

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 12 (1921)
Heft: 10

Artikel: Über den räumlichen Verlauf von Erdschlussströmen
Autor: Rüdenberg, Reinhold
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057122>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 25.12.2024

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

die Speicher direkt angeschlossen sind, während die Heizung in einen Schacht entleert wird, aus welchem die Entleerungspumpe das Wasser ansaugt.

Zur Versorgung der Toiletten mit warmem Wasser dient ein Warmwasserapparat von 1500 Liter Inhalt, der im Winter mit einer Heizschlange von dem Wärmespeicher aus und im Sommer durch einen an das städtische Drehstromnetz von 380 Volt angeschlossenen elektrischen Heizeinsatz von 16 kW geheizt wird. Die elektrische Sommerheizung geschieht automatisch. Durch einen Temperaturschalter, Bauart Ghielmetti, wird die Stromzufuhr zum Warmwasserapparat aus- und eingeschaltet, wenn die Temperatur zirka 80° Celsius über- oder unterschreitet. Um die elektrische Heizung dem Warmwasserbedarf anpassen zu können, ist der Heizeinsatz in zwei Gruppen von 6,4 und 9,6 kW unterteilt. Auch die Motoren sind an das städtische Drehstromnetz angeschlossen. Auf einer Niederspannungsschalttafel, welche von der Firma Baumann & Kölliker in Zürich geliefert wurde, sind alle Sicherungen und Schalter samt dem Amperemeter für den Warmwasserapparat und die Motoren vereinigt.

Zur Heizung der Werkstätte genügt ein Wärmespeicher mit seinen beiden Elektroden, die zusammen 600 kW elektrische Leistung in Wärme umsetzen können und der zweite Kessel bildet eine Reserve. Ist der Inhalt beider Wärmespeicher auf 110° Celsius hochgeheizt, so stehen total 1,4 Millionen WE zur Verfügung, die ausreichen, um die Werkstätte bei -5° Aussentemperatur während zirka drei Stunden ohne Stromzufuhr zu heizen. Bei einer mittleren Wintertemperatur von $+5^{\circ}$ reicht die Wärmereserve für Heizung ohne Wärmezufuhr während zirka sechs Stunden aus. Andererseits genügt die Leistungsfähigkeit der vier Elektroden mit zusammen 1200 kW, um die Speicher in $1\frac{1}{4}$ Stunden hochzuheizen, wenn gleichzeitig keine Wärme an die Heizung abgegeben werden muss, bzw. in $2\frac{1}{2}$ Stunden, wenn gleichzeitig der volle Wärmeverlust der Werkstätte bei -5° Celsius gedeckt werden muss. Die verhältnismässig grosse Leistungsfähigkeit der Elektroden in Verbindung mit dem Wärmespeichervermögen, gestattet den Betrieb der Heizung an Hand des Fahrplanes so einzurichten, dass die Stromzufuhr nur während der Stunden schwacher Streckenbelastung nötig ist. Die Gesamtbelastung des elektrischen Teiles der Anlage für Bahnbetrieb und Heizung wird damit nicht grösser als für Bahnbetrieb allein, das heisst, die Heizung belastet weder die Hochspannungsleitungen, noch die Generatoren und Unterstationen. Diese Anlage wurde im Jahre 1920/21 von der Firma Gebrüder Sulzer A.-G., Abteilung Zentralheizungen, in Winterthur, als Generalunternehmer ausgeführt. Den elektrischen Teil dazu (Elektroden, Transformatoren und Schaltanlage) lieferte die Firma Brown, Boveri & Cie. in Baden.

Ueber den räumlichen Verlauf von Erdschlussströmen.

Von *Reinhold Rüdenberg*, Charlottenburg.

Wenn in einer grösseren Wechselstrom-Hochspannungsanlage ein Isolator eines eisernen Mastes durchschlägt, so fliesst an der Durchschlagsstelle ein Strom vom Transformator her über die Leitung durch den Mast zur Erde, der sich in ihr längs der Leitungsstrecke ausbreitet und von der Erdoberfläche als Verschiebungsstrom zu den ungestörten Leitungen übergeht, um von dort in den Transformator zurückzufließen.

