Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 25 (1934)

Heft: 24

Artikel: Schutzmassnahmen zur Vermeidung elektrischer Unfälle in den Hausinstallationen [Fortsetzung]

Autor: Wettstein, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1056590

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: 26.12.2025

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

ensuite percé le plafond et s'est échappée par la fenêtre de la cuisine à l'étage en-dessous en y faisant un trou de quelques cm de diamètre (Fig. 17).

Nous ne pouvons clore cet aperçu sans faire appel à la bonne volonté de tous les lecteurs en les priant instamment de communiquer au secrétariat général les observations qu'ils pourraient faire sur des coups de foudre qui ne touchent pas les bâtiments et dont nous n'avons que rarement connaissance. Ces communications contribueront à la réussite d'une entreprise d'intérêt général incontestable, puisqu'elle sert à la lutte contre un phénomène naturel qui coûte au peuple suisse plus d'un demi-million par an.

Schutzmassnahmen zur Vermeidung elektrischer Unfälle in den Hausinstallationen.

Von *M. Wettstein*, Zürich.

621.316.99

(Fortsetzung von Seite 619.)

C. Die Anwendung des Erdungssystems.

Bei der Anwendung des Erdungssystemes zum Schutze von Menschen und Tieren gegen die Gefahren des elektrischen Stromes, die bei Isolationsfehlern entstehen können, werden die Metallteile der elektrischen Maschinen und Apparate und unter Umständen auch die Metallumhüllungen von Leitungen mit einer Erdleitung an eine in der Erde liegende Elektrode angeschlossen. Man will damit erreichen, dass zwischen solchen Metallteilen und der Erde keine oder wenigstens keine gefährlichen Spannungen auftreten können. Eine nähere Untersuchung zeigt aber, dass dieses Ziel nicht in allen Fällen erreicht werden kann. Man muss dann darnach trachten, dass der Fehlerstrom innert möglichst kurzer Zeit abgeschaltet wird, so dass die gefährlichen Zustände nur ganz kurze Zeit bestehen bleiben können. Ist auch dies nicht möglich, so kann das Erdungssystem nicht angewendet werden und es sind andere Schutzmassnahmen zu treffen. In Nachstehendem soll nun gezeigt werden, in welcher Weise das Erdungssystem wirkt und unter welchen Bedingungen dieses System angewendet werden kann:

1. *Der einpolige Erdschluss.*

Entsteht an einem elektrischen Apparat oder an einer elektrischen Maschine ein Isolationsfehler, so dass ein Polleiter mit dem Metallgehäuse in Berührung kommt, und ist dieses Gehäuse weder geerdet noch genullt, so tritt zwischen dem betrefenden Gehäuse und der Erde eine Spannung auf, die gleich gross wie die Phasenspannung des Netzes ist. Diese Behauptung ist aber nur dann sicher zutreffend, wenn der Transformatornullpunkt an Erde gelegt ist. Da die neue Starkstromverordnung in Art. 26 eine solche Erdung vorschreibt, können die Untersuchungen über die Schutzerdung auf diesen Fall beschränkt werden. Die Richtigkeit vorstehender Behauptung lässt sich anhand der schematischen Skizze Fig. 19 nachweisen. Dieses Schema stellt ein einfaches Niederspannungsnetz dar, an welches ein Elektromotor M angeschlossen ist, der bei F einen Isolationsfehler aufweist, wobei ein Polleiter das Motorgehäuse berührt. Da zwischen dem Polleiter und dem Transformatornullpunkt die Phasenspannung herrscht und der Transformatornullpunkt an Erde gelegt ist, so muss auch zwischen dem Objektgehäuse (mit einem Polleiter in Berührung stehend) und der Erde die Phasenspannung herrschen.

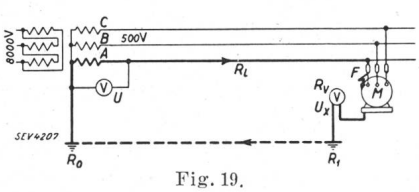

Fig. 19.

