Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 42 (1951)

Heft: 2

Artikel: Vorausberechnung der Masse, der Form und der Anordnung der Erdelektroden bei der Erstellung von Erdungsanlagen

Autor: Wettstein, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1056841

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: 14.12.2025

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

42e année N° 2 Samedi, le 27 Janvier 1951

BULLETIN

DE L'ASSOCIATION SUISSE DES ELECTRICIENS

Vorausberechnung der Masse, der Form und der Anordnung der Erdelektroden bei der Erstellung von Erdungsanlagen

Von *M. Wettstein*, Zürich

621.316.99

Es werden Methoden angegeben, die die Vorausberechnung der Erdelektroden elektrischer Anlagen bezüglich ihrer Masse, ihrer Formen und ihrer Anordnungen auf einfache Art ermöglichen. Dabei wird darauf hingewiesen, dass sich der Erdwiderstand im Laufe der Jahreszeiten wesentlich ändert und dieser Umstand bei der Berechnung der Elektroden berücksichtigt werden muss. Die Umrechnung eines zu einem bestimmten Zeitpunkt gemessenen Erdwiderstandes auf den zu erwartenden Höchstwert wird mit Hilfe eines Kalenders ermöglicht. Da die Einhaltung eines vorgeschriebenen Erdwiderstandes aus wirtschaftlichen und technischen Gründen nicht möglich ist, kann die Spannungsverteilung an der Erdoberfläche durch eine entsprechende Formgebung und Anordnung der Elektrode derart gesteuert werden, dass weder die Berührungs- noch die Schrittspannungen die als maximal zulässig angenommenen Werte überschreiten. Im weiteren wird auf die Veränderung des Erdwiderstandes beim Stromfluss durch die Erde hingewiesen und wird gezeigt, wie die Oberflächen der Elektroden für die Einhaltung der maximal zulässigen Erwärmung der Erde berechnet werden können. Schliesslich wird noch auf die gegenseitige Beeinflussung der am gleichen Ort erstellten Erdungen, die verschiedenen Zwecken dienen, hingewiesen.

L'auteur indique des méthodes qui permettent de déterminer très simplement la masse, la forme et la disposition des électrodes destinées à la mise à la terre d'installations électriques. La résistance de la terre varie considérablement selon les saisons et il est nécessaire d'en tenir compte dans le calcul des électrodes. Un calendrier permet de déterminer la valeur maximum probable de la résistance de terre, en partant de la valeur mesurée à une certaine date. Le maintien d'une résistance prescrite n'est guère possible, pour des raisons d'ordre économique et technique, mais, grâce à une forme et à une disposition appropriées de l'électrode, la distribution du potentiel à la surface du sol peut être ordonnée de telle sorte que les tensions de contact et de pas ne dépassent pas les valeurs maximum admissibles. L'auteur rappelle en outre que la résistance de terre est modifiée par le passage de courant dans le sol et il montre comment les surfaces des électrodes peuvent être calculées, afin que l'échauffement du sol ne dépasse pas la valeur maximum admissible. Pour terminer, il signale les effets réciproques exercés par des électrodes installées au même endroit et servant à des buts différents.

Einleitung

Beim Auftreten von Isolationsfehlern in elektrischen Anlagen oder an elektrischen Anschlussobjekten können unter Umständen für Menschen und Tiere gefährliche Zustände entstehen, indem zwischen den normalerweise nicht unter Spannung stehenden Metallteilen und der Umgebung gefährliche Spannungen auftreten können. Es muss deshalb dafür gesorgt werden, dass solche Zustände nur äusserst kurze Zeit dauern, oder dass die auftretenden Spannungen keine gefährlichen Werte annehmen. Zur Erfüllung der zweiten Forderung werden die normalerweise nicht unter Spannung stehenden Anlageteile und bei Anwendung des «Schutzerdungssystems» in den Hausinstallationen die normalerweise nicht unter Spannung stehenden Metallteile der Anschlussobjekte geerdet, d. h. mit einer in der Erde verlegten Elektrode verbunden. Ausserdem werden auch die Systemnullpunkte der Niederspannungsnetze, sowie die Überspannungsableiter geerdet. Damit diese Erdungen ihren Zweck erfüllen, müssen sie verschiedenen Anforderungen genügen:

A. Bei jeder Vorausberechnung einer Erdung muss der spezifische Widerstand der Erde am Verlegungsort bekannt sein, d. h. gemessen werden [1]). Da sich der Erdwiderstand je nach Temperatur und Feuchtigkeit der Erde ändert, und jede Erdung auch unter den ungünstigsten Widerstandsverhältnissen ihrer Anforderung genügen muss, so müssen die gemessenen spezifischen Widerstände auf ihren Höchstwert, in gewissen Fällen auch auf den niedrigsten Wert umgerechnet werden.

B. Ist die Messung des spezifischen Widerstandes am Verlegungsort und die Umrechnung auf die Grenzwerte vorgenommen worden, so kann die erforderliche Elektrodendimension für die Einhaltung eines bestimmten Erdwiderstandes mit Hilfe der in der Literatur bekanntgegebenen Formeln berechnet werden. Dabei zeigt es sich aber, dass in vielen Fällen die Elektroden ausserordentlich grosse Dimensionen annehmen müssten, wobei ihre Verlegung auf technische Schwierigkeiten stossen würde, und die Erstellungskosten dem Betriebsinhaber der An-Anlage nicht mehr zugemutet werden könnten. Für solche Fälle schreiben die Starkstromvorschriften vor, dass andere zur Verhütung von Unfällen geeignete Massnahmen zu treffen seien. Als eine solche Massnahme kommt in Betracht, den Elektroden solche Formen zu geben und sie derart zu verlegen, dass zwischen dem zu erdenden Objekt und der Erdoberfläche im Berührungsbereich keine gefährliche Spannung (Berührungsspannung) entstehen kann. Dabei muss aber darauf geachtet werden, dass die Objekte nicht mit Metallteilen (eiserne Zäune, Spanndrähte usw.) verbunden sind, die die Wirkung

[1]) siehe Bemerkung am Schluss.

der Erdung herabsetzen könnten. Ausserdem ist zu beachten, dass bei solchen Erdungen keine gefährlichen Schrittspannungen entstehen. In den Starkstromvorschriften ist aber die maximal zulässige Berührungsspannung nicht eindeutig festgelegt. Es wird lediglich für bestimmte Fälle auf eine solche von 50 V hingewiesen. Die Schrittspannung ist in den Vorschriften überhaupt nicht erwähnt. Wie aber aus verschiedenen Unfällen hervorgeht, kann die Schrittspannung eine ausschlaggebende Rolle spielen. Bei der Anwendung der soeben genannten Schutzmassnahmen muss man deshalb, solange in den Vorschriften keine Angaben enthalten sind, diese Grenzspannungen nach eigenem Gutdünken wählen. Für die nachstehenden Berechnungen wurde von den Elektrizitätswerken des Kantons Zürich (EKZ) die maximal zulässige Berührungsspannung mit 50 V und die maximal zulässige Schrittspannung mit 20 V für eine Schrittlänge von einem Meter angenommen.

C. Da über die Erdungen unter Umständen während längerer Zeit beträchtliche elektrische Ströme fliessen, die die Erde in der näheren Umgebung der Elektroden erwärmen und damit den Widerstand der Erdung ändern, so müssen bei der Vorausberechnung der Elektroden auch diese Zustände berücksichtigt werden, d. h. es müssen die Elektrodenoberflächen für die maximal zulässige Erwärmung der Erde berechnet werden.

D. Werden an einem Ort Erdungen erstellt, die verschiedenen Zwecken dienen, so muss dafür gesorgt werden, dass die an einer Erdungsstelle auftretende Spannung nicht oder nur in ungefährlichem Masse auf die andern Erdungsstellen übertragen wird. Zur Erfüllung dieser Bedingung müssen die verschiedenen Elektroden in einem bestimmten minimalen Masse voneinander distanziert werden.

E. Schliesslich schreiben die Starkstromvorschriften vor, dass die Elektroden eine minimale Oberfläche von 0,5 m² und bei Bandelektroden einen minimalen Querschnitt von 90 mm² aufweisen müssen.

Alle folgenden Berechnungen und Darstellungen, die für die Einhaltung der genannten Anforderungen nötig sind, stützen sich auf die seinerzeit von den EKZ unter der Leitung des Verfassers durchgeführten sehr umfangreichen und zum Teil sich über mehrere Jahre erstreckenden Versuche.

Da langgestreckte Elektroden wesentlich kleinere Erdwiderstände ergeben als Plattenelektroden von gleich grosser Oberfläche, so wurden die Versuche und es werden die folgenden Berechnungen auf Elektroden mit dem minimal zulässigen Querschnitt, also auf Bandelektroden von 3 × 30 mm Querschnitt beschränkt (der Erdwiderstand einer quadratischen Plattenelektrode von 0,5 m² Oberfläche ergibt bei einer Eingrabtiefe von einem Meter einen rund dreimal so grossen Erdwiderstand wie eine Bandelektrode von gleicher Oberfläche).

A. Ermittlung der Witterungseinflüsse auf die Erdwiderstände

Wie in der Einleitung angedeutet wurde, sind die Erdwiderstände sowohl von der Temperatur, als auch von der Feuchtigkeit der Erde abhängig. Da aber die Temperaturverhältnisse nicht überall die gleichen sind und die Änderung der Bodenfeuchtigkeit je nach Beschaffenheit der Erde von den Niederschlagsmengen verschiedenartig beeinflusst wird, und ausserdem die Änderung des Erdwiderstandes bei gleichen Feuchtigkeitsänderungen nicht bei allen Bodenarten die gleiche sein wird, so würde eine *genaue* Untersuchung aller dieser Verhältnisse ausserordentlich umfangreich werden. Da zudem der Erdboden, in welchem die Elektroden verlegt werden, in vielen Fällen als ein Gemisch verschiedener Erdarten aufzufassen ist, so ist in solchen Fällen eine genaue Untersuchung überhaupt nicht möglich. Um nun trotz alledem doch wenigstens die Grössenordnung der Widerstandsänderungen kennen zu lernen, führten die EKZ über einen Zeitraum von mehreren Jahren Versuche durch.

Der Boden, in welchem die Elektroden eingegraben wurden, bestand aus mit Humus überdecktem Moräneschutt, d. h. aus einer mit Steinen durchsetzten Erde. In tieferen Lagen stellte man Grundwasser fest. Es wurden Elektroden in 50, 100, 150 und 200 cm Tiefe horizontal verlegt. Die am tiefsten verlegte Elektrode lag dauernd im Grundwasser. Ausser den Erdwiderständen der verschiedenen Elektroden wurden die Niederschlagsmengen, die Lufttemperaturen, die Bodentemperaturen in einem Meter Tiefe und die Grundwasserstände täglich registriert.

Eine Aufzeichnung der in 1 m Tiefe gemessenen Bodentemperaturen in Abhängigkeit von der Jahreszeit ergab eine gut ausgeglichene Kurve mit einem Minimum von 1,5 °C im Monat Februar und einem Maximum von 14,5 °C anfangs August. Um die Widerstände der einzelnen Elektroden und die in Betracht kommenden Veränderungen miteinander vergleichen zu können, wurden die Widerstände in Prozente der Höchstwerte umgerechnet. In der Aufzeichnung der so umgerechneten Widerstände in Abhängigkeit von der Jahreszeit konnten zwei Grenzkurven eingetragen werden, wobei die obere Kurve die Werte nach längerer Trockenheit und die untere Kurve die Werte nach Regenperioden ergaben. Beide Kurven haben ihre Höchstwerte im Februar und die niedrigsten Werte anfangs August, also gerade umgekehrt wie die Bodentemperaturen. Ferner zeigte es sich, dass die Widerstandskurve der im Grundwasser liegenden Elektrode, die ja nur von der Temperatur des Grundwassers abhängig sein kann, mit der Kurve der 1 m und tiefer verlegten Elektroden nach Trockenperioden gut übereinstimmt. Es zeigt dies, dass der Feuchtigkeitsgehalt der Erde in mindestens 1 m Tiefe nach Trockenperioden angenähert konstant bleibt, und die Widerstandsänderung nur von der Bodentemperatur abhängig ist. Die Differenz der beiden Kurven stellt somit den Einfluss der Bodenfeuchtigkeits-Änderung dar. Die Widerstände, die nach Trockenperioden gemessen wurden, schwankten zwischen 100 und 72 % und die nach Regenperioden gemessenen zwischen 78 und 49 % der Höchstwerte. Die in nur 50 cm Tiefe verlegten Elektroden zeigen wesentlich

grössere Widerstandsschwankungen (100...60 % bzw. 78...43 %). Diese Erscheinung rührt offenbar von grösseren Temperaturschwankungen der Erde in der Nähe der Oberfläche her.