Fig. 1 stellt den Verlauf eines derartigen Fehlerstromes dar. Der speisende Drehstromtransformator wird durch diesen Strom in V-Schaltung unsymmetrisch belastet. Die Stärke des entstehenden *Erdschlussstromes* lässt sich aus der Erdkapazität der ungestörten Leitungen, dem Widerstande und der Induktanz des Erdschlusskreises berechnen. Im allgemeinen sind Widerstand und Induktanz so klein, dass sie neben der Wirkung der Kapazität keine erhebliche Rolle spielen, so dass diese allein ausschlaggebend für die Grösse des Erdschlussstromes ist. Die Bestimmung

der Kapazität ist für die meisten praktisch vorkommenden Leiteranordnungen bekannt, *die Grösse des Erdschlussstromes soll daher als gegeben angesehen werden.*¹⁾ Er ist stets proportional sowohl der Kapazität als auch der Spannung des Netzes. In grösseren Ueberlandnetzen kann die Kapazität der Leitungen so gross und die Spannung so hoch sein, dass der Erdschlussstrom sehr beträchtliche Werte annimmt, bis zu 50 Amp. und darüber. Dieser Strom fliesst an der Durchschlagstelle vom Mastfuss in die Erde und kann dort *gefährliche Stromkonzentrationen* hervorrufen. In grösseren Entfernungen vom Mastfuss ist die Stromdichte wegen der Ausbreitung des Stromes auf eine grosse Fläche nur gering und auch der Verschiebungsstrom von der Erdoberfläche zu den ungestörten Leitungen ist nicht so dicht, dass er direkte Unannehmlichkeiten im Luftraum hervorrufen könnte. Er kann jedoch Störungen in benachbarten Schwachstromleitungen bewirken.

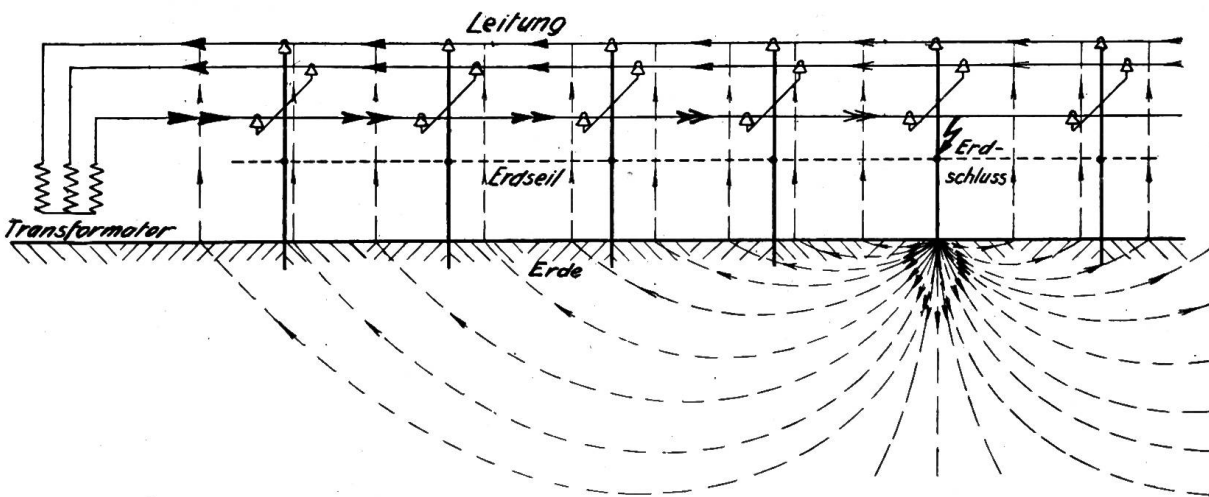


Fig. 1

Um die in Fig. 1 dargestellte starke Stromkonzentration zu vermeiden, kann man die eisernen Masten entweder in einzelnen Schutzgebieten streckenweise, oder auch sämtlich *untereinander durch ein Erdungsseil leitend verbinden*, was in Fig. 1 gestrichelt angedeutet ist. Dadurch erhält der Erdschlussstrom mehrere parallele Wege zur Erde, so dass der Strom durch den Erdschlussmast geringer wird. Alle Mastfüsse in der Nähe der Erdschlussstelle bilden jetzt zwar Konzentrationspunkte für den Stromeintritt in die Erde und stellen damit Gefahrpunkte dar. Da der Strom des einzelnen Mastes jedoch durch gemeinsame Verbindung sehr viel kleiner geworden ist, so ist die maximale Gefährdung wesentlich geringer als vorher.

