungsanlage gemacht werden.

Was zu erden ist, wurde bereits unter Abschnitt 2 näher angeführt.

Ueber die Ausführung der Erdleitungen ist folgendes zu sagen (vergl. auch Leitsätze des VDE für Schutzerdungen.)

Bei grösseren Anlagen sollte durch das ganze Gebäude eine kräftige Erdungssammelschiene gelegt werden, die mit den natürlichen Erdungen (Wasserleitungen, Eisenkonstruktionsteilen, Rohrleitungen usw.), die eine dauernd zuverlässige Verbindung mit Erde gewährleisten und einigen künstlichen Erdelektroden verbunden wird. Gasleitungen sind wegen der im allgemeinen schlecht leitenden Rohrverbindungen und wegen der Gefahr des Durchbrennens nicht allein als natürliche Erdung zu wählen.

Von dieser Haupterdungsschiene sind einzelne Steigleitungen anzubringen, an die dann die Konstruktionsteile angeschlossen werden. Konstruktionsteile dürfen kein Glied der Erdleitungen darstellen, d. h. es sind nur Verbindungen zwischen Konstruktionsteil und Erdleitung, nicht aber Verbindungen zwischen Konstruktionsteilen als Verbindung zu Erdelektrode zulässig.

Bei kleinen Anlagen ist, soweit möglich, das gleiche Prinzip zu verfolgen wie bei grossen Anlagen, nur können hier die Erdleitungen einfacher gehalten werden.

Dass die Ableitungen vom Ueberspannungsableiter bis zur Erdelektrode getrennt auszuführen ist, wurde bereits in Abschnitt 6 angegeben und begründet.

Eine Isolation der Erdleitungen der Ueberspannungsableiter ist nötig, wie die Versuche unter Abschnitt 6 zeigten. Für Ueberspannungsableiter ohne Schutzwiderstände sollten sogar Isolatoren fast gleicher Grössenordnung wie der betreffenden Betriebsspannung zukommt, gewählt werden. Für Ueberspannungsableiter mit Schutzwiderständen sollten Isolatoren entsprechend ca. 500 Volt Betriebsspannung genügen. Wo die Erdleitungen von Ableitern zufälliger Berührung ausgesetzt sind, sind dieselben zu verschalen (Begründung vergl. Versuche Abschnitt 6).

Die Verbindungsleitungen zwischen der Erdungssammelschiene und den künstlichen Erdelektroden sollen unterirdisch geführt werden und zwar mindestens ca. 1 bis 1,5 m tief, damit an der Erdoberfläche keine gefährlichen Spannungen entstehen können.

Die Anschlüsse an die natürlichen Erdungen und an die Erdelektroden sind mit aller Sorgfalt vorzunehmen, damit keine zu grossen Uebergangswiderstände entstehen, die bei grossen Stromstärken erhebliche Erwärmungen verursachen und dadurch ein Durchbrennen oder Abschmelzen nach sich ziehen würden.

Der Anschluss der Erdungsschienen an eine Wasserleitung muss ausserhalb des Gebäudes erfolgen, damit bei Reparaturen an der Wasserleitung im Gebäude kein Unterbruch entsteht.

Die Verbindungsstellen zwischen Erdleitung und künstlicher Erdelektrode sind so auszuführen, dass die Korrosionsgefahr ein Minimum wird (gleiche Materialien, z. B. Kupfer – Kupfer verwenden).

Die Verbindungen der Erdleitungen unter sich sollten durch Nietung, Schweissung oder gesicherte Schraubenverbindungen erfolgen. Löten mit Zinn allein sollte nur in solchen Fällen zulässig sein, wo keine beträchtlichen Erwärmungen der Erdleitungen im Kurzschlussfall zu befürchten sind.

Für die Erdungsanlagen kann anstelle von Kupfer auch Eisen verwendet werden, nur muss der Querschnitt entsprechend der Leitfähigkeit vergrössert werden.

Der Querschnitt der Erdleitungen muss je nach dem zu erwartenden Kurzschlusstrom I_k (doppelpoliger Erdschluss) und Belastungsdauer abgestuft werden.

Die folgenden Tabellen geben für offen verlegte Kupferleiter bei einer Temperaturzunahme von 300 bezw. 600° C für verschiedene Stromstärken und verschiedene Zeiten t die nötigen Leiterquerschnitte q bezw. Durchmesser d von runden Leitern.