Auf Grund dieser Versuche wurde nun ein Kalender aufgestellt, aus welchem für jede beliebige Jahreszeit diejenigen Faktoren abgelesen werden können, mit denen die Messergebnisse multipliziert werden müssen, um die höchstvorkommenden Widerstände zu erhalten. Um die niedrigsten Widerstandswerte zu erhalten, sind die Höchstwerte durch zwei zu dividieren. Der Kalender nach Tabelle I gilt nur für Elektroden, die mindestens 1 m tief eingegraben sind. Die in der ersten Kolonne eingetragenen Faktoren sind zu gebrauchen, wenn die Widerstände nach ausgesprochenen Regenperioden und diejenigen der zweiten Kolonne, wenn die Messungen nach Trockenperioden gemessen werden. Liegen die Elektroden im Grundwasser, so sind immer die Faktoren der zweiten Kolonne zu benützen.

Kalender für die Umrechnung der gemessenen Erdwiderstände

Tabelle I

Datum			Faktoren bei nassem Wetter	Faktoren bei trockenem Wetter	Datum			Faktoren bei nassem Wetter	Faktoren bei trockenem Wetter
1. Januar	bis	7. Januar	1,33	1,04	2. Juli	bis	8. Juli	1,88	1,33
6. »	»	14. »	1,31	1,03	9. »	»	15. »	1,92	1,35
15. »	»	21. »	1,30	1,01	16. »	»	22. »	2,00	1,37
22. »	»	28. »	1,28	1,01	23. »	»	29. »	2,01	1,39
29. »	»	4. Februar	1,28	1,00	30. »	»	5. August	2,04	1,41
5. Februar	»	11. »	1,27	1,00	6. August	»	12. »	2,04	1,41
12. »	»	18. »	1,27	1,00	13. »	»	19. »	2,04	1,41
19. »	»	25. »	1,28	1,01	20. »	»	26. »	2,00	1,39
26. »	»	4. März	1,30	1,01	27. »	»	2. September	1,96	1,38
5. März	»	11. »	1,31	1,02	3. September	»	9. »	1,94	1,37
12. »	»	18. »	1,33	1,03	10. »	»	16. »	1,92	1,35
19. »	»	25. »	1,35	1,04	17. »	»	23. »	1,85	1,32
26. »	»	1. April	1,39	1,05	24. »	»	30. »	1,82	1,30
2. April	»	8. »	1,41	1,06	1. Oktober	»	7. Oktober	1,77	1,28
9. »	»	15. »	1,43	1,08	8. »	»	14. »	1,74	1,26
16. »	»	22. »	1,47	1,10	15. »	»	21. »	1,70	1,24
23. »	»	29. »	1,49	1,12	22. »	»	29. »	1,66	1,22
30. »	»	6. Mai	1,53	1,13	30. »	»	4. November	1,64	1,21
7. Mai	»	13. »	1,56	1,15	5. November	»	11. »	1,60	1,18
14. »	»	20. »	1,58	1,17	12. »	»	18. »	1,56	1,16
21. »	»	27. »	1,61	1,19	19. »	»	25. »	1,53	1,13
28. »	»	3. Juni	1,66	1,21	26. »	»	2. Dezember	1,49	1,12
4. Juni	»	10. »	1,69	1,23	3. Dezember	»	9. »	1,47	1,11
11. »	»	17. »	1,72	1,25	10. »	»	16. »	1,43	1,09
18. »	»	24. »	1,79	1,27	17. »	»	23. »	1,41	1,06
25. »	»	1. Juli	1,82	1,30	24. »	»	31. »	1,36	1,05

Dieser Kalender gilt streng genommen nur für den Versuchsort (Unterwerk Thalwil der EKZ) und für Orte mit gleichen Temperatur- und Niederschlagsverhältnissen und bei gleicher Bodenart. Da aber die Vorausberechnung der Elektrodenabmessungen auch aus anderen Gründen, wie noch gezeigt werden wird, keine absolut genaue Sache sein kann, und man deshalb ohnedies mit gewissen Sicherheitsfaktoren rechnen muss, so kann der Kalender auch für andere Orte mit einigermassen ähnlichen Verhältnissen benützt werden. So wird er z. B. von den EKZ für ihr ganzes Absatzgebiet mit gutem Erfolg angewendet. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Durchlässigkeit des Bodens einen wesentlichen Einfluss auf die Bodenfeuchtigkeit auszuüben vermag. So wird z. B. ein Kiesboden viel rascher austrocknen als ein Lehmboden. Man sollte deshalb wenn immer möglich bei trockenem Wetter Widerstandsmessungen vornehmen und dann für die Umrechnung der Widerstände die Faktoren der zweiten Kolonne des Kalenders benützen. Ausserdem sollten in Zweifelsfällen Nachkontrollen im Winter bei trockenem Wetter vorgenommen werden. Ferner ist noch zu bemerken, dass die Messungen an frisch verlegten Elektroden in der Regel etwas grössere Widerstandswerte ergeben als die, welche dem Endzustand entsprechen. Auch ist der Einfluss der Niederschläge auf die Erdwiderstände bei frisch verlegten Elektroden wesentlich grösser als bei den vor längerer Zeit verlegten. Die Versuche am Messort zeigten, dass es ein bis zwei Jahre dauert, bis der endgültige Zustand eintritt.

B. Ermittlung der Erdwiderstände und der Spannungsverteilung an der Erdoberfläche für die verschiedenen Elektroden-Abmessungen, -Formen und -Verlegungsarten

Da eine Vorausberechnung der Spannungsverteilung an der Erdoberfläche beim Stromübertritt von einer Elektrode zur Erde, die für die Berührungs- und Schrittspannung massgebend ist, nicht sehr einfach ist, wurden diese Zustände für verschiedene Elektrodenabmessungen, -Formen und -Verlegungsarten durch Versuche ermittelt. Für diese Versuche wurden die Elektroden im Wasser eines Weihers von genügend grosser Oberfläche und Tiefe aufgehängt. Dieses Verfahren ermöglichte eine verhältnismässig rasche Verlegung und Formgebung der Elektroden.

Ausserdem hatte sie den Vorteil, dass der spezifische Widerstand der Erde bzw. des Weiherwassers auf einfache Art dauernd kontrolliert werden konnte. Bei diesen Versuchen konnten auch die Erdwiderstände der verschiedenen Elektrodenformen bei den verschiedenen Verlegungstiefen direkt gemessen werden, so dass sich die ziemlich umständliche Berechnung erübrigte.

1. Geradlinige Elektroden

a) Vorausberechnung der Elektrodenlänge für die Einhaltung eines bestimmten Erdwiderstandes bei gegebenem spezifischem Widerstand der Erde

In Fig. 1 sind die auf einen spezifischen Widerstand der Erde von 10 000 Ω cm²/cm umgerechneten Erdwiderstände der Elektroden von 2...150 m Länge für die Eingrabtiefen von 20...150 cm aufgezeichnet. Will man für andere spezifische Widerstände der Erde die Längen der Elektroden ermitteln, die für die Einhaltung bestimmter Erdwiderstände nötig sind, so muss man zuerst den zu erreichenden Wi-

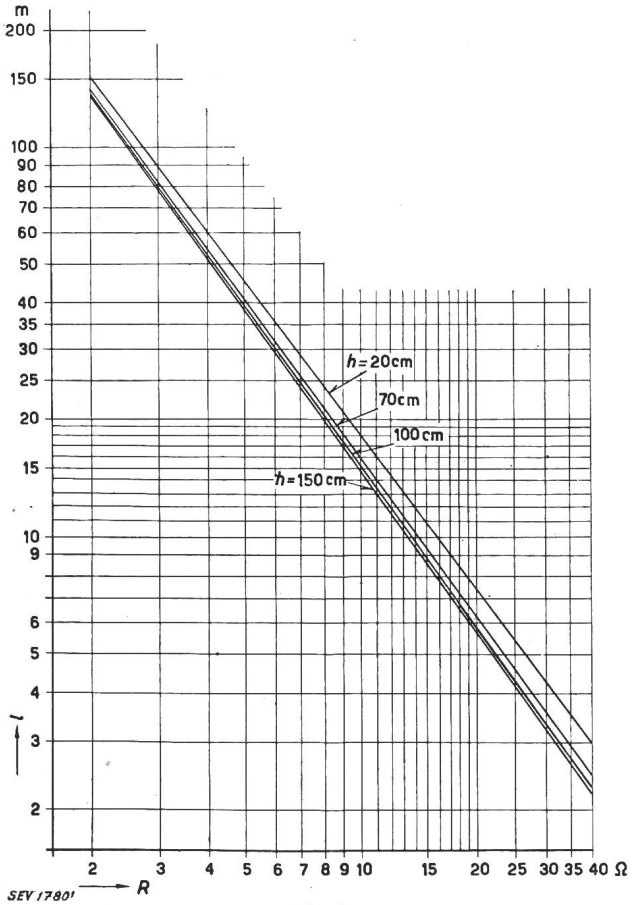

Fig. 1

Elektrodenlänge *l* in Abhängigkeit vom Erdwiderstand *R* bei einem spezifischen Widerstand der Erde von 10 000 Ωcm²/cm für Eingrabtiefen *h* von 20, 70, 100 und 150 cm

Bandelektrodenquerschnitt = 3 × 30 mm

derstand im Verhältnis von 10 000 zum gegebenen spezifischen Widerstand umrechnen und dann die Länge der Elektrode für den umgerechneten Widerstand aus der Darstellung der Fig. 1 aufsuchen.

Beträgt z. B. der spezifische Widerstand im ungünstigsten Zustand der Erde 18 000 Ω cm²/cm und soll der Erdwiderstand nicht mehr als 10 Ω betragen, so ist die Länge der Elektrode für einen Widerstand von 5,55 Ω aufzusuchen. Aus Fig. 1 ergibt sich hiefür eine Elektrodenlänge von ca. 35 m bei einer Eingrabtiefe von 1 m.

Diese Darstellung zeigt, dass Eingrabtiefen von mehr als 70 cm keine wesentliche Herabsetzung der Erdwiderstände ergeben.

Nimmt man ferner an, dass aus wirtschaftlichen und technischen Gründen geradlinige Elektroden im allgemeinen nicht mehr als 30 m lang sein sollten (bei grossen Anlagen, z. B. bei Kraftwerken und Unterwerken, können selbstverständlich bedeutend längere Elektroden verwendet werden), so können solche Elektroden für die Einhaltung von z. B. 5, 10 oder 20 Ω bis zu den spezifischen Widerständen von 8350, bzw. 16 700 bzw. 33 400 Ω cm²/cm, also nur für verhältnismässig günstige Erdverhältnisse zur Anwendung kommen. Bei höheren spezifischen Widerständen ist dann jeweils zu prüfen, ob wenigstens die maximal zulässigen Schritt- und Berührungsspannungen nicht überschritten werden.

b) Vorausbestimmung der Schritt- und Berührungsspannungen

Ist die gegenseitige Lage der Elektrode und des zu erdenden Objektes bekannt, und hat man die Spannungsverteilung an der Erdoberfläche durch Messungen festgestellt, so kann die Berührungsspannung ermittelt werden, indem man die Kurven gleicher Spannungen, den Grundriss des Objektes und die Lage der Elektrode aufzeichnet. Zeichnet man dann noch die Linie der äussersten Berührungsorte auf, so kann, wie Fig. 2 zeigt, die maximale Berüh-

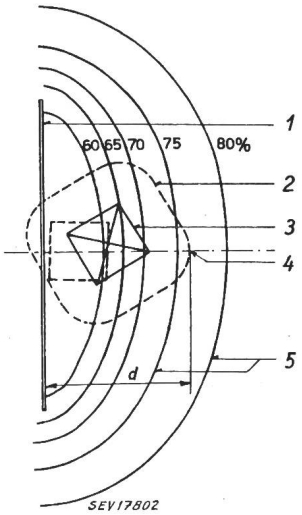

Fig. 2

Ermittlung der maximalen Berührungsspannung

1 Erdelektrode; *2* äusserste Berührungsorte; *3* geerdetes Objekt; *4* maximale Berührungsspannung = 77 % der an der Erdung liegenden Spannung; *5* Kurven gleicher Spannungen; *d* massgebender Berührungsabstand

rungsspannung auf der den ungünstigsten Berührungsort tangierenden Spannungskurve abgelesen werden.