In den letzten Jahrzehnten sind verschiedenartige Mittel entwickelt worden, um die Erdschlussströme nach Möglichkeit zu unterdrücken.²⁾ Da dieselben jedoch nicht überall in vollem Masse anwendbar sind, und sie die Ströme natürlich erst nach erfolgtem Durchschlag, also nach mindestens kurzzeitigem Auftreten, verringern können, so dürften die folgenden Ausführungen Interesse bieten, in denen versucht ist, *das Mass der Gefährdung zahlenmässig zu erfassen*, die durch den konzentrierten Uebertritt des Stromes vom Mast in die Erde hervorgerufen wird.³⁾

I. Die Ausbreitung der Erdschlussströme um den Mastfuss.

a) Tiefenwirkung.

Der Erdschlussstrom tritt beim Isolatordurchschlag oder Ueberschlag durch den Fuss des eisernen Mastes in die Erde ein, so wie es in Fig. 2 dargestellt ist; er

¹⁾ Vergl. K. Kuhlmann, E. T. Z. 1908, Seite 316; H. Behrend, E. T. Z. 1916, Seite 114; W. Petersen, E. T. Z. 1916, Seite 493.

²⁾ W. Petersen, E. T. Z. 1918, Seite 341; derselbe, E. T. Z. 1919, Seite 1.

³⁾ B. Lichtenstein, E. T. Z. 1921, Seite 841 behandelt in einem während der Drucklegung erschienenen Aufsatz ähnliche Fragen der Stromausbreitung.

breitet sich *bei homogener Erde* in der näheren Umgebung der Erdschlussstelle gleichmässig nach allen Seiten aus und erzeugt im Erdboden, der den endlichen spezifischen Leitungswiderstand¹⁾ ϱ besitzt, ein erhebliches Spannungsgefälle, dessen Verlauf in Fig. 2 dargestellt ist.

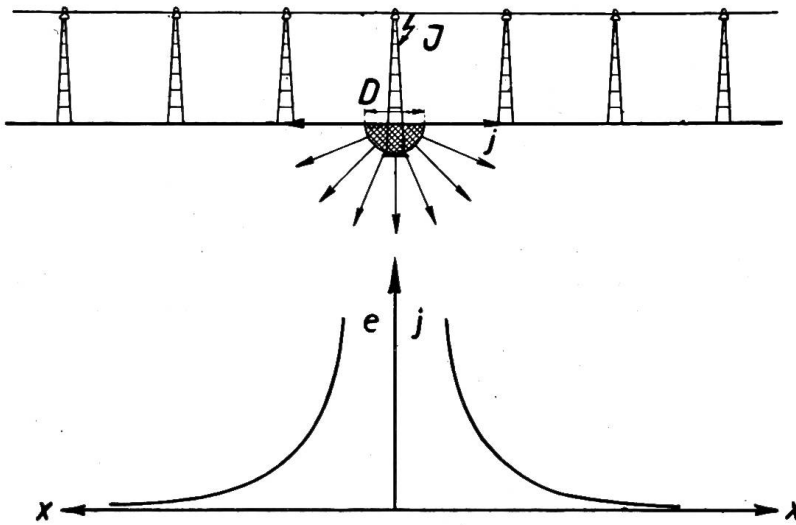


Fig. 2

Bei allseitig gleichmässiger Ausbreitung des Stromes ist auf jeder Halbkugelfläche, die im Erdinnern um den Eintrittspunkt geschlagen wird, die gleiche Stromdichte j vorhanden. Der Gesamtstrom ist daher für jeden Abstand x vom Mastfuss

$$J = 2 \pi x^2 j \quad (1)$$

Die Stromdichte ist daher:

$$j = \frac{J}{2 \pi x^2} \quad (2)$$

und die elektrische Feldstärke, das ist die Spannung pro Längeneinheit

$$e = \varrho j = \frac{\varrho J}{2 \pi x^2} \quad (3)$$

Wir wollen für unsere Berechnung annehmen, der Strom trete durch eine gut leitende, in die Erdoberfläche versenkte Halbkugel vom Durchmesser D an Stelle des Mastfusses ein. Das entspricht der Wirklichkeit zwar nicht genau, jedoch kann man durch einfache Messungen für jede Elektrodenform leicht den gleichwertigen Kugeldurchmesser feststellen. Die durch den Erdwiderstand des Stromes J hervorgerufene Spannung E am Mast gegenüber einem beliebigen Punkte im Innern oder an der Oberfläche der Erde mit der Entfernung x ist dann:

$$E = \int_{\frac{D}{2}}^x e dx = \frac{\varrho J}{2 \pi} \int_{\frac{D}{2}}^x \frac{dx}{x^2} = \frac{\varrho J}{2 \pi} \left[\frac{2}{D} - \frac{1}{x} \right] \quad (4)$$