Querschnitte von Kupfererdleitungen für verschiedene Grösse bezw. Dauer von Kurzschlussströmen I_k bei Erwärmung der Leiter um 300 bezw. 600° C. Tabelle V

Erwärmung in ° C	Ampere J_k	mm² $t = 0{,}5''$	mm² $t = 1''$	mm² $t = 5''$	d_{mm} $t = 0{,}5''$	d_{mm} $t = 1''$	d_{mm} $t = 5''$.
300	100 000	314	444	994	20	24	36
	50 000	157	222	497	14	17	25
	10 000	31	44	99	6,3	7,5	11,2
	5 000	(16)	(22)	50	–	–	8,0
	1 000	(3,2)	(4,4)	(10)	–	–	–
600	100 000	222	314	702	17	20	30
	50 000	111	157	351	12	14	21
	10 000	(22)	31	70	–	6,3	9,5
	5 000	(11)	(16)	35	–	–	6,7

Eingeklammert sind Querschnittswerte, welche kleiner als das Mindestmass der schweizerischen Landesvorschriften (25 mm²) sind.

Daraus ist der Schluss zu ziehen, dass in Grosskraftwerken und deren Verteilungsanlagen die Erdleitungen stärker zu bemessen sind, als die heutigen schweizerischen Vorschriften vorschreiben, was heute auch allgemein üblich ist und bei kleinen, weniger grossen Kurzschlussströmen ausgesetzten Anlagen, unter den heute vorgeschriebenen Querschnitt gegangen werden dürfte.

Ueber die Ausführung der Erdelektroden wurde bereits in Abschnitt 7 das wesentliche angegeben. Im allgemeinen wird die Erdungsanlage, soweit möglich,

aus natürlichen und künstlichen Elektroden zusammengesetzt, besonders sollen die Wasserleitungsnetze in die Erdungsanlage einbezogen werden.

Vor dem Verlegen von künstlichen Erdelektroden nur im Wasser wurde bereits an anderer Stelle gewarnt.

In Anlagen mit Erdseil ist dasselbe an das Erdungssystem anzuschliessen. Dasselbe kann, wie noch gezeigt wird, ganz wesentlich zu einer möglichst vollkommenen Erdung beitragen.

Von den künstlichen Elektroden sind die Bandelektroden am günstigsten und die Rohrelektroden den Plattenelektroden gleichwertig aber billiger. Die Rohrelektroden (von ca. 2 m Länge) sind ca. 2 m auseinander zu verlegen und das obere Ende sollte ca. 50 cm unter die Erdoberfläche eingetrieben werden. Ueber den Einfluss der Bodenbeschaffenheit usw. wurde bereits berichtet. Bei Anwendung von Platten ist die Verlegung in Grundwasser angezeigt, bei Bandelektroden genügt ein Eingraben bis auf ca. 60 bis 90 cm Tiefe; sie vermitteln von vorneherein die Energieverteilung über ein grösseres Gebiet. Es wird empfohlen, die Bandelektroden ringförmig um den Anlageteil (Zentrale, Transformatorstation, Schalthaus, Mast usw.), zu dessen Erdungssystem sie gehören, zu verlegen. Künstliche Elektroden, die im Schotter verlegt werden müssen, sollten in eine mindestens allseitig 50 cm starke Humusschicht eingebettet werden. Das Einbetten in Kohle wird nicht empfohlen, da die Elektroden rasch zerfressen werden.

Als künstliche Erhöhung der Leitfähigkeit des Erdbodens in der Nähe der Erdelektroden empfiehlt S. O. Peters die Durchtränkung des Erdbodens mit Salzwasser. Er empfiehlt diese Durchtränkung in regelmässigen Zeitabständen zu wiederholen. Vermutlich hat diese Methode den gleichen Nachteil wie das Einbetten in Kohle, d. h. starke Korrosion, dürfte aber, bei guter Ueberwachung, in besonders ungünstigem Erdreich (z. B. Kies) doch mit Vorteil angewendet werden.

In Fällen, wo es sehr schwer ist, eine dauernd gute Erde zu erhalten, kann die von Vogel [10]) vorgeschlagene Methode zum Ziele führen. Vogel verlegt zwei miteinander verbundene Ringelektroden übereinander, die eine ca. 20–30 cm tief unter der Erde und die zweite je nach den Verhältnissen 1 bis 2 m unter der Erde.

Anhaltspunkte über den zu erwartenden Erdwiderstand einer künstlichen Elektrode bei verschiedenen Ausführungsformen und Erdreich sind dem Abschnitt 7 zu entnehmen.