Hiezu ist noch zu bemerken, dass unter der massgebenden *Berührungsdistanz* aus praktischen Gründen *die Distanz zwischen der Elektrode und dem Berührungsort*, nicht diejenige zwischen dem zu erdenden Objekt und dem Berührungsort verstanden ist.

Aus Fig. 2 ist ersichtlich, dass, wenn die Elektrode möglichst nahe und symmetrisch zum Objekt

verlegt wird (wie punktiert eingezeichnet), die günstigsten Verhältnisse bezüglich der Berührungsspannung entstehen. Zur Ermittlung der Berührungsspannung genügt dann eine Messung der Spannungsverteilung senkrecht zur Elektrode von der Mitte der Elektrode aus. Im folgenden wird diese Anordnung der Elektrode jeweils auch vorausgesetzt.

stimmten Ort auf der Erde die prozentuale Berührungsspannung.

Auf Grund einer grossen Anzahl Messungen an verschiedenen Elektroden sind nun in Fig. 4 die prozentualen Berührungsspannungen in Abhängigkeit von der Elektrodenlänge für die Berührungsdistanzen von 1...8 m bei einer Eingrabtiefe von mindestens 50 cm aufgezeichnet. Diese Darstellung

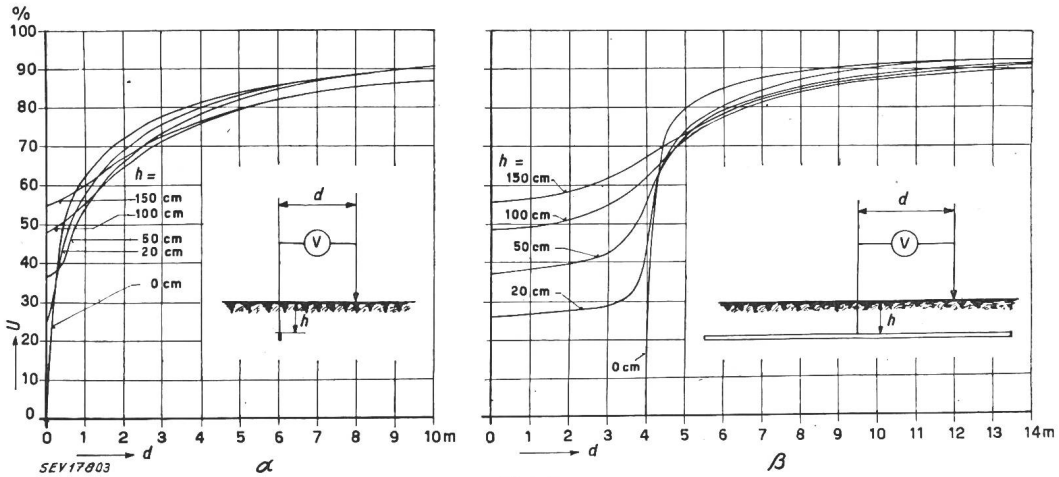

Fig. 3
Spannungsverteilung an der Erdoberfläche
Bandelektrodenquerschnitt 3 × 30 mm; Bandelektrodenlänge 8 m
α in Querrichtung zur Elektrode; β in Längsrichtung zur Elektrode; *U* Spannung in % der Gesamtspannung; *d* Abstand; *h* Eingrabtiefe; *V* Messinstrument

Wie sich die Spannungsverteilung an der Erdoberfläche einer Elektrode mit der minimal zulässigen Oberfläche von 0,5 m² bei verschiedenen Eingrabtiefen der Elektrode gestaltet, zeigt Fig. 3. In dieser Darstellung ist jedoch nicht nur die Spannungsverteilung an der Erdoberfläche senkrecht zur Elektrode, sondern auch diejenige in der Richtung der Elektrode, die in der Regel für die Beurteilung der Schrittspannung massgebend ist, aufgezeichnet.

Um dieser Darstellung eine allgemeine Gültigkeit zu geben, sind die Spannungen, die zwischen der Elektrode und einem bestimmten Punkt der Erdoberfläche herrschten, nicht in Volt, sondern in Prozenten der gesamten an der Erdung liegenden Spannung angegeben. Für die Ermittlung der effektiven Spannung braucht man lediglich den Erdwiderstand der Elektrode mit dem fraglichen Erdschlußstrom und mit dem aus Fig. 3 abgelesenen Prozentsatz zu multiplizieren.

Die genannte Darstellung zeigt, dass die Berührungsspannung nur für Orte in unmittelbarer Nähe der Elektrode von der Eingrabtiefe der Elektrode abhängig ist. Schon bei einer Berührungsdistanz von einem Meter und mehr ist der Unterschied nur noch unbedeutend. Die Messungen an längeren Elektroden zeigen ausserdem, dass die prozentualen Spannungen für gleiche Berührungsdistanzen um so kleiner werden, je länger die Elektroden sind. Die Verlängerung einer Elektrode wirkt deshalb in doppeltem Sinne günstig. Erstens sinkt der Erdwiderstand und damit auch die an der Erdung liegende Spannung, und zweitens sinkt für einen be-

zeigt, dass die Berührungsspannung bei kleinen Berührungsdistanzen (unter 2 m) für eine Elektrode mit der angenommenen Maximallänge von 30 m auf unter 50 % der an der betreffenden Erdung liegenden Spannung sinkt.

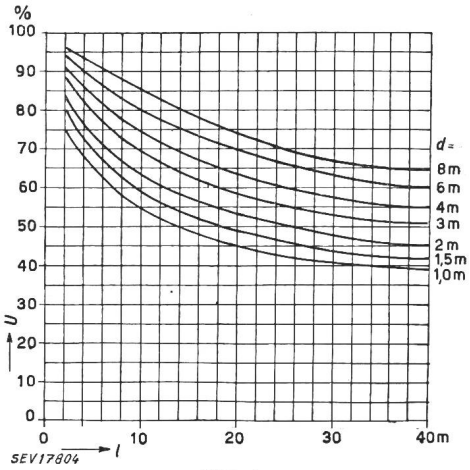

Fig. 4
Berührungsspannung in Abhängigkeit von der Elektrodenlänge für Berührungsabstände von 1...8 m und für Eingrabtiefen von 50...150 cm
U Spannung in % der Gesamtspannung; *l* Elektrodenlänge; *d* Berührungsabstände

Ist der spezifische Widerstand der Erde an einem Ort bekannt, so kann für einen gegebenen Erdschlussstrom und eine angenommene Elektrodenlänge mit Hilfe der Fig. 1 und 4 die Berührungsspannung für jeden beliebigen Ort innerhalb der Berührungsdistanz von 8 m ermittelt werden. In der Regel handelt es sich aber darum, bei gegebenem spezifi-

schem Widerstand der Erde und gegebenem Erdschlußstrom die für die Einhaltung der maximal zulässigen Berührungsspannung von 50 V erforderliche Elektrodenlänge zu berechnen. Um dies auf einfache Art zu ermöglichen, wurden mit Hilfe der Fig. 1 und 4 für die Elektrodenlängen von 8...30 m

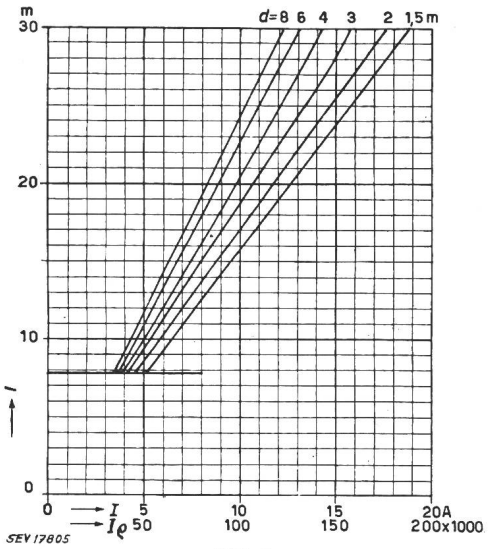

Fig. 5

Elektrodenlänge l in Abhängigkeit vom Erdschlußstrom I für die Einhaltung der maximalen Berührungsspannung von 50 V bei einem spezifischen Erdwiderstand von 10 000 Ωcm²/cm und für Berührungsabstände von 1,5...8 m

ϱ spezifischer Widerstand der Erde

und für die Berührungsdistanzen von 1...8 m bei einem spezifischen Widerstand der Erde von 10 000 Ω cm²/cm die Erdschlußströme, die eine Berührungsspannung von 50 V ergeben, berechnet und die Resultate in Fig. 5 aufgezeichnet.

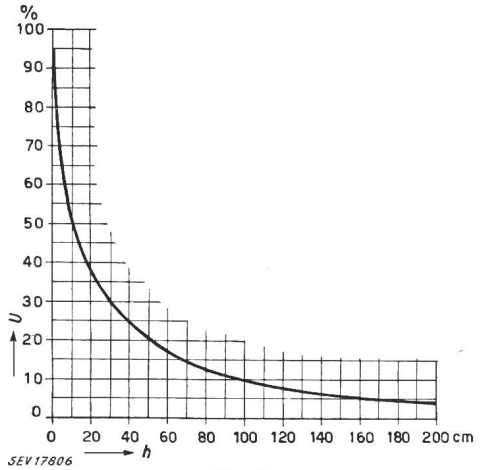

Fig. 6

Schrittspannung in Abhängigkeit von der Eingrabtiefe für Bandelektroden von 3 × 30 mm Querschnitt

(Schrittlänge = 1 m)
Bezeichnungen siehe bei Fig. 3

Für andere spezifische Widerstände der Erde kann die Elektrodenlänge gefunden werden, indem man den Erdschlußstrom mit dem spezifischen Widerstand multipliziert und die Elektrodenlänge durch die Benützung der unteren Skala abliest.

Es muss nun noch untersucht werden, wie gross die Schrittspannung für die ermittelte Elektrode wird. Die Versuche haben gezeigt, dass die Schrittspannung nicht von der Elektrodenlänge, sondern nur von der Eingrabtiefe abhängig ist. Diese Abhängigkeit ist in Fig. 6 dargestellt. Hieraus ist ersichtlich, dass die Schrittspannung praktisch nicht unter 4 % der an der Erdung liegenden Spannung gebracht werden kann (Eingrabtiefe 200 cm). Es zeigt sich aber, dass bei geradlinigen Elektroden in der Regel die Berührungsspannung ausschlaggebend ist.