Diese Spannung kann auch mit Hilfe eines Voltmeters nachgewiesen werden. Hiefür ist das Voltmeter an das Gehäuse des Motors und eine Erdelektrode anzuschliessen. Im Abschnitt B_4, «Die Eigenschaften der Erdungen», wurde gezeigt, dass die die Elektrode umgebende Erde dem Stromdurchgang einen Widerstand bietet, der von der Dimension der Elektrode und dem spezifischen Widerstand der Erde abhängig ist. Für die Berechnung der Spannung, die bei direkter Messung das Voltmeter anzeigt, müssen somit ausser dem Widerstand der Leitung (R_L) und dem Widerstand des Voltmeters (R_V) auch die Erdwiderstände der Voltmetererdungsstelle (R_1) und der Nullpunktserdungsstelle (R_0) berücksichtigt werden. Ueber den durch das Voltmeter geschlossenen Stromkreis fliesst bei einer Phasenspannung U nach dem Ohmschen Gesetz ein Strom

$$I = \frac{U}{R_L + R_V + R_1 + R_0} \qquad (9)$$

Da besonders der Leitungswiderstand R_L aus Ohmschem und induktivem Widerstand zusammengesetzt ist, so müsste streng genommen im Nenner die geometrische Summe der Widerstände eingesetzt werden. Im Folgenden handelt es sich aber in der Hauptsache nur um überschlägige Rechnungen, bei denen die induktiven Widerstände, die im Verhältnis zu den Ohmschen Widerständen in der Regel klein sind, vernachlässigt werden können. In denjenigen Beispielen, wo die induktiven Widerstände von Bedeutung sind, wird die geometrische Summe gebildet.

In einem 500 V-Netz beträgt die Phasenspannung bekanntlich $U = 500 : \sqrt{3} = 290$ V. Nimmt man für verschiedene Widerstände folgende Werte an:

Leitungswiderstand	$R_L =$	2 Ω
Voltmeterwiderstand	$R_V =$	2000 Ω
Erdwiderstand	$R_1 =$	100 Ω
Erdwiderstand	$R_0 =$	20 Ω
Gesamtwiderstand	$=$	2122 Ω

so fliesst ein Strom von

$$I = \frac{290}{2122} = 0{,}1365 \text{ A.}$$

Das Voltmeter misst dementsprechend eine Spannung von

$$U_V = 0.1365 \cdot 2000 = 273 \text{ V}.$$

Die gemessene Spannung ist also kleiner als die Phasenspannung. Würde man aber ein Voltmeter mit einem Widerstand von 10 000 Ohm anlegen, so würde der im Stromkreis eingeschaltete Widerstand im ganzen 10 122 Ohm und die vom Voltmeter gemessene Spannung $U_V = \frac{290}{10122} \cdot 10\,000 =$ 287 V betragen; das Voltmeter würde also angenähert die Phasenspannung anzeigen. Würde man den Voltmeterwiderstand noch weiter erhöhen, so würde sich auch die gemessene Spannung noch mehr der Phasenspannung nähern.

Diese Beispiele zeigen, dass für die Messung der Spannung zwischen Objekt und Erde ein Voltmeter mit genügend hohem Widerstand verwendet werden muss, weil sonst die gemessene Spannung infolge der Einflüsse der übrigen im Stromkreis eingeschalteten Widerstände wesentlich kleiner wird als die beim offenen Stromkreis herrschende.

Wird nun das Gehäuse eines solch fehlerhaften Objektes von einem auf dem Erdboden stehenden Menschen berührt, so übernimmt der menschliche Körper die Rolle des Voltmeters. Er wird also je nach dem Verhältnis seines Körperwiderstandes zu den übrigen im Stromkreis vorhandenen Widerständen einer mehr oder weniger hohen Spannung (Berührungsspannung) ausgesetzt. Da der Körperwiderstand in der Regel sehr viel grösser sein wird als die Leitungs- und Erdwiderstände, so kann die Berührungsspannung angenähert gleich gross wie die Phasenspannung werden. Infolge des grossen Widerstandes des menschlichen Körpers kann aber auch der Fehlerstrom nicht so gross werden, dass die im Stromkreis eingebauten Sicherungen durchschmelzen. Der gefährliche, vorschriftswidrige Zustand bleibt deshalb solange bestehen, bis das fehlerhafte Objekt ausgeschaltet wird.