Für Entfernungen, die gross sind gegenüber dem Eintritts-Kugeldurchmesser verschwindet das zweite Klammernglied gegenüber dem ersten. Man erhält dann:

$$E = \frac{\varrho J}{\pi D} = R J \quad (5)$$

Darin ist

$$R = \frac{\varrho}{\pi D} \quad (6)$$

eine Grösse, die *unabhängig vom Strom und von der Entfernung x ist und nur durch den spezifischen Widerstand der Erde und den Eintritts-Kugeldurchmesser gegeben ist*. Man nennt sie den Ausbreitungswiderstand oder Uebergangswiderstand der Erdung.¹⁾

¹⁾ Seine Grössenordnung ist für feuchten Boden $\varrho = 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$; vergl. *M. Abraham*, *Physikal. Zeitschrift* 1919, Bd. 20, Seite 145.

¹⁾ *G. Kirchoff*, *Vorlesungen über theoret. Physik*, Bd. III., Seite 125.
Kalender für Elektrotechniker, 1915, Seite 76.

Für jede beliebige Form der Erdelektrode ist die Spannung gegenüber weit entfernten Punkten und daher der Uebergangswiderstand durch eine ähnliche Formulierung gegeben. Er ist stets proportional dem spezifischen Leitungswiderstand ρ des Erdbodens und umgekehrt proportional der Hauptabmessung z. B. D der Elektrode. So erhält man beispielsweise für kreisförmige Platten vom Durchmesser d , die auf dem Erdboden liegen, den Uebergangswiderstand ¹⁾

$$r = \frac{\rho}{2d} \quad (7)$$

Schreitet ein Mensch oder ein Tier entsprechend Fig. 3 die Umgebung der Erdschlussstelle ab, so erhält er vom Erdboden her Spannung aufgedrückt, die ihn unter Umständen beschädigen kann. Nennt man die Schrittweite s , so ist die *Schrittspannung* das Linienintegral der Feldstärke über die Schrittweite, also mit Gleichung (3)

$$e_s = \int_x^{x+s} e \, dx = \frac{\rho J}{2\pi} \int_x^{x+s} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho J}{2\pi} \frac{s}{x(x+s)} \quad (8)$$

Für Entfernungen vom Mast, die gross gegen die Schrittweite sind, nimmt die Schrittspannung nach der Näherungsformel

$$e_s = \frac{\rho J}{2\pi} \frac{s}{x^2} \quad (9)$$

umgekehrt wie das Quadrat der Entfernung ab. In der Nähe des Mastes kann sie bis zu einem Höchstwert ansteigen, der durch $x = \frac{D}{2}$ gegeben ist zu

$$\bar{e}_s = \frac{2}{\pi} \frac{s}{D(D+2s)} \rho J \quad (10)$$

Die Schrittspannung ist ausser vom Erdstrom und der Mastentfernung noch abhängig von der Schrittweite und dem spezifischen Widerstand der Erde und wird um so stärker, je grösser diese beiden Werte sind.