2. *Kreisförmige Elektroden*

Es ist zu erwarten, dass bei kreisförmigen Elektroden die Erdwiderstände eher grösser sein werden als bei geradlinigen Elektroden von gleicher Länge. Da aber die Berührungsdistanzen bei kreisförmigen Elektroden in den meisten Fällen kleiner sein wer-

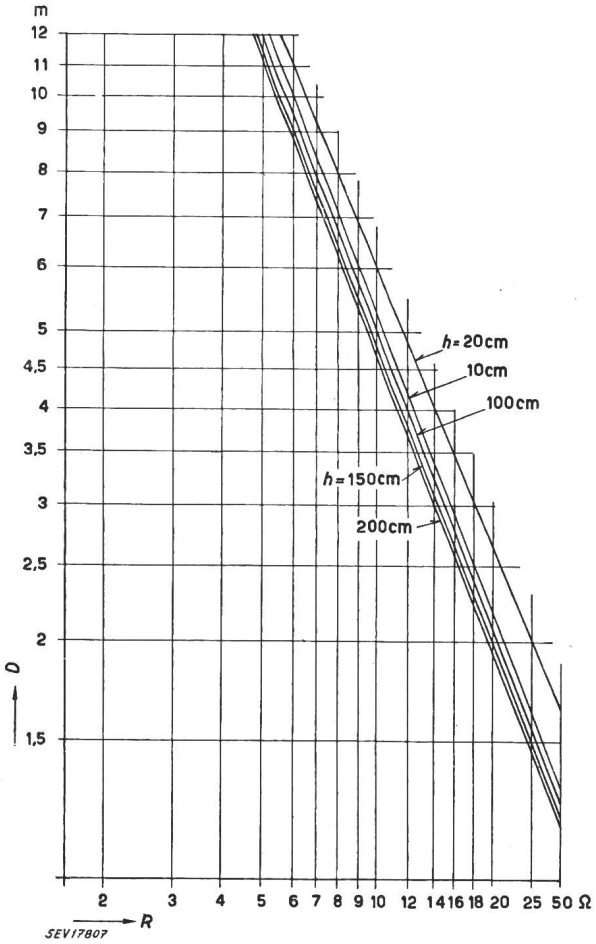

Fig. 7

Erdwiderstand kreisförmiger Elektroden R in Abhängigkeit vom Elektrodendurchmesser bei einem spezifischen Erdwiderstand von 10 000 Ωcm²/cm und für Eingrabtiefen h von 20...200 cm

D Kreisdurchmesser

den als bei geradlinigen Elektroden, so werden die Berührungsspannungen bei kreisförmigen Elektroden ebenfalls eher kleiner ausfallen als bei geradlinigen Elektroden.

a) Vorausberechnung der Erdwiderstände

Für einen spezifischen Widerstand der Erde von 10 000 Ω cm²/cm können die Erdwiderstände in Abhängigkeit vom Kreisdurchmesser der Elektrode aus Fig. 7 abgelesen werden. Für andere spezifische

Widerstände der Erde muss man wiederum zuerst den zu erreichenden Erdwiderstand im Verhältnis von 10 000 zum gegebenen spezifischen Widerstand umrechnen, dann kann man die Länge der Elektrode für den umgerechneten Widerstand aus der Darstellung in Fig. 7 ablesen.

b) Vorausberechnung der Spannungsverteilung an der Erdoberfläche

Bei kreisförmigen Elektroden gestaltet sich die Spannungsverteilung an der Erdoberfläche vom Kreiszentrum aus nach allen Seiten gleichmässig. Für die Messung der Spannungsverteilung genügt deshalb eine solche in radialer Richtung vom Kreiszentrum aus. Als Beispiel ist in Fig. 8 die Messung

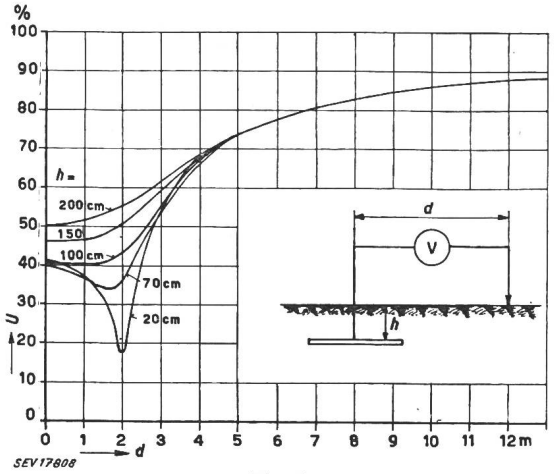

Fig. 8
Spannungsverlauf an der Erdoberfläche einer kreisförmigen Elektrode von 4 m Durchmesser
d Abstand von Kreismitte
Weitere Bezeichnungen siehe bei Fig. 3

der Spannungsverteilung für eine Elektrode von 4 m Durchmesser und für die Eingrabtiefen von 20...200 cm aufgezeichnet.

Hieraus ist ersichtlich, dass bei ganz geringen Eingrabtiefen (20 cm) unmittelbar über der Elektrode verhältnismässig kleine Berührungsspannungen entstehen. Da aber die Spannung von der Elektrode aus nicht nur nach aussen, sondern auch nach innen ansteigt, so muss immer mindestens mit der über dem Kreiszentrum liegenden Spannung gerechnet werden. Ausserdem wird bei geringen Eingrabtiefen die Schrittspannung derart gross, dass diese ausschlaggebend wird.

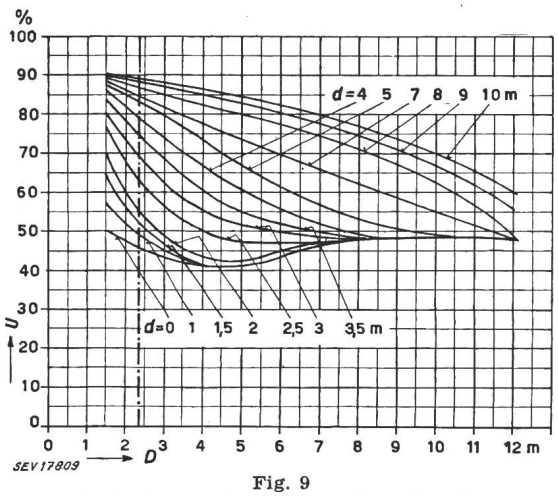

Fig. 9
Spannung in % der an der Erdung liegenden Spannung bei Kreiselektroden in Abhängigkeit vom Elektrodendurchmesser für Abstände zwischen Kreiszentrum und Berührungsort von 0...10 m
h Eingrabtiefe = 100 cm; *U* Spannung in % der Gesamtspannung; *D* Kreisdurchmesser; *d* Abstand von Kreismitte

Die Messungen an Elektroden bis zu 12 m Kreisdurchmesser und Eingrabtiefen von 20...200 cm haben gezeigt, dass man mit einer Eingrabtiefe von 100 cm die günstigsten Resultate erzielt. Für diese Eingrabtiefe wird in Fig. 9 gezeigt, wie sich die Spannungen in Prozenten der an der Erdung liegenden Gesamtspannung bei den Distanzen von 0...10 m vom Kreiszentrum aus für die Elektroden mit 1,5...12 m Kreisdurchmesser gestalten.

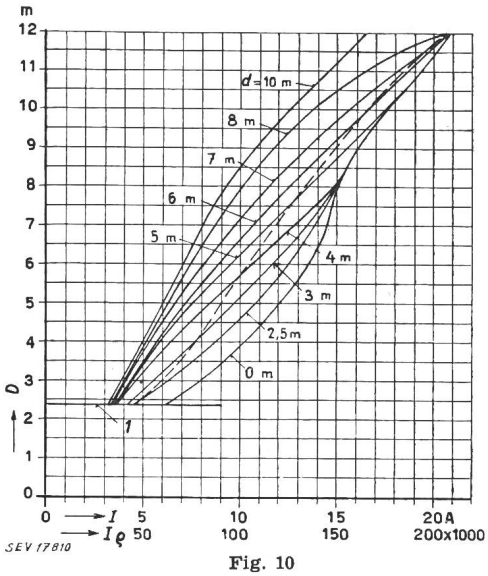

Fig. 10
Elektrodendurchmesser *D* in Abhängigkeit vom Erdschlussstrom *I* für die Abstände vom Kreiszentrum bis zum Berührungsort *d* von 0...10 m bei einem spezifischen Erdwiderstand von 10 000 Ωcm²/cm
1 minimal zulässige Elektrode

Mit Hilfe der Fig. 7 und 9 ist es nun möglich, für eine bestimmte Elektrode die Berührungsspannung für eine bestimmte Distanz vom Kreiszentrum aus bei gegebenem Erdschlußstrom zu berechnen.

Um bei gegebenem Erdschlußstrom und gegebener Berührungsdistanz den für die Einhaltung der maximal zulässigen Berührungsspannung nötigen Elektrodendurchmesser auf einfache Art ermitteln zu können, sind in Fig. 10 die Elektrodendurchmesser in Abhängigkeit vom Erdschlußstrom für die Berührungsdistanzen von 0...10 m bei einem spezifischen Widerstand der Erde von 10 000 Ω cm²/cm aufgezeichnet.

Für andere spezifische Widerstände der Erde kann der Elektrodendurchmesser gefunden werden, wenn man den Erdschlußstrom mit dem spezifischen Widerstand multipliziert und den Elektrodendurchmesser von der unteren Skala aus abliest.

Da das zu erdende Objekt innerhalb der Elektrode liegen muss, so ergibt sich für jede Elektrode eine maximale Berührungsdistanz, und zwar kann

diese angenommen werden gleich dem Kreisradius plus 1 m. Es kommen deshalb in der Regel nur die in Fig. 10 zwischen der Distanz von 2,5 m und der punktierten Linie liegenden Berührungsdistanzen in Betracht.

Wie sich die Schrittspannungen gestalten, zeigt Fig. 11. Hieraus ist ersichtlich, dass die Schrittspannung mit der Zunahme des Elektrodendurchmessers und der Eingrabtiefe abnimmt. Ferner konnte

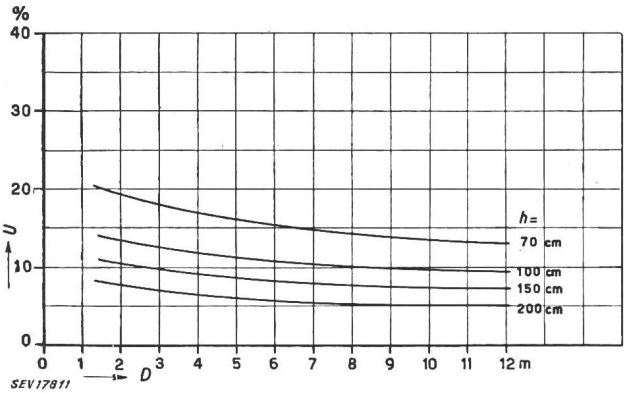

Fig. 11
Maximale Schrittspannungen U in Funktion der Elektrodendurchmesser D für Eingrabtiefen h von 70...200 cm
Schrittlänge 1 m

festgestellt werden, dass bei einer Eingrabtiefe von 100 cm die Schrittspannung auch bei der minimal zulässigen Elektrode von 2,4 m Durchmesser unter dem maximal zulässigen Wert von 20 V liegt. Für die Berechnung der Elektrodendimension ist deshalb, abgesehen von Sonderfällen, die Berührungsspannung massgebend.

Da auch die Anwendung einfacher kreisförmiger Elektroden bei hohen spezifischen Widerständen der Erde und bei hohen Erdschlußströmen nicht zum Ziele führt, so wurden die Untersuchungen noch auf Kombinationen von 2 und 3 konzentrisch verlegten kreisförmigen Elektroden ausgedehnt.

3. Kombinationen kreisförmiger Elektroden

Die Versuche haben gezeigt, dass durch die Verlegung einer zweiten, eventuell einer dritten Elektrode innerhalb der Hauptelektrode sich die Berührungsspannungen in den in Betracht kommenden Berührungsdistanzen wesentlich absenken lassen. Eine solche Anordnung kann nicht nur bei höheren spezifischen Widerständen oder grösseren Erdschlußströmen in Frage kommen, sondern auch dann, wenn für die Verlegung einer einzigen grösseren Elektrode nicht genügend Platz vorhanden ist.

Bei der Verlegung von zwei oder drei konzentrisch zueinander liegenden Elektroden ist aber zu beachten, dass durch die Herabsetzung der Berührungsspannung die Schrittspannung erhöht wird. Die Wahl des Verhältnisses der Elektrodendurchmesser und der Verlegungstiefen zueinander muss deshalb so getroffen werden, dass die Schritt- und Berührungsspannungen in einem bestimmten durch die maximal zulässigen Grenzwerte gegebenen Verhältnisse stehen.

a) Kombination von zwei Kreisbändern

Eine grosse Zahl von Versuchen mit verschiedenen Verhältnissen der Elektrodendurchmesser und verschiedenen Verlegungsarten haben gezeigt, dass es am zweckmässigsten ist, den Durchmesser der kleineren Elektrode halb so gross wie den Durchmesser der Hauptelektrode zu wählen und die kleinere Elektrode 1 m tief und die Hauptelektrode 1,5 m tief einzugraben. Einen gewissen Nachteil hat die Verlegung von zwei Elektroden an Stelle von einer einzigen insofern, als der Erdwiderstand von zwei Elektroden mit einer Gesamtlänge gleich der einer Elektrode etwas grösser wird als der Widerstand einer Elektrode.

Der Erdwiderstand einer Kombination von zwei Elektroden in genannter Anordnung kann berechnet werden, indem man aus Fig. 1 den Widerstand einer geradlinigen Elektrode von gleicher Länge wie die Länge der beiden Kreiselektroden zusammen aufsucht und den erhaltenen Wert mit 1,25 multipliziert.