Es soll hier noch gezeigt werden, in welchen Dimensionen die Erdelektroden ausgeführt werden müssten, wenn man für die, die Elektroden am meisten beanspruchenden Betriebsfälle dieselben so dimensionieren wollte, dass die maximale Spannungsdifferenz zwischen Erdelektrode und irgend einem gleichzeitig berührbaren Punkte nicht mehr als 100 Volt betragen darf. Nach Fig. 20 ergäbe dies bei Anwendung von Bandelektroden etwa folgende Bandlängen im Lehmboden:

$I = 100$ Ampere	$L =$ ca. 75 Meter
$I = 1000$ Ampere	$L =$ ca. 750 Meter
$I = 10000$ Ampere	$L =$ ca. 7500 Meter

Diese Zahlen zeigen, dass diese Forderung praktisch nicht erfüllbar ist und dass daher die Erdung nie für alle Stromstärken befriedigend gelöst werden wird.

Bei eisernen Maststationen hat sich nach den Unfallakten oft gezeigt, dass im Störungsfall die Stationen wegen grösseren Spannungsdifferenzen in der Erdoberfläche nicht mehr zugänglich waren. Durch das Verlegen einer Bandelektrode um die Station herum, in der Weise, dass auf der Türseite das Band bis 40 cm an die Erdoberfläche herangebracht würde und zwar in einer Distanz von ca. 50 bis 80 cm von der Türe entfernt und Anbringen eines kleinen Eisenrostes (eiserne Fussmatte oder einfaches Blech) vor der Türe, dürfte diese Schwierigkeit in den meisten Fällen behoben werden. Die eiserne Fussmatte dürfte dabei, um den Reiz des Wegnehmens nicht aufkommen zu lassen, mit einigen wenigen Zentimetern Erde bedeckt werden.

[10]) Siehe Elektr. Kraftbetriebe und Bahnen, 1913, Seiten 7 und 21.

Wie die Unfallakten gezeigt haben, sind noch recht oft Unfälle beim Bedienen defekt gewordener Mastschalter zu verzeichnen. Auch die Isolation der Zugstange hat diese Unfälle nicht beseitigen können. Der Berichterstatter schlägt vor, auch hier statt der Platten- oder Rohrelektrode eine Bandelektrode um den Mast herum zu verlegen und zwar ähnlich wie im vorhergehenden Beispiel bei der Transformatorenstation und auch hier auf genau gleiche Art unter die Bedienungsstelle eine eiserne und geerdete Fussmatte zu legen. Eine gefährliche Spannungsdifferenz zwischen Hand – Fuss kann dabei nie entstehen und voraussichtlich auch keine gefährliche Schrittspannung.

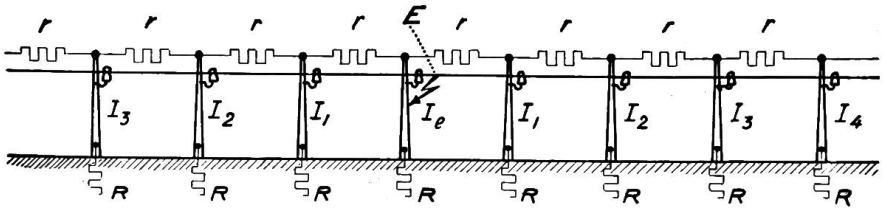

Fig. 42

E = Erdschlusstelle.

Ein recht unangenehmes Problem stellt die Masterdung dar.

Holzmasten mit Eisenträgern sind nach den heute bestehenden schweizerischen Vorschriften nicht zu erden. Die Erfahrungen, die damit gemacht wurden, sind recht gute, es sollte daher diese Vorschrift nicht geändert werden.

Für Eisenmaste ist Erdung vorzuschreiben. Für Leitungen, die ganz auf Eisenmasten verlegt sind, sollte auch das Erdungsseil vorgeschrieben werden, das an jedem Mast zu erden wäre. In der dadurch erzielten Verbesserung der Erdung dürfte der Hauptvorteil des Erdseiles liegen;

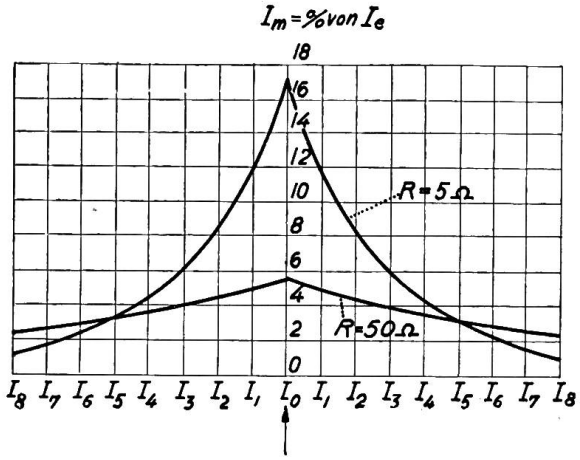

Fig. 43

Jeder Mast geerdet. Bei I_0 Mast mit Erdschluss.