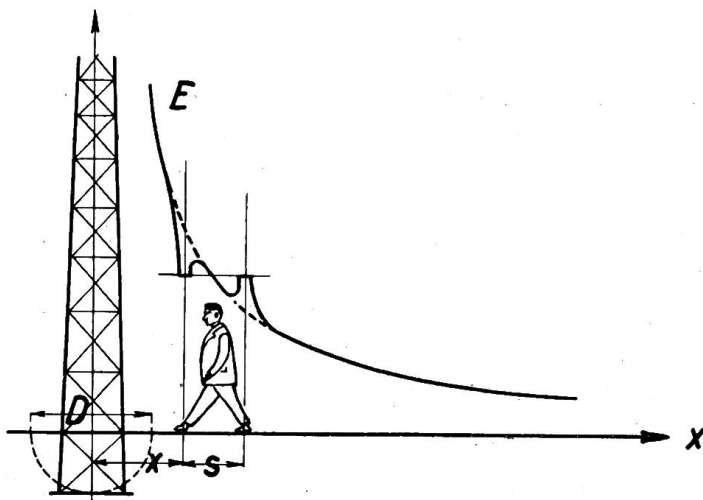


Fig. 3

Für die Gefährdung der Lebewesen kommt nun aber in Wirklichkeit nicht die Grösse der Spannung in Betracht, sondern der Strom, der den Körper durchfliesst. Derselbe hängt erheblich vom Leitungswiderstande des Körpers ab, dessen Grösse sehr variabel ist. Wir wollen den gefährlichsten Fall betrachten, dass der Körperwiderstand gleich Null ist, so dass unter der Wirkung der Schrittspannung der denkbar grösste Strom durch den Körper fliesst. Dieser *Kurzschlussstrom* beeinflusst natürlich die Spannungsverteilung in der

Umgebung der Fusspunkte, und zwar muss er sich so gross einstellen, dass unter der Wirkung seines eigenen Feldes und des vom Mast ausgehenden Erdstromfeldes die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Fusspunkten gleich Null wird.

¹⁾ G. Kirchoff, Vorlesungen über theoret. Physik, Bd. III, Seite 125.
Kalender für Elektrotechniker, 1915, Seite 76.

Wenn wir zur Vereinfachung der Anschauung die Fusspunkte als Kreisplatten vom Durchmesser d auffassen der klein gegenüber der Schrittweite sein möge, so verteilt sich der Strom jedes Fusses nach ganz ähnlichen Gesetzen wie der Maststrom im Erdboden und besitzt unter jedem Fuss einen Ausbreitungswiderstand nach Gleichung (7), durch dessen Wirkung der Spannungsverlauf unter den Füßen so gehoben oder gesenkt wird, dass kein Spannungsunterschied zwischen den Füßen mehr besteht. In Fig. 3 sind diese Verhältnisse dargestellt.

Da der Kurzschlussstrom i durch den Körper in den beiden Ausbreitungswiderständen r zusammengenommen der ursprünglichen Schrittspannung e_s das Gleichgewicht halten muss, so ist seine Grösse gegeben durch die Bedingung

$$2 r i_s = e_s \quad (11)$$

Er wird also nach Einsetzen von Gleichung (7) und (8)

$$i_s = \frac{d s}{x(x+s)} \frac{J}{2\pi} \quad (12)$$

Das Verhältnis dieses gefährlichsten Körperstromes zum Erdstrom des Mastes hängt also lediglich ab von der Schrittweite s , dem gleichwertigen Fussplattendurchmesser d und der Entfernung x vom Mastmittelpunkt. Es ist dagegen gänzlich unabhängig von der Leitfähigkeit des Erdbodens. Für Mastentfernungen, die gross gegen die Schrittweite sind, erhält man wieder die Näherungsformel

$$\frac{i_s}{J} = \frac{1}{2\pi} \frac{d s}{x^2} \quad (13)$$

Für Berührung des einen Fusses mit dem gleichwertigen Mastfuss-Durchmesser D erhält man

$$\frac{i_s}{J} = \frac{2}{\pi} \frac{d s}{D(D+2s)} \quad (14)$$

Wenn der Strom nicht durch beide Füße in den Körper ein- und austritt, sondern wenn man in Schrittweite vom Mast steht und denselben mit der Hand berührt, so kann man deren Uebergangswiderstand zum eisernen Mast vernachlässigen, so dass der Kurzschlussstrom nur durch einen einzigen Fusswiderstand bestimmt wird. In Gleichung (11) fällt dann der Faktor 2 fort und man erhält für Mastberührung mit der Hand den doppelten Strom der Gleichung (14). Steht man dabei nicht nur mit einem, sondern mit beiden Füßen um die Schrittweite vom Mast entfernt, so wird der den Körper durchfliessende Strom wegen des verringerten Fusswiderstandes sogar noch grösser. In all diesen Fällen kann jedoch andererseits der *Eigenwiderstand des Körpers* eine gewisse Abschwächung bewirken. Man kann dieselbe berücksichtigen, indem man den Strom nach diesen Formeln noch verringert im Verhältnis des Ausbreitungswiderstandes beider Füße zum Gesamtwiderstand von Körper und Füßen. Genaue Zahlenwerte hierfür sind aber schwer zu bestimmen.