Die Erkenntnis, dass die Berührungsspannung von dem zwischen Objekt und Erde eingeschalteten Widerstand und der Grösse des Fehlerstromes abhängig ist, zeigt nun auch den Weg, der beschritten werden muss, um gefährliche Berührungsspannungen zu vermeiden. Könnte man das fehlerhafte Objekt widerstandslos mit der Erde verbinden, so könnte zwischen Objekt und Erde ja überhaupt keine Spannung entstehen. Leider lässt sich dies nicht bewerkstelligen. Es ist aber *theoretisch* möglich, das Objekt mit einer Elektrode zu verbinden und die Elektrode so zu dimensionieren, dass infolge des kleinen Erdwiderstandes der Elektrode zwischen Objekt und Erde eine ungefährliche, d. h. eine unter 50 V liegende Spannung entsteht. Berührt ein Mensch ein so geerdetes Objekt, so kann er keiner grösseren Spannung ausgesetzt sein als der zwischen Objekt und Erde herrschenden. Die Berührung des fehlerhaften Objektes ist also nicht mehr gefährlich. Immerhin sei hier bemerkt, dass dieses Nichtgefährlichsein nur im Sinne der Vorschriften, also für den allgemeinen Fall gilt; denn es können bekanntermassen Umstände vorliegen, wo auch 50 V Berührungsspannung noch eine Gefahr bedeuten. Es sei dabei auf die von den EKZ durchgeführten Elektrisierversuche [7]) hingewiesen.

[7]) Bull. SEV 1929, Nr. 13.

In gewissen Fällen ist es theoretisch sogar möglich, den Erdwiderstand der genannten Elektrode und denjenigen der Nullpunktselektrode so klein zu machen, dass ein Fehlerstrom entsteht, der die den Objekten vorgeschalteten Sicherungen abzuschmelzen vermag. Dieses zweite Verfahren hätte gegenüber dem ersten noch den Vorteil, dass der Fehler sofort erkannt würde, weil das betreffende Objekt nicht mehr eingeschaltet werden könnte,

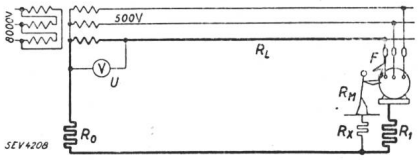

Fig. 20.

ohne dass jedesmal wieder eine Sicherung durchschmelzen würde. Wie weit die eine oder andere Schutzwirkung praktisch erzielt werden kann, zeigen nachstehende Rechnungen. Fig. 20, die ihnen zugrunde liegt, stellt eine gleiche Anordnung dar wie Fig. 19, nur ist das Gehäuse des fehlerhaften Objektes mit einer Erdleitung und einer Erdelektrode an Erde gelegt. Aehnlich wie bei der vorstehenden Betrachtung ist auch bei dieser Anordnung die Grösse des Fehlerstromes von der Phasenspannung U und von der Summe der im Fehlerstromkreis eingeschalteten Widerstände abhängig.

$$I = \frac{U}{R_L + R_1 + R_O} \tag{10}$$

Die Spannung, die zwischen dem fehlerhaften Objekt und der Erde herrscht, ergibt sich aus der Multiplikation des Fehlerstromes mit dem Erdwiderstand der Objekterdung.

$$\underline{U_{R_I}} = I \cdot R_1 = \underline{\frac{U \cdot R_1}{R_L + R_1 + R_O}} \tag{11}$$

Wird nun ein solches Objekt berührt, so wird der menschliche Körper angenähert dieser Spannung ausgesetzt, sofern der Widerstand des menschlichen Körpers R_M im Verhältnis zu seinem eigenen Erdwderstand R_X und zum Widerstand der Objekterdung R_I gross ist. Diese Voraussetzung ist aber im allgemeinen erfüllt.