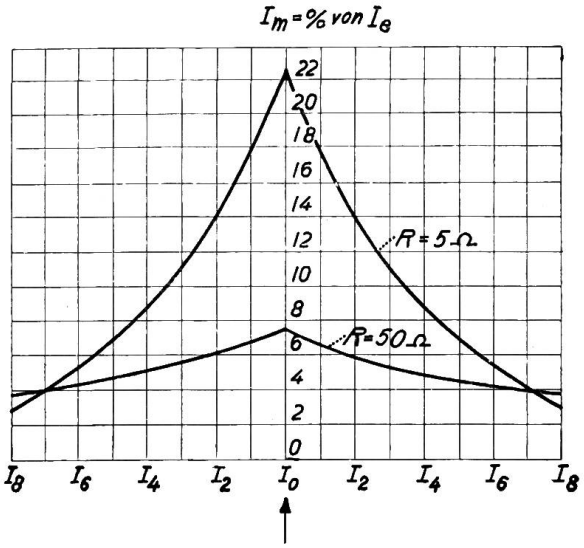

Fig. 44

Jeder zweite Mast geerdet. Bei I_0 Mast mit Erdschluss.

ganz besonders bei Anlagen sehr hoher Spannung. Wie gross die Ströme beim doppelpoligen Erdschluss werden können, wurde in Abschnitt 4 angedeutet. Dieser Kurzschlusstrom an der fehlerhaften Maststelle verteilt sich nun über das Erdseil, je nach dem Verhältnis der einzelnen Masterdungswiderstände und dem Eigenwiderstand des Erdseiles ganz verschieden auf die benachbarten Masterdungen des den Defekt aufweisenden Mastes.

Es ist ohne weiteres einzusehen, dass bei unveränderlichem Erdseilwiderstand und entweder sehr kleinem Erdwiderstand pro Masterdung, oder einem sehr grossen Erdwiderstand pro Masterdung im ersten Fall wegen dem zum Erdwiderstand pro Mast grossen Erdseilwiderstand verhältnismässig nur wenig benachbarte Masterdungen am Kurzschlusstrom teilnehmen werden bezw. bei zum Erdseilwiderstand sehr grossen Erdwiderstand pro Mast, der Erdschlusstrom sich auf verhältnismässig viele Maste verteilen wird.

Vergleichsweise wurden zwei Fälle mit folgenden Bedingungen durchgerechnet: Mastabstand: 200 m; Schutzseil: $q = 50$ mm²; Eisen: $r = 0{,}75$ Ohm; Erdungswiderstände: 1. Fall: $R = 5$ Ohm; 2. Fall: $R = 50$ Ohm.

Als resultierenden Widerstand des ganzen Systems erhält man im:

1. Fall ($R = 5$ Ohm): $R_{res} = 0{,}8$ Ohm (1,15) } Werte in der Klammer bei
2. Fall ($R = 50$ Ohm): $R_{res} = 2{,}7$ Ohm (3,75) } Erdung nur jedes 2. Mastes.

Nimmt man den totalen Erdschlusstrom I_e, welcher an der Erdschlusstelle vom Netz auf das Erdungssystem übertritt, zu 100 % an, so verteilen sich die Ströme I_m pro Masterdung, damit aber auch die Spannungsabfälle, welche durch die Masterdungen in den beiden Fällen entstehen, wie Fig. 43 zeigt.