Für einen gleichwertigen Mastfussdurchmesser ¹⁾ von $D = 2$ m, eine Schrittweite $s = 1$ m und einen gleichwertigen Fussplattendurchmesser $d = 0,2$ m erhält man für den Fall der Gleichung (14) einen höchstmöglichen Körperstrom von

$$\frac{i_s}{J} = \frac{1}{20\pi} = 1,6\% \quad (15)$$

¹⁾ Nach einigen Messungen an Modellen kann man für den gleichwertigen Fussdurchmesser eines vollen quadratischen Mastes mit der Seitenlänge a und der Eindringungstiefe b in den Erdboden setzen:

$$D = 1,72 \sqrt{ab}$$

während man für den gleichwertigen Durchmesser eines menschlichen Fusses von der Fläche f den des flächengleichen Kreises annehmen darf, also:

$$d = 1,13 \sqrt{f}$$

Sieht man einen Körperstrom von 0,1 Amp. als tödlich an, so muss der Erdschlussstrom im Maste unterhalb 6,3 Amp. bleiben.

Bisher haben wir angenommen, dass der spezifische Leitungswiderstand ρ der Erde in der näheren und weiteren Umgebung des geerdeten Mastes an jeder Stelle der Oberfläche und der Tiefe den gleichen Wert besitzt. Dies ist nun in Wirklichkeit nie der Fall. Im allgemeinen sind in der Nähe der Erdoberfläche *Schichten verschiedener Leitfähigkeit* vorhanden, die bewirken, dass der Strom sich nicht mehr so gleichförmig verteilt, wie es in Fig. 1 und Gleichung (2) angesetzt wurde. Sehr häufig leitet die Schicht unmittelbar an der Erdoberfläche den Strom wesentlich schlechter als die tieferen Schichten, die stärker vom Grundwasser durchsetzt sind. Der Strom fliesst dann vom Mastfuss aus zum grösseren Teil nach unten in die gut leitenden Schichten und nur ein geringerer Teil, als bisher berechnet, bleibt an der Erdoberfläche haften. Die Schrittspannung und damit auch der gefährliche Körperstrom kann dadurch erheblich verringert werden. Es treten aber auch Fälle ein, in denen die Schichten der Leitfähigkeit umgekehrt verlaufen. Beispielsweise kann sich in einem gewissen Abstand unter der Oberfläche eine nicht leitende Horizontalschicht befinden. Der Erdstrom kann dann nur in der mehr oder weniger gut leitenden Oberschicht von begrenzter Tiefe fließen und entwickelt hier eine Stromdichte und damit ein Spannungsgefälle, das grösser ist, als es den bisherigen Gleichungen entspricht, so dass die Gefährdung der Lebewesen an der Erdoberfläche steigt. Besonders ungünstig liegen die Verhältnisse, wenn nur die *äusserste Schicht der Oberfläche durch kräftige Regenschauer stark durchfeuchtet ist* und verhältnismässig hohe Leitfähigkeit besitzt, während sich darunter eine dickere schlecht leitende Bodenschicht, etwa von ausgetrocknetem Sande, befindet. Der Erdstrom konzentriert sich dann zum grossen Teil an der gut leitenden Erdoberfläche.

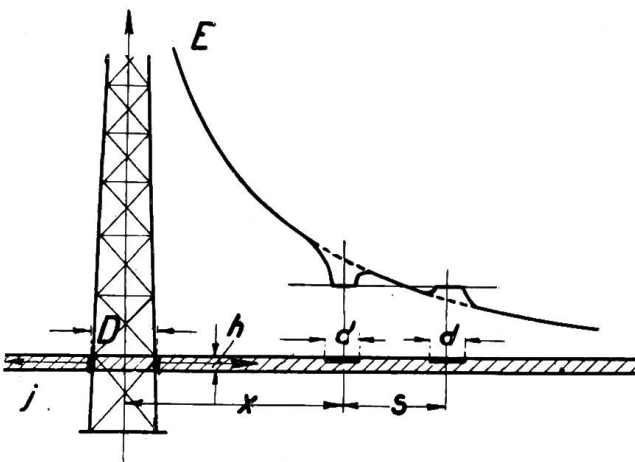


Fig. 4

b) Oberflächenwirkung.