Aus Formel 10 geht ohne weiteres hervor, dass grosse Fehlerströme, die zum Abschmelzen der Sicherungen nötig sind, nur dann entstehen können, wenn die beiden Erdwiderstände R_1 und R_0 klein sind. Mit künstlichen Elektroden lassen sich aber aus wirtschaftlichen und technischen Gründen in der Regel keine genügend kleinen Erdwiderstände erzielen. Die günstigsten Verhältnisse werden erreicht, wenn für die Erdungen ausgedehnte Wasserleitungsnetze zur Verfügung stehen. In solchen Fällen ergeben sich Erdwiderstände in der Grössenordnung von 1 Ohm. Der Widerstand der Leitung R_L, in welchen auch der Widerstand der Transformatorwicklung eingeschlossen sein soll,

hängt von der Grösse des Transformators und von der Länge der Leitung und dem Querschnitt der Leiter ab. Nimmt man zum Beispiel einen verhältnismässig grossen Transformator und eine kurze Leitung mit einem Gesamtwiderstand von 0,5 Ohm pro Leiter an, und nimmt man ferner an, dass es möglich wäre, sowohl das in Frage kommende Objekt als auch den Transformatornullpunkt an ein ausgedehntes Wasserleitungsnetz anzuschliessen, so dass für jede Erdung ein Widerstand von 1 Ohm resultiert (wobei vorausgesetzt wird, dass zwischen den beiden Erdungsstellen keine metallische Verbindung bestehe), so würde bei einer Betriebsspannung von 500 V verketteter bzw. 290 V Phasenspannung ein Fehlerstrom von

$$I = \frac{290}{0{,}5 + 1 + 1} = 116 \text{ A}$$

entstehen. Da die Installationssicherungen erst beim 2,75fachen des Nennstromes innert kürzester Zeit schmelzen, so dürfte die Nennstromstärke der fraglichen Sicherung nicht mehr als 42 A betragen. Würde aber der Leitungswiderstand grösser (längere Leitung), z. B. 2 Ohm sein, so würde der Fehlerstrom auf

$$I = \frac{290}{2 + 1 + 1} = 72{,}5 \text{ A}$$

sinken, und der Nennstrom der Objektsicherung dürfte 26 A nicht übersteigen. Da in den 500 V-Netzen in vielen Fällen auch die Zähler geerdet werden müssen, so müssen sich die berechneten Sicherungsnennstromstärken auf die Hauptsicherungen der Installationen beziehen. Diese beiden Beispiele zeigen, wie sorgfältig in jedem einzelnen Fall geprüft werden müsste, ob die fraglichen Sicherungen beim Auftreten eines Fehlers rechtzeitig abschmelzen würden oder nicht. Aber auch dann könnte in einzelnen Fällen die Anwendung der Schutzerdung versagen, nämlich wenn die Fehlerstelle selbst einen Widerstand aufweist (z. B. bei Motoren Wicklungsschluss mit dem Gehäuse oder bei mangelhaftem Kontakt der Erdleitung in Steckervorrichtungen). In solchen Fällen wird das Schmelzen der Sicherungen in Frage gestellt. Der Fehlerstrom kann aber doch noch so gross sein, dass an der Objekterdung eine gefährliche Spannung auftritt. Beträgt die Nennstromstärke der Sicherung z. B. 40 A, der Erdwiderstand der Objekterdung 1 Ohm und wird der Fehlerstrom durch den Widerstand der Fehlerstelle auf beispielsweise 80 A reduziert, so kann dieser Zustand längere Zeit bestehen bleiben, wobei zwischen dem fehlerhaften Objekt und der Erde eine Spannung von 80 V besteht. In solchen Fällen wäre ausser der Gefährdung von Menschen eine Brandgefahr infolge der Erwärmung der Fehlerstelle ebenfalls nicht ganz ausgeschlossen.

Den Transformatornullpunkt mit einer ausgedehnten Wasserleitung zu verbinden, ist aber in den meisten Fällen nicht möglich. In der Regel werden künstliche Erdelektroden in Frage kommen müssen, wobei je nach Beschaffenheit des Erdbodens verhältnismässig hohe Kosten erforderlich sind, um den Erdwiderstand nur auf den gemäss Art. 23 der Starkstromverordnungen vorgeschriebenen Höchstwert von 20 Ohm herabzusetzen. Beträgt nun in einem Fehlerstromkreis die Summe aller Widerstände 20 Ohm, so sinkt der Fehlerstrom bei 290 V Phasenspannung auf