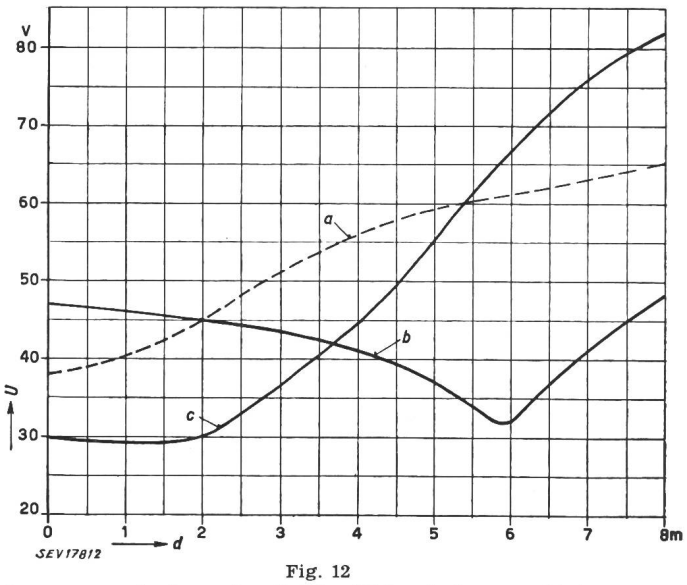

Fig. 12
Spannungsverlauf an der Erdoberfläche dreier verschiedener Erdelektroden gleicher Länge
Belastung der Elektroden = 10 A
spezifischer Erdwiderstand = 20 000 Ωcm²/cm
a gerade Elektrode 37,7 m lang und 100 cm tief
b Kreiselektrode von 12 m ϕ und 100 cm tief
c zwei konzentrische Elektroden von 4 und 8 m ϕ, 100 und 150 cm tief
U Spannung;
d Abstand von der Elektrode bzw. vom Kreiszentrum

Wie sich die Berührungsspannung einer Erdung bei einer Verlegung von zwei Elektroden gegenüber einer solchen einer einzigen Elektrode bei gleichem Materialaufwand verändert, zeigt Fig. 12. Für diese Darstellung wurde angenommen, dass der spezifische Widerstand der Erde 20 000 Ω cm²/cm und der Erdschlußstrom 10 A betrage. Um auch noch einen Vergleich mit einer geradlinigen Elektrode von gleicher Bandlänge zu erhalten, ist ausserdem noch die entsprechende Kurve eingezeichnet worden.

Die Darstellung Fig. 12 zeigt, dass mit zwei Elektroden die Berührungsspannung innerhalb der grösseren Elektrode gegenüber nur einer Elektrode wesentlich gesenkt werden kann, besonders wenn man

berücksichtigt, dass bei einer Elektrode als kleinste Berührungsspannung diejenige des Kreiszentrums berücksichtigt werden muss.

Bei gegebenem spezifischem Widerstand und gegebenem Erdschlußstrom kann die Berührungsspannung einer solchen Elektrodenkombination mit Hilfe der Darstellungen Fig. 1 (Widerstandsberech-

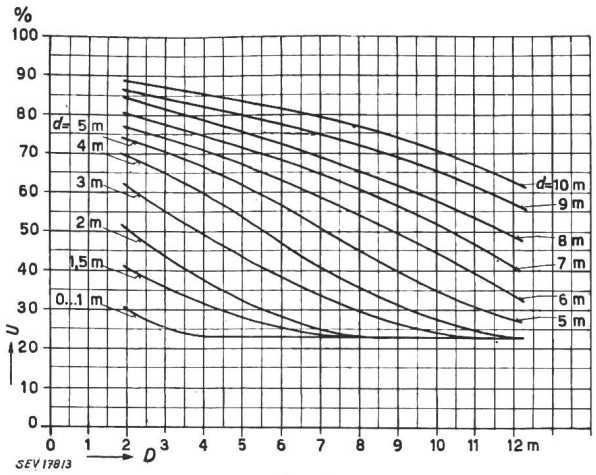

Fig. 13

Prozentuale Spannungsänderung bei einer Kombination von 2 kreisförmigen Elektroden in Abhängigkeit vom Durchmesser der grösseren Elektrode

Verhältnis der Kreisdurchmesser 1 : 2
D Durchmesser der grösseren Elektrode; *d* Abstand vom Kreiszentrum; *U* Spannung in % der an der Erdung liegenden Spannung

nung) und Fig. 13 (Darstellung der prozentualen Spannungsverteilung an der Erdoberfläche) für die Distanzen von 0...10 m vom Kreiszentrum aus berechnet werden.

Umgekehrt kann aus Fig. 14 bei gegebenem Erdschlußstrom diejenige Elektroden-Gesamtlänge ab-

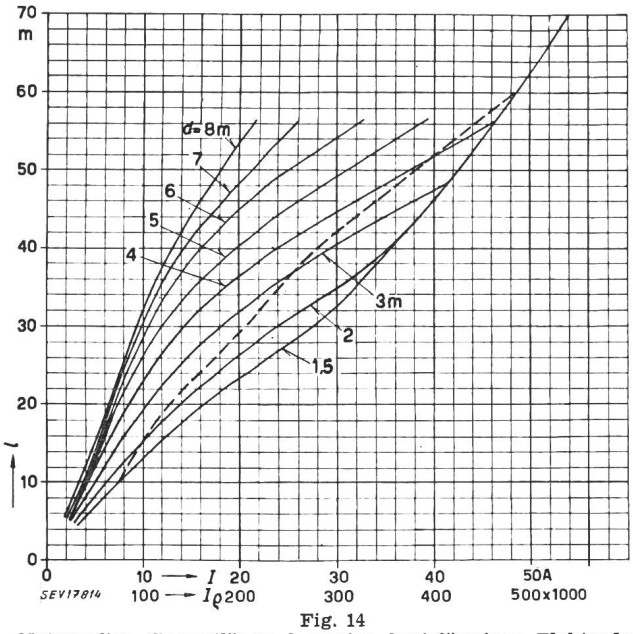

Fig. 14

Notwendige Gesamtlänge *l* zweier kreisförmiger Elektroden in Abhängigkeit vom Erdschlußstrom *I* für den Abstand vom Kreiszentrum bis zum äussersten Berührungsort von *d* = 1,5...8 m

Spezifischer Erdwiderstand 10 000 Ωcm²/cm
Elektrodendurchmesser D_1 = Gesamtlänge/9,4
Elektrodendurchmesser D_2 = Gesamtlänge/4,7
Eingrabtiefen: Elektrode *1* h_1 = 150 cm
Elektrode *2* h_2 = 100 cm

gelesen werden, die für die Einhaltung der maximal zulässigen Berührungsspannung von 50 V nötig ist. Dabei ist bei einer Abweichung des spezifischen Widerstandes von 10 000 Ω cm²/cm die untere Skala zu benützen. Für die Berechnung der beiden Elektrodendurchmesser ist die abgelesene Gesamtlänge durch 4,7 bzw. 9,4 zu dividieren.

Da bei dieser Elektroden-Kombination das zu erdende Objekt innerhalb der kleineren Elektrode liegen muss, so sind auch hier die in Betracht kommenden Berührungsdistanzen begrenzt, und zwar liegen sie wiederum bei den um einen Meter verlängerten Radien der kleineren Elektrode. Es fallen deshalb in der Regel nur die zwischen 1,5 m vom Kreiszentrum und der punktierten Linie in Fig. 14 liegenden Distanzen in Betracht.

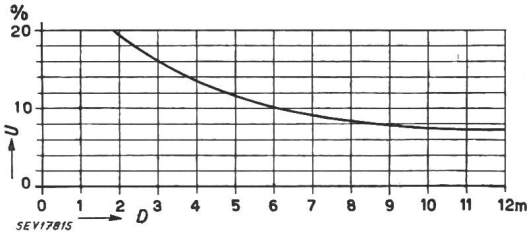

Fig. 15

Schrittspannung in Abhängigkeit des Kreisdurchmessers der grösseren Elektrode *D*

Schliesslich kann mit Hilfe der Fig. 15 die maximale Schrittspannung ermittelt werden. Dabei ist aber vorausgesetzt, dass die Elektrodendurchmesser und die Eingrabtiefen den genannten Verhältnissen entsprechen.

b) Kombination von drei Kreisbändern

Wie sich die Spannungsverteilung an der Erdoberfläche bei einer Verlegung von drei Elektroden gestaltet, zeigt Fig. 16. Um die Wirkung der dritten Elektrode zu veranschaulichen, sind in der genannten Figur auch noch die Spannungsverteilungen von nur einer Elektrode und von zwei Elektroden von gleichen Gesamtlängen eingetragen. Dieser Darstellung ist ein Erdschlußstrom von 10 A bei einem spezifischen Widerstand der Erde von 20 000 Ω cm²/cm zu Grunde gelegt. Es zeigt sich, dass durch die dritte Elektrode die innerhalb der zweiten Elektrode liegenden Berührungsspannungen gegenüber denjenigen innerhalb der gleichen Distanz vom Kreiszentrum bei der Verlegung von zwei Elektroden noch etwas gesenkt werden kann. Es ist jedoch zu beachten, dass bei einer Verlegung von drei Elektroden nicht mehr die Berührungsspannung, sondern die Schrittspannung massgebend wird. Um nun die Schrittspannung möglichst klein zu halten, muss die grösste Elektrode 200 cm tief eingegraben werden. Werden dabei die kleineren Elektroden 120 bzw. 150 cm tief eingegraben, so beträgt die Schrittspannung, sofern der Durchmesser der grössten Elektrode 7 m oder mehr beträgt, 6,5 % der an der Erdung liegenden Spannung.

Dabei ist vorausgesetzt, dass der Durchmesser der zweiten Elektrode halb so gross als derjenige der ersten und der Durchmesser der dritten Elektrode

halb so gross wie derjenige der zweiten ist. Bei einer solchen Anordnung der drei Elektroden wird der Erdwiderstand um 32 % grösser als der Erdwiderstand einer geradlinigen Elektrode von gleicher Länge wie die Gesamtlänge der drei Elektroden. Es lässt sich somit mit Hilfe der Darstellung Fig. 1 der Erdwiderstand einer solchen Kombination und bei bekanntem Erdschlußstrom die an der Erdung liegende Spannung so wie die Schrittspannung berechnen. Mit Hilfe solcher Berechnungen sind in Fig. 17 die nötigen Gesamtlängen der Elektroden für die Einhaltung der maximal zulässigen Schrittspannung von 20 V in Abhängigkeit vom Erdschlußstrom bei einem spezifischen Widerstand der Erde von 10 000 Ω cm²/cm aufgezeichnet.

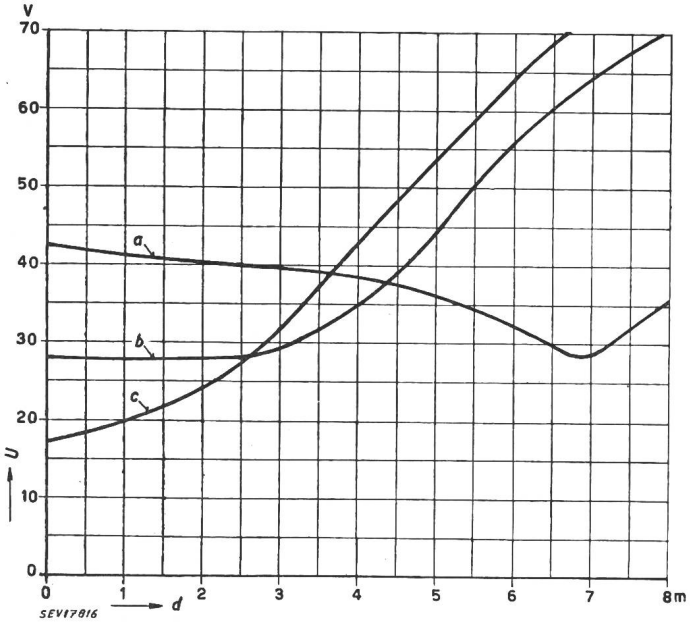

Fig. 16

Spannungsverlauf an der Erdoberfläche dreier gleich langer, aber verschiedener Elektroden

a kreisförmige Elektrode, 14 m ϕ, 100 cm tief eingegraben
b zwei konzentrische Elektroden, 4,7 und 9,4 m ϕ, 100 und 150 cm tief eingegraben
c drei konzentrische Elektroden 2, 4 und 8 m ϕ, 100, 125 und 150 cm tief eingegraben
d Abstände von den Kreiszentren

Bei Benützung der unteren Skala kann die nötige Gesamtlänge der Elektroden für jeden beliebigen Erdschlußstrom bei dem in Betracht kommenden spezifischen Widerstand der Erde abgelesen werden.