Wir wollen den gefährlichsten Grenzfall betrachten, dass nur *eine dünne Oberflächenschicht* von der Stärke h leitend ist, während der Widerstand der darunter liegenden Erdmasse so gross sein möge, dass

zum mindesten in der Gefahrzone, der näheren Umgebung des Mastes, keine erhebliche Strommenge in sie übertritt. Der Erdstrom des Mastes breitet sich dann in dieser leitenden Schicht radial vom Maste aus, wie dies in Fig. 4 dargestellt ist. Auf jedem Kreis an der Erdoberfläche um den Mastfuss herum herrscht dann die gleiche Stromdichte. Der Gesamtstrom ist daher für den Abstand x vom Mastmittelpunkt

$$J = 2 \pi x \cdot h \cdot j \tag{16}$$

Die Stromdichte ist daher

$$j = \frac{J}{2 \pi h x} \tag{17}$$

Sie nimmt ebenso wie auch die elektrische Feldstärke

$$e = \rho j = \frac{\rho J}{2 \pi h x} \tag{18}$$

umgekehrt wie die *erste Potenz* der Entfernung x ab, *also wesentlich langsamer als bei gleichförmigem Erdwiderstande*, wo die Abnahme nach der zweiten Potenz der Entfernung erfolgt.

Wenn wir den Mastfuss für den Stromübergang zur leitenden Erdschicht durch einen gleichwertigen Kreiszyylinder vom Durchmesser D ersetzt denken, so ist die durch den Erdstrom J hervorgerufene Spannung E am Mast gegenüber einem beliebigen Punkt der Erdoberfläche mit der Entfernung x

$$E = \int_{\frac{D}{2}}^x e \, dx = \frac{\rho J}{2\pi h} \int_{\frac{D}{2}}^x \frac{dx}{x} = \frac{\rho J}{2\pi h} \ln\left(\frac{2x}{D}\right) \quad (19)$$

Diese Spannung wird selbst für grosse Entfernungen *niemals konstant*, sondern wächst logarithmisch weiter an. Ein bestimmter Ausbreitungswiderstand eines *einzelnen* Mastes, der sich bei Tiefenwirkung des Stromes ergab, lässt sich daher bei Oberflächenverlauf des Stromes nicht mehr angeben. Der Widerstand hängt vielmehr hier von der Grösse des gesamten Spannungsfeldes ab.

Legt man jedoch nicht nur eine, sondern zwei Elektroden, etwa zwei Kreisplatten vom Durchmesser d , an die leitende Oberfläche, die die Entfernung s haben mögen, wodurch sich zwei Füsse in Schrittweite darstellen lassen, durch die der gleiche Strom ein- und austritt, so ergibt sich natürlich ein bestimmter Uebergangs- und Ausbreitungswiderstand. Man findet auf ähnliche Weise wie bei der letzten Gleichung für beide Elektroden zusammen

$$2r = \frac{\rho}{\pi h} \ln\left(\frac{2s}{d}\right) \quad (20)$$

sofern s gross im Vergleich zu d ist.

Dieser Widerstand ist nicht wie der Ausbreitungswiderstand nach Gleichung (7) bei Tiefenwirkung des Stromes nur durch den Erdwiderstand ρ und Plattendurchmesser d gegeben, sondern er hängt auch von der Stärke h der leitenden Schicht und vor allem von der Entfernung s der beiden Plattenelektroden in starkem Masse ab und wird selbst bei sehr grossen Plattenabständen nicht konstant.

Obwohl die Spannung E am Mast nach Gleichung (19) sich nicht bestimmen lässt, ohne zu wissen bis zu welchen Entfernungen x sich der Strom in der Oberflächenschicht ausbreitet, können wir das *Spannungsgefälle*, das der Erdstrom J in der Umgebung des Mastes hervorruft, nach Gleichung (18) doch berechnen. Die *Schrittspannung* zwischen zwei Füßen im Abstände x und $x + s$ ergibt sich daraus zu

$$e_s = \int_x^{x+s} e \, dx = \frac{\rho J}{2\pi h} \int_x^{x+s} \frac{dx}{x} = \frac{\rho J}{2\pi h} \ln\left(1 + \frac{s}{x}\right) \quad (21)$$

Man kann den Logarithmus in einer Reihe entwickeln und erhält für grosse Entfernungen vom Mast unter Vernachlässigung der Glieder mit höheren Potenzen als Näherungsformel für die Schrittspannung

$$e_s = \frac{\rho J}{2\pi} \frac{s}{hx} \quad (22)$$

Da die Oberflächenschichtdicke h klein ist, so erkennt man durch Vergleich dieser Beziehung mit Gleichung (9), dass in erheblichen Entfernungen vom Mast bei Oberflächenleitung eine viel grössere Schrittspannung entsteht als bei Tiefenleitung.