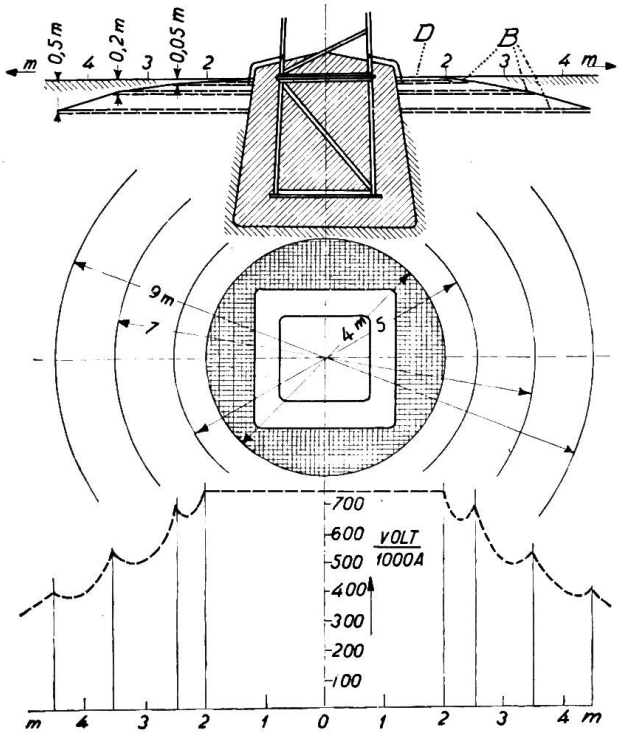

Fig. 45

B = Bandelektroden. D = Drahtgeflecht.

Wird an der Erdschlusstelle ein Kurzschlusstrom von ca. 2000 Ampere angenommen, ein Wert, der häufig vorkommen dürfte, so entfallen davon auf den Mast mit Erdschluss $0{,}16 \times 2000 = 320$ Ampere auf die zwei benachbarten $0{,}12 \times 2000 = 240$ Ampere usw.

Es ist auch die Frage aufgeworfen worden, ob bei der Verwendung eines Erdseiles eventuell nur jeder zweite Mast geerdet werden könne. Mit den Annahmen des vorigen Beispiels ergibt sich dafür die Stromverteilung auf die verschiedenen Maste nach Fig. 44. Die Unterschiede, die die Werte bei Erdung jedes zweiten Mastes gegenüber der Erdung jedes einzelnen Mastes zeigen, dürften die Erdung jedes einzelnen Mastes bereits befürworten, wenn auch nicht gerade sehr zwingend.

Ausschlaggebend ist aber, dass die Konstruktionsteile des Mastes, der nicht an eine eigene Erdelektrode, sondern nur über das Erdseil geerdet wird, im Kurzschlussfall die Spannung des Zuführungsdrahtes I der einen Erdelektrode annehmen (vergl. Fig. 1) und das den Mast direkt umgebende Erdreich das Erdpotential behalten würde. Die Spannungsdifferenz zwischen Konstruktionsteil und Erde würde in Fig. 1 der Differenz zwischen Einführungsdraht I und dem Punkt C entsprechen, d. h. der vollen Spannungsdifferenz der einen Erdelektrode. Durch die Erdung aller Maste auf die in Fig. 45 dargestellte Weise wird diese Differenz wenigstens in 2 oder mehr Teile geteilt, was von grosser Bedeutung ist.

Die Masterdung sollte nun so ausgeführt werden können, dass bei dieser Beanspruchung die Spannungsdifferenz in der nächsten Umgebung des Mastes auf Schritt- und Reichweite nie über 100 Volt ansteigt.

In Fig. 45 ist eine Lösung gezeigt, welche die gestellte Bedingung erfüllen dürfte, aber mit Rücksicht auf Kosten und die grossen, der Bebauung (dem Pflügen) entzogenen Flächen nicht mehr allgemein ausführbar ist. Das Beispiel ist auf Grund unserer Versuche gerechnet und ergibt für ca. 300 bis 400 Ampere Erdschlusstrom pro Mast auf Schritt- und Reichweite ca. die 100 Volt Spannungsdifferenz.

Es wurde oft empfohlen, verschiedene vom Mast radial auslaufende Bänder derart zu verlegen, dass sie in Mastnähe fast an der Erdoberfläche verlaufen und mit grösserer Distanz vom Mast tiefer ins Erdreich reichen. Solange nur wenige Bänder (ca. 6–8) verlegt werden, was wohl immer der Fall sein dürfte, ist diese

Praxis nicht zu empfehlen, da die zwischen den Bändern liegenden Erdzonen und dem Mast selbst immer gefährliche Spannungsdifferenzen ergeben.