$$I = \frac{290}{20} = 14{,}5 \text{ A.}$$

Bei diesem Strom schmilzt selbst eine 6 A-Sicherung nicht mehr zuverlässig innert kürzester Frist. Man sieht daraus, dass bei der Anwendung künstlicher Elektroden für die Transformator-Nullpunktserdung im allgemeinen ein sicheres Abschmelzen der Sicherungen beim Auftreten von Fehlern nicht mehr gewährleistet ist. Es muss deshalb die Bedingung erfüllt werden, dass beim Auftreten von Fehlern keine gefährlichen Berührungsspannungen entstehen können, d. h. dass zwischen Objektgehäuse und der Erde keine grössere Spannung als 50 V besteht.

Es ist nun zu untersuchen, welche Massnahmen zur Vermeidung gefährlicher Berührungsspannungen getroffen werden müssen. Da vorausgesetzt ist, dass der Erdwiderstand der Nullpunktserdung verhältnismässig gross sei, so kann der Leitungswiderstand, der im Verhältnis zu diesem Erdwiderstand in der Regel klein sein wird, zur Vereinfachung der nachstehenden Rechnungen vernachlässigt werden. Die Formeln 10 und 11 vereinfachen sich dementsprechend, und es ist bei einer Betrachtung der Fig. 20 ohne weiteres einzusehen, dass unter dieser Voraussetzung die Summe der an den Erdungen liegenden Spannungen gleich der Phasenspannung sein muss. Es ist also:

$$U = U_{R_1} + U_{R_0} = I \cdot R_1 + I \cdot R_0 \qquad (12)$$

Soll nun $I \cdot R_1$ nicht mehr als 50 V betragen, so muss $I \cdot R_0$ bei 290 V Phasenspannung mindestens 290 — 50 = 240 V betragen. Es muss also das Verhältnis bestehen:

$$\frac{U_{R_I}}{U_{R_0}} = \frac{I \cdot R_1}{I \cdot R_0} = \frac{R_I}{R_0} = \frac{50}{240} = \underline{\frac{1}{4{,}8}}$$

d. h. der Erdwiderstand der Nullpunktserdung muss *4,8mal* grösser sein als derjenige der Objekterdung, damit an der Objekterdung nicht mehr als 50 V Spannungsdifferenz auftreten. Beträgt die Phasenspannung beispielsweise nun 145 V (250 V verkettete Betriebsspannung), so muss das Verhältnis der Widerstände sein:

$$\frac{R_1}{R_0} = \frac{50}{145 - 50} = \underline{\frac{1}{1{,}9}}$$

d. h. der Erdwiderstand der Nullpunktserdung muss in diesem Fall 1,9mal grösser sein als der Erdwiderstand der Objekterdung.

Da die neue Starkstromverordnung für die Nullpunktserdung einen Erdwiderstand von höchstens 20 Ohm zulassen, so dürfen die Widerstände der Objekterdungen im 500 V-Netz höchstens

$$R_1 = \frac{20}{4{,}8} = 4{,}1 \text{ Ohm} \quad \text{und im 250 V-Netz}$$

$$R_1 = \frac{20}{1{,}9} = 10{,}5 \text{ Ohm betragen}$$

Diese zwei Beispiele zeigen, dass die Erdwiderstände der Objekterdungen um so kleiner sein müssen, je höher die Betriebsspannung ist.