Der grösstmögliche Körperstrom ist wieder der Kurzschlussstrom, der sich bei widerstandsloser Verbindung der beiden Fussplatten unter der Wirkung dieser Schrittspannung entwickelt. Er berechnet sich auch hier nach Gleichung (11) in Verbindung mit (20) und (21) zu

$$i_s = \frac{e_s}{2r} = \frac{\ln\left(1 + \frac{s}{x}\right)}{\ln \frac{2s}{d}} \frac{J}{2} \quad (23)$$

Das Verhältnis dieses gefährlichsten Körperstromes zum Erdstrom des Mastes hängt auch hier lediglich von geometrischen Längenverhältnissen ab, nämlich von dem Verhältnis Schrittweite zum Mastabstand und Schrittweite zum Fussdurchmesser. Es ist dagegen völlig unabhängig von der Dicke und dem spezifischen Widerstand der leitenden Oberflächenschicht. Für sehr grosse Entfernungen vom Mast erhält man als Näherungsformel für das Stromverhältnis nach Gleichung (22)

$$\frac{i_s}{J} = \frac{1}{2} \frac{s}{x \cdot \ln\left(\frac{2s}{d}\right)} \quad (24)$$

Für Berührung des einen Fusses mit dem Mastfussdurchmesser D erhält man

$$\frac{i_s}{J} = \frac{1}{2} \frac{\ln\left(1 + \frac{2s}{D}\right)}{\ln\left(\frac{2s}{d}\right)} \quad (25)$$

Eine direkte Berührung des Mastes mit den Händen vergrössert den Körperstrom noch weiter, während der tatsächlich stets vorhandene Körperwiderstand den Strom verkleinert. Durch Vergleich des Körperwiderstandes mit dem Fusswiderstand nach Gleichung (20) kann man unter Umständen auch hier das Mass der Verringerung abschätzen.

Der Logarithmus im Nenner der letzten drei Formeln wird nur durch Schrittweite und Fussgrösse des Menschen bestimmt. Für eine Schrittweite $s = 1$ m und einen gleichwertigen Fussplattendurchmesser $d = 0,2$ m erhält man den Logarithmus zu 2,3. Nimmt man auch hier einen gleichwertigen Mastfussdurchmesser von $D = 2$ m an, so erhält man für den Fall der Gleichung (25) einen höchstmöglichen Körperstrom von

$$\frac{i_s}{J} = \frac{\ln 2}{2 \ln 10} = 15\% \quad (26)$$

Dies ist ein ausserordentlich hoher Betrag, der fast das zehnfache des in Gleichung (15) für die Tiefenausbreitung berechneten Körperstromes darstellt. Er wird bedingt durch vollständige Flächenkonzentration des gesamten Maststromes an der Erdoberfläche, durch die die Gefährdung von Lebewesen auf ein hohes Mass gebracht werden kann.

Bei einphasigem Erdschluss von Wechselstromleitungen entwickeln sich Erdströme, die durch die Kapazität der anderen gesunden Phasenleitungen ins Netz zurückfliessen müssen. Sie sind daher proportional der Leitungskapazität und können im allgemeinen nur mässige Werte erreichen, die meist unter 50 Amp. liegen. Dennoch können, wie die vorausgehenden Rechnungen zeigen, schon hierbei starke Gefährdungen eintreten. Ausserordentlich starke Erdströme treten jedoch dann auf, wenn gleichzeitig zwei Erdschlüsse in verschiedenen Phasen des Netzes eintreten. Dann ist nämlich die volle Netzspannung nur über die Erdwiderstände zweier Masten und die Induktanz der Leitungen kurzgeschlossen. Dabei entwickeln sich ausserordentlich grosse plötzliche und dauernde Kurzschlussströme, deren Grösse im allgemeinen ein Vielfaches der Kapazitätsströme ist. Sie können so stark sein, dass sie sogar die Feuchtigkeit in der Nähe der Masten zum Verdampfen bringen und die Erdoberfläche im weiten Umkreise von den Erdungsstellen unter gefährliche Spannungen setzen können.

(Fortsetzung folgt.)