Der Berichterstatter schlägt vor, normalerweise zwei Ringelektroden um den Mast zu verlegen. Die dem Mast zunächstliegende ca. 15—20 cm unter der Erdoberfläche und ca. 30 cm allseitig distanziert vom Mast und die zweite ca. 40—50 cm unter der Erdoberfläche und ca. 60—70 cm allseitig vom Mast distanziert. Die totale Bandlänge beider Ringelektroden zusammen muss dabei mindestens ca. 15 m betragen. Wo diese Bandlänge mit zwei Ringelektroden nicht erreicht wird, ist eine dritte Elektrode zu verlegen. Diese Lösung erfüllt die eingangs bestimmte Bedingung nicht ganz, dürfte in den meisten Fällen aber ausreichen und ist mit Rücksicht auf die praktischen Verhältnisse gut durchführbar.

Ist man gezwungen, solche Maste an oder in der Nähe von verhältnismässig verkehrsreichen Punkten aufzustellen, so muss die Erdung mit aller Sorgfalt erstellt werden und man sollte sich für solche Ausnahmefälle nicht scheuen, die Erdung in ähnlicher Weise auszuführen, wie in Fig. 45 dargestellt ist.

Der Berichterstatter ist kein Anhänger vom Umzäunen solcher Maste, wie auch oft vorgeschlagen wurde. Andererseits sollte man aber alles tun, dass der Mast an seiner Basis nicht direkt zum Absitzen oder Anlehnen verlockt. Wo die Maste mit Sockel ausgeführt werden, sind dieselben nur wenig und nicht zu breit über die Erde vorstehen zu lassen und die Konstruktionsteile an der Basis bis auf Manneshöhe eventuell mit Stacheldraht zu umwickeln.

Gittermaste oder Mannesmannmaste, die ohne Betonsockel aufgestellt werden, sind betreffend Ausführung der Erdung grundsätzlich genau gleich zu behandeln wie vorstehend angegeben.

Werden Mannesmannmaste mit Betonsockel aufgestellt, so sollte der Mast mit seinem untern Ende ca. 20 cm aus dem Sockel herausragen, um als zusätzliche Elektrode zu dienen.

Alle solchen Eisenmaste mit Plattenelektroden zu erden, die einige Meter vom Mast entfernt liegen, ist absolut falsch, da dabei praktisch immer das volle Spannungsgefälle zwischen Mast und umliegender Erde auftritt (vergl. Fig. 1). Nach Ansicht des Berichterstatters eignen sich Platten- und Rohrelektroden für Masterdungen überhaupt nicht.

Betreffend der Erdung von Betonmasten ist folgendes zu bedenken: Ein Betonmast wird immer einen schlechten Leiter darstellen, die Leitfähigkeit hängt von seinem Feuchtigkeitszustand ab. Der Leiter besteht aus Eisen mit zwischengeschaltetem Beton. Das Spannungsgefälle am Mast selbst kann also recht verschieden ausfallen.

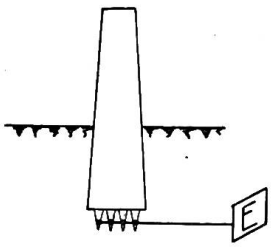

Fig. 46

Von einer richtigen Erdung eines Betonmastes kann man daher nicht sprechen. Aus den Unfallakten war ein Todesfall im Zusammenhang mit der Erdung von Betonmasten zu finden. Der Mast war, wie Fig. 46 zeigt, geerdet, d. h. die Armierungseisen am Fussende führten zur Erdplatte. Der Verunfallte arbeitete am Fussende des Mastes. In diesem Moment wurde der Mast aus irgend einem Grunde an seinem Kopfende unter Spannung gesetzt, allem Anschein nach infolge eines einpoligen Erdschlusses. Bei zufälliger Berührung des Mastes wurde der Verunfallte auch in diesem Falle, wie vorstehend schon verschiedentlich angeführt, der vollen Elektrodenspannung ausgesetzt und getötet. Durch Anordnung der Erdelektroden als Bänder um den Mast herum und verbunden mit den vorstehenden Armierungseisen, hätte aller Voraussicht nach auch dieser Unfall verhütet werden können.

Auch die Erdung von ortsveränderlichen Anlagen ist ein nicht ganz einfach zu lösendes Problem. Es ist hier kaum zu verhindern, dass man beim zufälligen Berühren eines unter Spannung gesetzten Anlageteiles der vollen Elektrodenspannung ausgesetzt wird und die Erdung einfach wegzulassen wäre sicher nicht richtig. Das einzige Mittel, das hier helfen kann, ist eine ganz vorzügliche Erdung. Es muss hier unbedingt verhindert werden, dass der Erdschlusstrom, der die nächstliegende Sicherung zum Durchschmelzen bezw. den nächstliegenden Schalter zum Aus-

lösen bringt, an der Erdelektrode eine maximale Spannungsdifferenz von mehr als 100 Volt erzeugen kann.