Um die einzelnen Durchmesser der drei Elektroden zu erhalten, ist die Gesamtlänge der Elektroden durch 5,5, 11 und 22 zu dividieren.

In Tabelle II soll noch gezeigt werden, bis zu welchem Erdschlußstrom bei einem spezifischen Widerstand der Erde von 10 000 Ω cm²/cm bei kleineren Objekten (Gittermasten, kleinen Transformatorenstationen usw.) die verschiedenen Elektrodenarten Verwendung finden können. Dabei ist an-

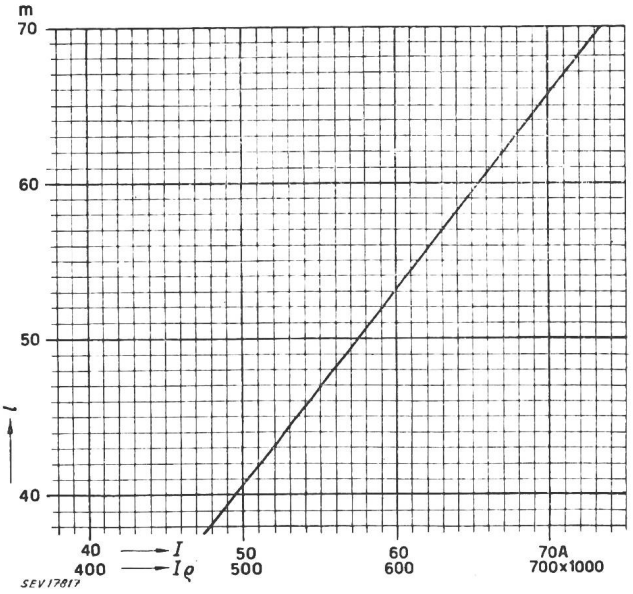

Fig. 17

Notwendige Gesamtlänge *l* dreier kreisförmiger Elektroden in Abhängigkeit vom Erdschlußstrom *I*

Spezifischer Erdwiderstand = 10 000 Ωcm²/cm

Kreisdurchmesser	Eingrabtiefe
$D_1 = l/22$	120 cm
$D_2 = l/11$	150 cm
$D_3 = l/5{,}5$	200 cm

genommen, dass die kleinste Berührungsdistanz bei geradlinigen Elektroden 2 m betrage und bei kreisförmigen Elektroden einer Länge gleich dem um einen Meter verlängerten Radius der kleinsten Elektrode entspreche. Ferner ist angenommen, dass aus technischen und wirtschaftlichen Gründen geradlinige Elektroden von 30 m Länge, kreisförmige Elektroden von 12 m Durchmesser und Kombinationen von 2 und 3 Kreiselektroden mit einem Kreisdurchmesser der grössten Elektrode von 15 m begrenzt seien.

Verwendungsmöglichkeiten verschiedener Elektrodenarten bei einem spezifischen Erdwiderstand von 10 000 Ωcm²/cm

Tabelle II

Elektrodenart	Länge der Elektroden in m	Kreisdurchmesser der Elektroden in m	Berührungsdistanzen m	Max. zulässiger Erdschlußstrom A
Geradlinige Elektroden	8,0 30,0		2,0 2,0	**4,6** **17,6**
Kreisförmige Elektroden		2,4 12,0	2.2 7.0	**4,5** **20,8**
Kombination zweier Kreisbänder . . .		2,0 + 4,0 7,5 + 15.0	2,0 4,75	**11,0** **52,0**
Kombination dreier Kreisbänder . . .		2,0 + 4.0 + 8,0 3,8 + 7,6 + 15,2	2,0 2,9	**52,8** **106,0**

Für andere spezifische Widerstände können die Grenzstromstärken ermittelt werden, indem die in Tabelle II angegebenen Werte mit dem Verhältnis von 10 000 zum gegebenen spezifischen Widerstand multipliziert werden.

Alle diese Berechnungen und Darstellungen haben nur bei einem homogenen Erdreich Geltung. Bei einem geschichteten Erdreich können wesentliche Abweichungen, besonders in der Spannungsverteilung an der Erdoberfläche, entstehen. Hat z. B. die in der nächsten Umgebung der Elektrode liegende Erde einen höheren spezifischen Widerstand als die darüberliegende, so wird die Spannungsverteilung an der Erdoberfläche verflacht, d. h. die Berührungsspannung wird grösser und die Schrittspannung kleiner als bei einem homogenen Erdreich. Hat dagegen die unmittelbar um die Elektrode liegende Erde einen kleineren spezifischen Widerstand als die darüberliegende, so wird die Berührungsspannung kleiner, die Schrittspannung dagegen grösser als bei einem gleichmässigen Erdreich.

Bei der Berechnung einer Elektrode muss man deshalb stets mit einem gewissen Sicherheitsfaktor rechnen. Ausserdem muss jede Erdung durch Messung des Erdwiderstandes und der Spannungsverteilung an der Erdoberfläche kontrolliert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Erdungen ihren endgültigen Zustand erst nach ein bis zwei Jahren nach der Verlegung der Elektrode erreichen.

C. Ermittlung der maximal zulässigen Belastung der Elektroden

1. Veränderung der Erdwiderstände infolge eines Stromflusses von der Elektrode zur Erde

Fliesst ein elektrischer Strom von einer Elektrode aus zur Erde, so erwärmt sich die Erde infolge des Erdwiderstandes, und zwar ist die Erwärmung unmittelbar bei der Elektrode am grössten (grösste Stromdichte und grösster Erdwiderstand) und nimmt mit der Entfernung von der Elektrode rasch ab (rasche Abnahme der Stromdichte und des Erdwiderstandes). Die Erwärmung der Erde in der Nähe der Elektrode hat zur Folge, dass der Erdwiderstand abnimmt. Nimmt aber die Erwärmung soweit zu, dass ein Austrocknen der Erde erfolgt, so steigt der Erdwiderstand in ganz bedeutendem Masse an. Diese Veränderung des Erdwiderstandes hat aber auch einen Einfluss auf die Spannungsverteilung an der Erdoberfläche. Diese Veränderung ist jedoch verschieden, je nachdem, ob über die Erdung ein vom Widerstand der Erdung sozusagen unabhängiger Strom fliesst (Erdschlußstrom eines Hochspannungsnetzes), oder ob an der Erdung eine vom Erdwiderstand angenähert unabhängige Spannung liegt (Nullpunkterdung in Niederspannungsnetzen, in denen zum Schutze der Hausinstallationen das «Schutzerdungssystem» angewendet wird).

Wie sich die Spannungsverteilung im ersten Fall verändern kann, zeigt Fig. 18. Die beiden Kurven *a* (senkrecht zur Elektrode) und *b* (in Richtung der Elektrode) zeigen den Spannungsverlauf an der Erdoberfläche im kalten Zustand der Erde, *a'* und *b'* bei einer mässigen Erwärmung (44 °C unmittelbar bei der Elektrode). Hieraus ist ersichtlich, dass durch die Erwärmung der Erde die Spannungsverteilung und damit die

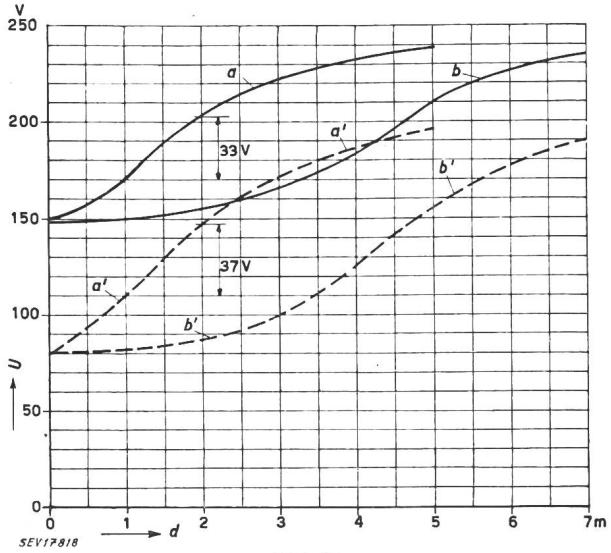

Fig. 18
Spannungsverlauf an der Erdoberfläche bei unveränderter Erdschlußstromstärke
Die Kurven *a* und *a'* gelten senkrecht zur Elektrode; *b* und *b'* in Richtung der Elektrode; *a* und *b* zeigen den Spannungsverlauf vor der Erwärmung, *a'* und *b'* bei mässiger Erwärmung der Erde
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 12

Berührungsspannungen wesentlich gesenkt, die Schrittspannung dagegen um 12 % erhöht wird. Würde die Erwärmung der Erde jedoch weiter gesteigert, so dass ein Austrocknen der Erde in der Nähe der Elektrode erfolgen würde, so könnte der

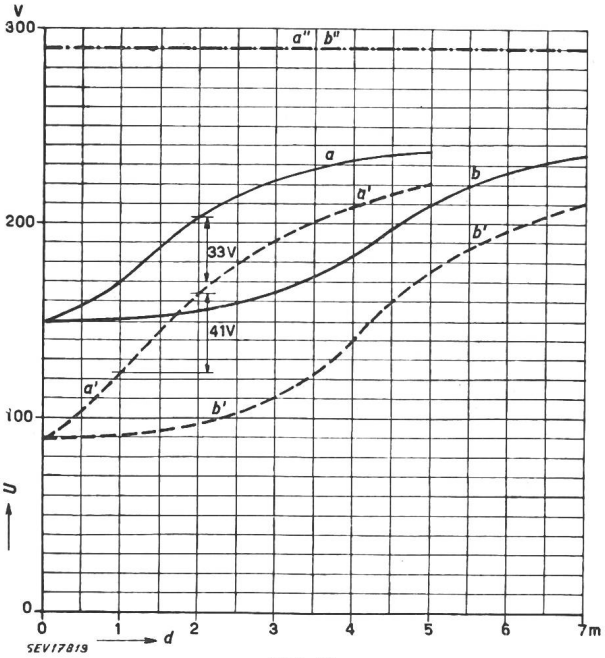

Fig. 19
Spannungsverlauf an der Erdoberfläche bei unveränderter Spannung an der Erdung
Die Kurven *a*, *a' und a''* gelten senkrecht zur Elektrode, *b*, *b'* und *b''* in Richtung der Elektrode; *a* und *b* zeigen den Spannungsverlauf vor der Erwärmung, *a'* und *b'* bei mässiger Erwärmung, *a''* und *b''* im ausgetrockneten Zustand der Erde
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 12

Erdwiderstand bis zum Zehnfachen des ursprünglichen Wertes ansteigen. Dies hätte zur Folge, dass sowohl die Berührungsspannung, als auch die Schrittspannung ausserordentlich hohe Werte annehmen, so dass sehr gefährliche Zustände entstehen würden.

Fig. 19 zeigt den Spannungsverlauf an der Erdoberfläche, wenn an der Erdung eine unveränderliche Spannung liegt. Die Kurven *a* und *b* zeigen wiederum den Spannungsverlauf im kalten Zustand der Erde, diejenigen *a'* und *b'* die bei einer mässigen Erwärmung der Erde und schliesslich diejenigen *a''* und *b''* nach dem Austrocknen der Erde in unmittelbarer Nähe der Elektrode. Bei einer mässigen Erwärmung der Erde werden wiederum die beiden Spannungskurven und damit die Berührungsspannungen gesenkt. Dafür steigt die Schrittspannung um ca. 24 %. Da bei der angedeuteten Nullpunkterdung die Schrittspannung massgebend ist, so muss diesem Umstand bei der Berechnung der Elektrodenabmessungen Rechnung getragen werden. Bei einer weiteren Erwärmung der Erde steigt der Erdwiderstand derart hoch an, dass der Fehlerstrom verschwindend klein wird, die Berührungsspannung angenähert die Sternspannung des Netzes erreicht und die Schrittspannung sozusagen verschwindet. Eine solche Veränderung wäre, soweit es sich um den Schutz bei Isolationsdefekten an Hausinstallations-Objekten handelt, nur vorteilhaft. Da die Nullpunkterdung aber auch als Schutzerdung beim Übertritt von Hochspannung auf Niederspannung dienen muss, so würden in einem solchen Falle ausserordentlich gefährliche Zustände entstehen.