Aus vorstehenden Rechnungen geht ausserdem hervor, dass an der Nullpunktserdung eine verhältnismässig hohe Spannung auftreten muss. Es ist deshalb an diesem Ort dafür zu sorgen, dass die Erdleitung des Transformatornullpunktes nicht berührt werden kann und dass im Bereich des Spannungstrichters der Nullpunktserdung keine gefährlichen Schrittspannungen entstehen können. Im Abschnitt B_4, «Die Eigenschaften der Erdungen», wurde auf die Entstehung der Schrittspannungen hingewiesen, und es zeigen die Fig. 7 und insbesondere die Fig. 9 und 10, welche Wege zur Vermeidung grosser Schrittspannungen eingeschlagen werden müssen. Aus der weiteren Untersuchung des Erdungssystemes geht hervor, dass die Erdwiderstände der Objekterdung in Wirklichkeit noch kleiner gewählt werden müssen, als sie sich aus vorstehenden Rechnungen ergaben. Dementsprechend werden auch die Spannungen an den Nullpunktserdungen grösser, und zwar können sie angenähert die Phasenspannung erreichen. Dieser Umstand muss bei der Beurteilung der Schrittspannung beachtet werden. Ferner muss man beachten, dass durch die Schrittspannung besonders die grossen Tiere gefährdet werden. Leider enthält die Starkstromverordnung keine Vorschriften über die zulässige Höhe der Schrittspannungen. Die Erfahrungen, die die EKZ bei Tierunfällen gemacht haben, zeigen aber, dass die Schrittspannung für 1 m Schrittweite nicht mehr als 20 V betragen sollte. Die EKZ haben in diesem Sinne auch eine interne Vorschrift aufgestellt. In einem 500 V-Netz dürfte die Schrittspannung also nur

$$\frac{20 \cdot 100}{290} = \text{ca. } 7\ \%$$

der Phasenspannung betragen. Die Fig. 9 und 10 zeigen, dass bei einer zylindrischen Elektrode von 8 cm Durchmesser, die ein Meter tief in dem Boden eingegraben ist, diese Forderung erfüllt ist. Bei dünnern Elektroden wird die Eingrabtiefe noch etwas grösser sein müssen.

2. *Der zweipolige Erdschluss.*

Schmelzen beim Auftreten eines Isolationsfehlers die Sicherungen des betreffenden Objektes nicht durch, was in der Regel der Fall sein wird, so können die Isolationsfehler längere Zeit bestehen bleiben, ohne dass sie bemerkt werden. Infolgedessen können weitere Fehler auftreten, und zwar entweder am gleichen oder an andern Polen. Es ist deshalb noch zu untersuchen, wie sich die Spannungsverhältnisse an den Objekterdungen in diesen Fällen gestalten.

Treten an zwei Objekten Isolationsfehler am gleichen Pol auf (Fig. 21, Objekte A und B), so fliesst durch die Transformatornullpunktserdung die Summe der beiden über die Objekterdungen fliessenden Ströme. Infolgedessen wird die Spannung an der Nullpunktserdung grösser als beim Auftreten eines Fehlers an einem einzigen Objekt. Dementsprechend werden an den Objekterdungen die Spannungen niedriger. Die Verhältnisse gestalten sich also eher günstiger, als wenn nur ein Fehler aufgetreten wäre.

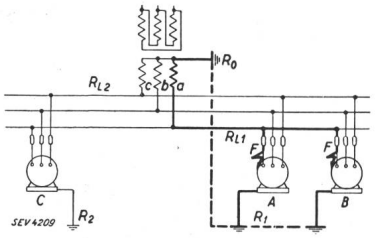

Fig. 21.

Entsteht aber an einem zweiten Objekt (C) ein Fehler an einem andern Pol, so gestalten sich die Verhältnisse wesentlich anders. Gemäss Fig. 22 fliesst der Fehlerstrom von der Transformatorklemme a über die Leitung und die Fehlerstelle am Objekt A zur Erde. Hier verteilt er sich; ein Teil fliesst über die Fehlerstelle des zweiten Objektes (C) zur Transformatorklemme c und der andere Teil über die Nullpunktserdung zum Transformatornullpunkt zurück. Sind die Widerstände der Objekterdungen (R_1 und R_2) im Verhältnis zum Widerstand der Nullpunktserdung klein — dies muss ja für die Beherrschung des einpoligen Erdschlusses der Fall sein — so wird auch der zum Transformatornullpunkt zurückfliessende Strom so klein, dass er für weitere Untersuchungen vernachlässigt werden kann. Die Richtigkeit dieser Behauptung soll an nachstehenden Beispielen nachgewiesen werden. Fürs erste sei angenommen, die Widerstände der beiden Objekterdungen seien gleich gross und betragen je 4 Ohm und derjenige der Nullpunktserdung betrage 20 Ohm. Zur Vereinfachung der Rechnung sei ferner angenommen, dass die Widerstände der Transformatorwicklung und der Leitungen so klein seien, dass sie vernachlässigt werden können.