Die Ausführung der beweglichen Zuleitungen zu ortsveränderlichen Anlagen wurde bereits auf Seite 379 besprochen. Betreffend die Ausführung der Stecker ist gesetzlich vorzuschreiben, dass dieselben auch mit Gewalt nicht verkehrt eingesteckt werden können und loswerdende Verbindungen keinen Erdschluss nach sich ziehen. Gestützt auf die allzuvielen Todesfälle, verursacht durch ortsveränderliche Anlagen, muss mit aller Energie eine Besserung erzielt werden. Auf die übrigen Erdungsvorschriften in Hausinstallationen soll an dieser Stelle nicht eingetreten werden.

Betreffend die Erdung im Zusammenhang mit elektrischen Bahnen sollen hier noch folgende Fragen behandelt werden:

1. Soll die Benützung des Geleises für die Schutzerdung nur erlaubt werden oder ist dieselbe direkt vorzuschreiben?
2. Ist es zweckmässig, dass das Geleise der elektrischen Bahnanlagen in bestimmten Abständen noch besonders zu erden ist?
3. Dürfen die Ueberspannungsableiter an die Geleiseerdung angeschlossen werden?
4. Ist es zweckmässig und zulässig, dass Anlagen Dritter die Geleiseanlage als Erdung benützen dürfen?
5. Sollen Bleimäntel von Einleiterkabeln über Widerstände oder direkt geerdet werden?

Die Frage 1 wurde bereits im Abschnitt 6 behandelt und in dem Sinne beantwortet, dass das Anschliessen der Schutzerdung an die Betriebserdung das richtige ist.

Die Frage 2 ist nach Versuchsergebnissen dahin zu beantworten, dass die Schienenerdung so gut ist, dass eine weitere künstliche Erdung gar keinen Vorteil mehr bringen kann.

Die Frage 3 ist ebenfalls im Abschnitt 6 behandelt, durch Versuche abgeklärt worden und ist zu bejahen.

Zur Frage 4 ist folgendes zu sagen: Auch bei Bahnkraftwerken sollte die Schutzerdung, mit Rücksicht auf Reparaturarbeiten, nicht allein auf die Geleiseerdung abstellen und wie in Abschnitt 6 schon angeführt, sollte immer eine künstliche Erdungsanlage mitvorhanden sein. Obwohl der Berichterstatter Befürworter des Zusammenschliessens aller guten natürlichen Erdungen zu einem weitmaschigen Erdungsnetz ist, sollte in diesem Falle doch von der Verwendung der Geleiseerdung durch Dritte abgesehen werden. Die Erdung des Dritten sollte vielmehr in diesem Fall weit, mindestens 10 m, von dem Geleise entfernt sein. Bei in Bahnunterführungen verlegten Kabeln (– Anschluss des Mantels an eine fremde Elektrode –) dürfte diese Distanz nicht immer zu erreichen sein, aber es dürfte hier auch eine Distanz von ca. 5 m noch ausreichen.

Die Frage 5 kann jedenfalls nur so beantwortet werden, dass die Bleimäntel der Kabel direkt geerdet werden sollen. Alle Erdungen über Widerstände haben sich als schlecht erwiesen. Es wäre hier jedenfalls angezeigt, die Bleimantelerdung an allen Kabelmuffen mit der Geleiseerdung zu verbinden.

Es ist noch die Frage aufgeworfen worden, ob bei der Installation von Elektrodenheizkesseln betr. die Erdung besondere Vorsichtsmassnahmen erforderlich seien. Es wurde bereits im Abschnitt 4 angedeutet, dass dies einen Sonderfall eines Netzes mit Systemerdung darstellt und also alle die dort gemachten Ueberlegungen auch hier gemacht werden können und ebenso ein Teil der Ueberlegungen des Abschnittes 6. Wenn allen diesen Ueberlegungen genau gefolgt wird und alle Konstruktionsteile und natürlichen Erdungen in dem Gebäudeteile, in welchem die Heizung verläuft, zur Schutzerdung herangezogen werden, so können in keinem Betriebsfalle gefährliche Spannungsdifferenzen innerhalb der Anlage entstehen. Es ist dabei ganz gleichgültig, ob die Elektrodenheizkesselanlage durch einen eigenen Transformator, oder durch das Netz direkt gespiesen wird.