Diese Darstellungen haben gezeigt, dass die Elektroden in allen Fällen derart bemessen sein müssen, dass auch bei einer dauernden Belastung der Erdungen keine allzuhohe Erwärmung der Erde in unmittelbarer Nähe der Elektroden eintreten kann.

2. Berechnung der notwendigen Elektrodenoberflächen bezüglich der Erwärmung der Erde

Aus den Versuchen, die sowohl im Sommer, als auch im Winter durchgeführt wurden, konnte festgestellt werden, dass bei einer dauernden Belastung einer Elektrode diese nicht mehr als mit 7 kW pro m² Oberfläche belastet werden sollte, damit sich die Erwärmung der Erde noch in den zulässigen Grenzen bewegt.

a) Berechnung der notwendigen Elektroden-Oberfläche bei einer Belastung mit unveränderter Erdschlussstromstärke (Hochspannungserdschluss)

In diesem Falle ist die Elektrodenoberfläche mit Hilfe folgender Formel zu berechnen.

$$A = \frac{I^2 R}{7 \cdot 1000} \text{ m}^2$$

Hierin bedeutet R den Erdwiderstand beim *ungünstigsten* Zustand der Erde (im Winter), I den Erdschlußstrom des Hochspannungsnetzes. Da sich der Erdschlußstrom eines Hochspannungsnetzes mit der Erweiterung des Netzes und ganz besonders mit einer teilweisen Verkabelung erhöht, so ist der grösste zu erwartende Erdschlußstrom einzusetzen.

Um diese Berechnung nicht in jedem einzelnen Falle vornehmen zu müssen, sind in Fig. 20 die nötigen Elektrodenlängen für die Erdschlußströme

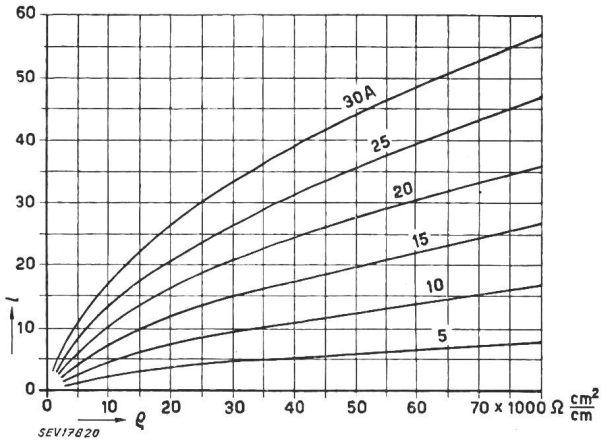

Fig. 20
Bandlänge in Abhängigkeit vom spezifischen Erdwiderstand für die Einhaltung der maximal zulässigen Belastung der Elektroden
l Bandlänge; spezifischer Erdwiderstand

von 5...30 A bei den spezifischen Widerständen bis zu 80 000 Ω cm²/cm aufgezeichnet. Hiezu ist noch folgendes zu bemerken:

Bei kombinierten kreisförmigen Elektroden wird der Erdwiderstand durch die inneren Elektroden nur unwesentlich herabgesetzt. Diese Elektroden dienen in der Hauptsache nur zur Steuerung der Spannungsverteilung an der Erdoberfläche. Bei der Berechnung der Elektroden bezüglich der Erwärmung der Erde ist deshalb nur die Länge der äussersten Elektroden in Betracht zu ziehen.

Sind an einem Hochspannungsnetz Hochspannungs-Objekte mit geerdetem Nullpunkt (z. B. Elektrokessel) angeschlossen, so können beim Auftreten eines Erdschlusses im Hochspannungsnetz derart hohe Ströme auftreten, dass die maximal zulässigen Werte der nach obigen Gesichtspunkten berechneten Schutzerdung sowohl in Bezug auf die Erwärmung der Erde, als auch auf die Spannungsverteilung an der Erdoberfläche überschritten werden. Es muss deshalb dafür gesorgt werden, dass beim Auftreten eines Erdschlusses im Hochspannungsnetz solche Objekte sofort abgeschaltet werden und nicht mehr eingeschaltet werden können, bis der Erdschluss behoben ist.

b) Berechnung der nötigen Elektrodenoberfläche für den Fall, dass an der Erdung eine unveränderliche Spannung liegt

Wird an eine Erdung während längerer Zeit eine unveränderliche Spannung gelegt, so kann die nötige Oberfläche mit Hilfe folgender Formel berechnet werden.

$$A = \frac{U^2}{7 \cdot R \cdot 1000} \text{ m}^2$$

Hierin bedeutet U die an der Erdung liegende Span-

nung und R den Erdwiderstand im *günstigsten* Zustand der Erde (Sommer nach einer Regenwetterperiode).

Ein ganz besonderes Beispiel für die Berechnung der Abmessungen einer Erdelektrode ist die Berechnung einer Nullpunkterdung eines Drehstrom-Niederspannungs-Netzes, in welchem als Schutzmassnahme für die Hausinstallationsobjekte die «Schutzerdung» angewendet wird.

Für eine solche Erdung schreiben die Starkstromvorschriften eine minimale Oberfläche der Elektrode von 0,5 m² und einen höchst zulässigen Erdwiderstand von 20 Ω vor. Anderseits muss die Erdung einen minimalen Widerstand aufweisen, der dafür Gewähr bietet, dass beim Auftreten eines Isolationsfehlers an einem Hausinstallationsobjekt zwischen diesem und der Erde keine grössere Spannung als 50 V auftritt [1]). Ferner muss die Elektrodenoberfläche so gross sein, dass die maximal zulässige Belastung nicht überschritten wird, und zwar:

1. wenn an die Elektrode die Sternspannung des Netzes gelegt wird (Isolationsfehler an einem Hausinstallationsobjekt),
2. wenn die Elektrode dauernd mit einem unveränderlichen Strom belastet wird (Hochspannungserdschlußstrom beim Übertritt von Hoch- auf Nieder-Spannung).

Schliesslich dürfen die Schritt- und Berührungsspannungen an der Erdoberfläche der Erdung die maximal zulässigen Werte von 20 bzw. 50 V sowohl im einen, als auch im andern Belastungsfall nicht überschreiten.

Auf welche Art und Weise diese Bedingungen erfüllt werden können, soll für die Nullpunkterdung eines 500-V-Drehstromnetzes gezeigt werden.

Die Berührungsspannung kann gänzlich vermieden werden, wenn die Erdleitung vom Nullpunkt des Transformators bis zur Erdelektrode isoliert verlegt wird.

Die Schrittspannung kann auf den maximal zulässigen Wert herabgesetzt werden, wenn die Elektrode mindestens 200 cm tief in die Erde verlegt wird. Dabei ist aber zu beachten, dass der Erdschlußstrom beim Übertritt von Hoch- auf Niederspannung multipliziert mit dem Erdwiderstand nicht mehr als 500 V ergeben darf (Schrittspannung 4 % von 500 V = 20 V).

Eine besondere Schwierigkeit bietet diese Erdung bei einem verhältnismässig niedrigen spezifischen Widerstand der Erde für die Einhaltung der maximal zulässigen Belastung der Elektrode. Werden die Hausinstallationsobjekte an ein ausgedehntes Wasserleitungsnetz geerdet — was ja Bedingung ist — [1]), so kann damit gerechnet werden, dass der Objekterdwiderstand ca. 1 Ω beträgt. Der Widerstand der Nullpunkterdung muss dann auch beim günstigsten Zustand der Erde (im Sommer bei Regenwetter) mindestens 4,8 Ω betragen, damit an der Objekterdung keine grössere Spannung als 50 V auftritt.

Die Berechnung der Elektrode bezüglich der Erwärmung gemäss der zuletzt genannten Formel zeigt nun, dass die minimal zulässige Elektrode von 0,5 m² (8 m langes Band von 3×30 mm Querschnitt) bis zu einem spezifischen Widerstand der Erde von 10 000 Ω cm²/cm im *günstigsten* Zustand der Erde nicht ausreicht. Würde die Elektrodenoberfläche aber auf das nötige Mass vergrössert, so würde, wegen der damit verbundenen Herabsetzung des Erdwiderstandes, die Bedingung der Spannungsverteilung zwischen der Nullpunkterdung und den Objekterdungen nicht mehr erfüllt. Da aus diesem Grund eine Vergrösserung der Elektrodenoberfläche nicht in Frage kommen kann, so muss der Nullpunkterdung ein Widerstand vorgeschaltet werden, der den Fehlerstrom bzw. die an der Erdung liegende Spannung so weit herabsetzt, bis die Elektrodenoberfläche von 0,5 m² für die maximal zulässige Erwärmung der Erde genügt. Es ist nun nicht nötig, die Grösse des Vorschaltwiderstandes für jeden spezifischen Widerstand bis zu 10 000 Ωcm²/cm im günstigsten Zustand der Erde zu berechnen. Das Vorschalten eines Ohmschen Widerstandes von 5 Ω oder eines induktiven (Drosselspule) von 11 Ω genügt in allen Fällen. Die Widerstände müssen aber so bemessen sein, dass sie sowohl den grössten in Betracht kommenden Fehlerstrom beim Auftreten eines Isolationsfehlers an einem Hausinstallationsobjekt, als auch den Erdschlußstrom des Hochspannungsnetzes dauernd ertragen. Da dem spezifischen Widerstand der Erde von 10 000 Ω cm²/cm im günstigsten Zustand der Erde ein solcher von 20 000 Ω cm²/cm im ungünstigsten Zustand entspricht, und bei einem spezifischen Widerstand von 13 000 Ω cm²/cm mit der minimalen Elektrode von 8 m Länge der maximal zulässige Widerstand von 20 Ω erreicht wird, so müssen bei grösseren spezifischen Widerständen die Elektrodenlängen für die Einhaltung von 20 Ω im ungünstigsten Zustand der Erde berechnet werden. Es sind aber trotzdem bis zu einem spezifischen Widerstand von 20 000 Ω cm²/cm im ungünstigsten Zustand der Erdung die genannten Widerstände vorzuschalten.

Schliesslich ist noch mit Hilfe der Fig. 20 zu prüfen, ob die minimale oder die errechnete Elektrode auch für den Hochspannungserdschlußstrom eine genügend grosse Oberfläche aufweist.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass für die aus wirtschaftlichen und technischen Gründen genannte Maximallänge der Elektroden bereits bei einem spezifischen Widerstand von 34 000 Ω cm²/cm der höchstzulässige Widerstand von 20 Ω erreicht wird und bei grösseren spezifischen Widerständen, je nach Grösse des Erdschlußstromes des Hochspannungsnetzes, an die Nullpunkterdungen gewisse Konzessionen gemacht werden müssen.

D. Ermittlung der gegenseitigen Beeinflussung der Elektroden

Bei Kraftwerken, Unterwerken und Transformatorenstationen müssen Erdungen erstellt werden, die verschiedenen Zwecken dienen. Dabei besteht die Gefahr, dass die Spannung, die an der einen Erdung auftritt, sich auf die anderen Erdungen in

[1]) siehe Bemerkung am Schluss.

mehr oder weniger hohem Masse übertragen kann. Beim Verlegen der Elektroden muss deshalb dafür gesorgt werden, dass eine solche Übertragung nur in einem ungefährlichen Masse erfolgen kann.

Bei einer Transformatorenstation, aus welcher zwei Niederspannungsnetze mit verschiedenen Schutzsystemen (Nullung und Schutzerdung) gespiesen werden, müssen mindestens drei voneinander getrennte Erdungen erstellt werden, nämlich je eine für die zwei Nullpunkte und eine als Schutzerdung. Tritt nun im Netz mit dem Schutzerdungssystem für die Hausinstallations-Objekte ein Erdschluss auf, so entsteht an der Erdung des Transformatoren-Nullpunktes eine Spannung, die angenähert der Sternspannung des Netzes entspricht. Liegt die Elektrode dieser Erdung in der Nähe der Elektrode der Schutzerdung oder der andern Nullpunkterdung, so können die geerdeten Anlageteile oder der Nulleiter und damit alle genullten Objekte des andern Netzes gefährliche Spannungen gegen Erde annehmen. Sind in einer Transformatorenstation hochspannungsseitig Überspannungsableiter eingebaut, so werden beim Ansprechen der Ableiter an der Erdung Spannungen entstehen, die auf die anderen Erdungen je nach Distanz in mehr oder weniger hohem Masse übertragen werden. Es können somit auch in einem solchen Falle gefährliche Zustände entstehen.