Alle diese Ausführungen zeigen, welche schwerwiegenden Konsequenzen eine unrichtig ausgeführte Erdung hat und wieviel Mühe es kostet, eine gute Erdung zu erzielen und zu erhalten. Bei der Bedeutung, die diesen Erdungsfragen zukommt, ist eine dauernde sorgfältige Ueberwachung dieser Anlageteile unbedingt nötig. Die Elektrodenwiderstände müssen in regelmässigen Zeitabständen nachgemessen werden und zwar mindestens alle 1 bis 2 Jahre einmal. Ueber das Resultat dieser Untersuchungen sollte Buch geführt werden.

Zur Frage nach dem Unterschiede im Ueberspannungsschutz bei Anlagen verschiedener Stromart.

Von Prof. Dr. *W. Kummer*, Ingenieur, Zürich.

Anschliessend an die im Bulletin No. 6 dieses Jahres erschienene „Wegleitung für den Schutz von Wechselstromanlagen gegen Ueberspannungen" untersucht der Autor den Unterschied, der beim Schutz von Gleichstromanlagen zu machen ist.

L'auteur examine en quoi la protection des installations à courant continu contre les surtensions devra différer de la protection des installations à courant alternatif.

Dem Ueberspannungsschutz von Wechselstromanlagen ist sowohl seitens der Betriebsleiter, als auch seitens der Vertreter der Wissenschaft eine wesentlich grössere Beachtung geschenkt worden, als dem Ueberspannungsschutz von Gleichstromanlagen. Für Betriebsleiter handelt es sich bei der Wiedergutmachung von Ueberspannungsschäden in Wechselstromanlagen um Geldaufwendungen, wie sie in entsprechender Höhe in Gleichstromanlagen kaum oder höchst selten in Betracht fallen. Demgemäss hatten sich auch die Vertreter der Wissenschaft bisher in erster Linie mit dem Ueberspannungsschutz der Wechselstromanlagen zu beschäftigen, dessen Entwicklung heute wieder einmal in eine gewisse Ruhelage gelangt ist.

Die verschiedenen, hauptsächlichen Arten von Ueberspannungen, die sich in Wechselstromanlagen feststellen lassen, können ohne weiteres auch in Gleichstromanlagen erwartet werden; indessen sind quantitative Unterschiede begründet durch die verschiedene Höhe der bei den verschiedenen Stromarten hauptsächlich verwendeten höheren Spannungen und Leistungen, durch Abweichungen in der Grösse der in Betracht fallenden Kapazitäten, durch geänderten Charakter der Induktivitäten von Maschinen und Apparaten und der bei Schaltoperationen, sowie bei Erdschlüssen und Kurzschlüssen, auftretenden Lichtbogenerscheinungen. Gewisse Ueberspannungsarten, deren Gefährlichkeit in Wechselstromanlagen besonders ausgeprägt erscheint, können deshalb in Gleichstromanlagen regelmässig einen harmloseren Charakter aufweisen. Demgemäss darf man auch, besonders in quantitativer Hinsicht, bei verschiedener Stromart gewisse Unterschiede in den Methoden der Schutzmassnahmen, sowie in den praktischen Nutzanwendungen erwarten.

A. Die Arten der Ueberspannungen und ihre Bekämpfung.

Im Entwurf der neuen Wegleitung des S. E. V. für Ueberspannungsschutz [1]) ist in Ziffer 2 der „Leitsätze" eine Klassifizierung der Ueberspannungsarten angewendet, an die wir uns auch in der nachstehenden Darlegung halten wollen, um die Frage nach dem Unterschiede der Ueberspannungen und ihrer Bekämpfung bei verschiedener Stromart in möglichst methodischer Weise zu behandeln.

1. Der aussetzende Erdschluss, der als gefährlichste Ursache von Ueberspannungsschäden der Wechselstromanlagen gilt, ist in Gleichstromanlagen praktisch kaum jemals als gefährlich aufgetreten. Grundsätzlich kann er in Gleichstromanlagen bei dauernder oder zufälliger Erdung eines Pols oder des Nulleiters eines Dreileitersystems als Abart des von *W. Duddel* [2]) entdeckten sog. „singenden" Lichtbogens entstehen. Im Falle von Wechselstrom hat der aussetzende Erdschluss die Frequenz der Polwechselzahl der Wechselstromquelle, im Falle von Gleichstrom,

[1]) Bulletin 1923, No. 6, Seite 301 und ff.
[2]) Electrician (Ldn.) 1900, Bd. 46, Seiten 269, 310.