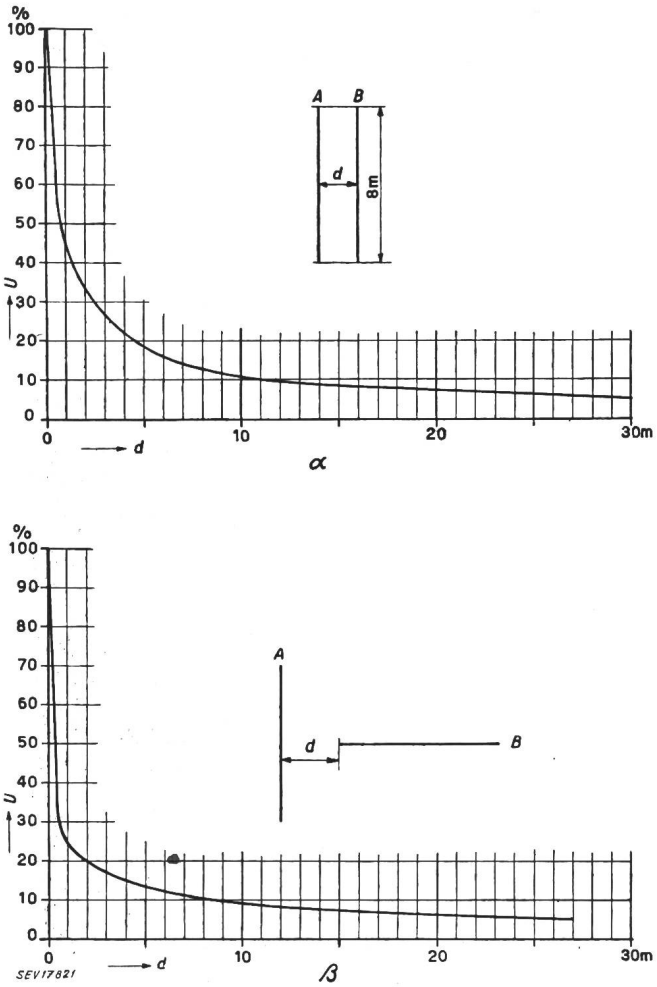

Fig. 21
Beeinflussung zweier gradliniger Elektroden
α parallel verlegte Elektroden; β senkrecht zueinander verlegte Elektroden; Eingrabtiefe = 70 cm
U Spannung der beeinflussten Elektrode in % der an der anderen Elektrode liegenden Spannung; *d* Abstand der Elektroden; *A*, *B* Elektroden

Um nun beurteilen zu können, welche Minimaldistanzen zwischen den einzelnen Elektroden eingehalten werden müssen, wurden die gegenseitigen Beeinflussungen der Elektroden verschiedener Ausführungsarten gemessen. Die Resultate dieser Versuche sind in den Fig. 21...22 aufgezeichnet, und zwar ist die an der beeinflussten Elektrode auftretende Spannung in Prozenten der an der stromführenden Erdung auftretenden Spannung in Abhängigkeit von der Distanz zwischen den Elektroden aufgetragen.

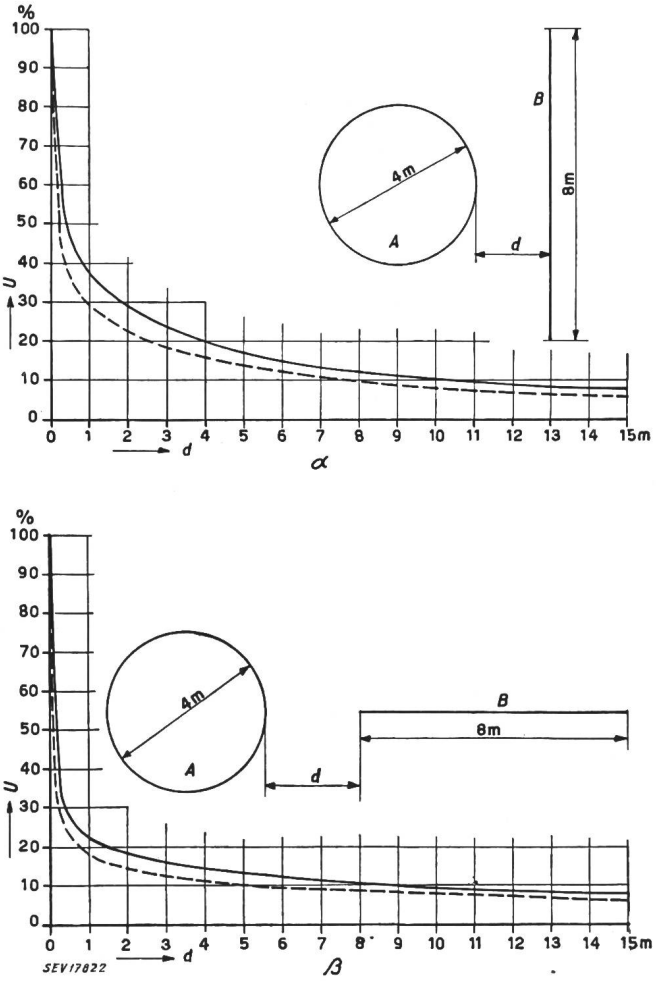

Fig. 22
Gegenseitige Beeinflussung einer kreisförmigen und einer geradlinigen Elektrode
α, β verschiedene Anordnungen der Elektroden; Eingrabtiefe = 70 cm
—— Spannung an *A* gelegt
- - - - Spannung an *B* gelegt
Bezeichnungen siehe Fig. 21

Beträgt z. B. die zwischen der stromführenden Elektrode und der Erde auftretende Spannung 290 V (Erdschluss in einem 500-V-Netz mit Schutzerdungssystem) und soll an der beeinflussten Erdung keine höhere Spannung als 50 V entstehen, so darf die an dieser Elektrode auftretende Spannung höch-

stens 17 % der an der stromführenden Elektrode liegenden Spannung betragen. Um dies zu erreichen, müssten die Elektroden folgendermassen distanziert sein:

bei zwei parallel zueinander liegenden Elekroden 5,5 m,
bei senkrecht zueinander liegenden Elektroden 2,8 m,
bei einer kreisrunden und einer geradlinigen Elektrode, wobei die kreisrunde Elektrode stromführend ist und die geradlinige tangential zur kreisrunden liegt, 4,8 m, und schliesslich, wenn die geradlinige Elektrode in radialer Richtung zur kreisrunden liegt, 2,8 m.

Diese Versuche zeigen, wie sehr die Mindestdistanz zwischen den Elektroden von der Verlegungsart und der Form der Elektroden abhängig ist. Da die angegebenen Mindestdistanzen nur bei einem homogenen Erdreich zutreffen, so ist es unbedingt nötig, dass die gegenseitigen Beeinflussungen der verschiedenen Erdungen durch Messungen nachkontrolliert werden.

E. Zusammenfassung

Mit Hilfe des Gesagten ist es auf verhältnismässig einfache Art und Weise möglich, die Erdungen elektrischer Anlagen je nach Zweckbestimmung und spezifischem Widerstand der Erde zum voraus zu ermitteln. Dabei geht man am zweckmässigsten in folgender Reihenfolge vor:

1. Ermittlung des spezifischen Widerstandes der Erde an der Stelle wo die Elektrode verlegt werden sollte [2]).
2. Umrechnung des gemessenen spezifischen Widerstandes auf die beiden Grenzwerte.
3. Ermittlung der Elektrodenabmessungen für die Einhaltung eines vorgeschriebenen Widerstandes oder, wenn ein solcher aus technischen und wirtschaftlichen Gründen nicht eingehalten werden kann, Ermittlung der Abmessungen, der Form und der Verlegungsart für die Einhaltung der maximal zulässigen Schritt- und Berührungsspannungen.
4. Kontrolle der errechneten Elektroden in Bezug auf die maximal zulässige Erwärmung der Erde.
5. Bestimmung der gegenseitigen Lage der verschiedenen für ein bestimmtes Objekt in Betracht kommenden Elektroden.

F. Bemerkung

Die vorstehenden Berechnungen beziehen sich ausschliesslich auf Bandelektroden mit dem minimal zulässigen Querschnitt von 3 × 30 mm. Für die maximal zulässigen Schritt- und Berührungsspannungen sind Werte angenommen worden, die in der Starkstromverordnung noch nicht verankert sind. Sollten für diese Spannungen bei einer gelegentlichen Revision der Vorschriften andere maximal zulässige Werte festgelegt werden, so müssten die für die Berechnungen der Erdungen gegebenen Darstellungen zum Teil auf Grund der von den EKZ vorgenommenen Versuche neu berechnet werden.

Ausserdem ist zu sagen, dass sich alle Berechnungen auf ein gleichmässiges Erdreich beziehen und dass bei einem geschichteten Erdreich in der Nähe der Elektroden gewisse Abweichungen entstehen, die nicht zum voraus ermittelt werden können. Ferner ist bei allen diesen Berechnungen der Einfluss der Erdleitung auf die Gestaltung der Schritt- und Berührungsspannung nicht berücksichtigt. Damit die Erdleitungen keinen ungünstigen Einfluss ausüben können, sind sie unmittelbar beim zu erdenden Objekt auf die Tiefe der Elektrode und erst dann zur Elektrode zu führen. Bei Nullpunkterdungen in Niederspannungsnetzen, in denen das «Schutzerdungssystem» für die Hausinstallationsobjekte eingeführt ist, müssen die Erdleitungen isoliert verlegt werden.

Aus den angeführten Gründen ist es unbedingt nötig, dass jede Erdung in Bezug auf den Erdwiderstand, die Spannungsverteilung an der Erdoberfläche und die Beeinflussung durch andere in der Nähe liegende Erdungen durch entsprechende Messungen nachkontrolliert werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Erdungen erst nach Verlauf von 1...2 Jahren nach der Verlegung der Elektroden ihren endgültigen Wert annehmen.

Eine Nachkontrolle an einer grösseren Zahl von Erdungen im Absatzgebiet der EKZ haben gezeigt, dass der weitaus grösste Teil der Erdungen mit den Vorausberechnungen gut übereinstimmen, bei einem kleineren Teil eher günstigere Resultate erzielt wurden und nur bei einer verschwindend kleinen Zahl sich die Erdungen als ungenügend erwiesen.

[2]) siehe Bull. SEV Bd. 25(1934), Nr. 23...26: Schutzmassnahmen zur Verhütung elektrischer Unfälle in den Hausinstallationen.

Adresse des Autors:
M. Wettstein, Ingenieur, Kapfstrasse 3, Zürich 32.

Risques d'incendie provoqués par des tubes isolants armés introduits dans des boîtiers d'appareils mis à la terre par le neutre

Communiqué par l'*Inspectorat des installations à courant fort (E. Riesen)*

614.84 : 621.3

Deux exemples de débuts d'incendie montrent qu'il importe de tenir compte des dispositions du chiffre 4 du § 42 des Prescriptions de l'ASE sur les installations intérieures, concernant l'introduction de tubes isolants armés dans des appareils mis à la terre par le neutre.

Am Beispiel zweier Schäden wird gezeigt, dass es wichtig ist, die Bestimmungen von Ziffer 4 in § 42 der Hausinstallationsvorschriften (HV) des SEV über das Einführen von Isolierrohren in genullte Apparate zu beachten.

(Traduction)

Introduction

Lors de contrôles d'installations intérieures dans des réseaux où est appliquée la mise à la terre par le neutre, l'Inspectorat des installations à courant fort constate maintes fois que des tubes isolants armés sont directement introduits dans des boîtiers d'appareils mis à la terre par le neutre, au lieu d'être isolés de ces boîtiers. En exposant ci-après, à titre d'exemple, deux cas de débuts d'incendie dus à cette inobservation des prescriptions, l'Inspectorat tient à rappeler aux organes de contrôle des entreprises électriques combien il est important de