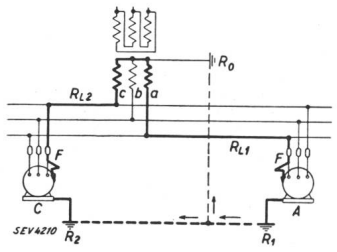

Fig. 22.

Die genaue Untersuchung lässt sich am besten anhand des Strom- und Spannungsdiagrammes durchführen. Das hiefür in Betracht kommende Widerstandsschema ist in Fig. 23 gezeichnet.

Für die Aufzeichnung der Strom- und Spannungsdiagramme (Fig. 24 und 25) müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

1. Die geometrische Summe der in Punkt E zusammenfliessenden Ströme muss gleich Null sein, d. h., bezieht man alle Stromvektoren auf die Richtung gegen den Punkt E, so müssen die drei Vektoren ein geschlossenes Dreieck ergeben.

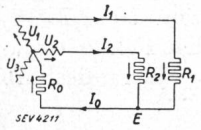

Fig. 23.

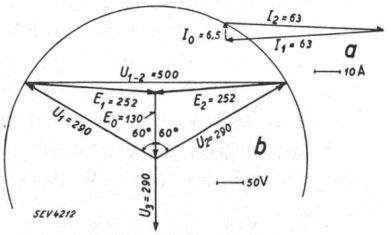

Fig. 24.

2. Bezieht man die Spannungsvektoren auf die in Fig. 23 angedeutete Richtung, so müssen die Vektoren U_1, E_1 $(= I_1 \cdot R_1)$ und E_0 $(= I_0 \cdot R_0)$ sowie diejenigen U_2, E_2 $(= I_2 \cdot R_2)$ und E_0 $(= I_0 \cdot R_0)$ und schliesslich diejenigen U_1, E_1, E_2, U_2 geschlossene Polygone ergeben.

Da die Widerstände R_1 und R_2 gleich gross angenommen sind, so werden auch die Ströme I_1 und I_2 sowie die EMK E_1 und E_2 gleich gross. Die Richtungen und Grössen der Spannungen U_1 und U_2 sind gegeben. Diese Spannungen betragen in einem 500 V-Netz 290 V und sind um 120° gegeneinander verschoben.

Die die vorstehenden Bedingungen erfüllenden Diagramme sind in Fig. 24 a und b aufgezeichnet. Die Ströme I_1 und I_2 betragen je 63 A und der über den Nulleiter fliessende Strom I_0 beträgt 6,5 A. Vernachlässigt man bei der Berechnung der Fehlerströme I_1 und I_2 den über den Nullpunkt fliessenden Strom I_0, so können die Ströme aus der verketteten Netzspannung und der Summe der beiden Objekterdwiderstände berechnet werden. Es wird dann

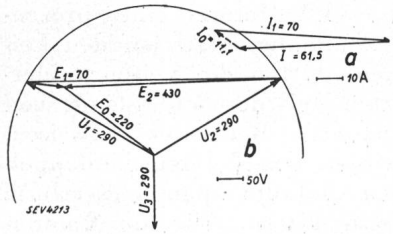

Fig. 25

$$I_1 = I_2 = \frac{500}{4 + 4} = 62{,}5 \text{ A.}$$

Der Fehler des auf die vereinfachte Art berechneten Fehlerstromes ist also nur ganz unbedeutend und kann für die im praktischen Betrieb in Frage kommenden Berechnungen ohne weiteres in Kauf genommen werden. Ebenso ist die Berechnung der zwischen den Objektgehäusen und der Erde auftretenden Spannungen E_1 und E_2 auf die vereinfachte Art zulässig. Gemäss den Diagrammen betragen sie je *252 V*, und die vereinfachte Rechnung ergibt

$$E_1 = E_2 = I \cdot R_1 = I \cdot R_2 = 62{,}5 \cdot 4 = 250 \text{ Volt.}$$

Aber auch dann, wenn die beiden Objekterdwiderstände nicht gleich gross sind, kann die vereinfachte Rechnung angewendet werden. In Fig. 25 a und b sind die Strom- und Spannungsdiagramme aufgezeichnet für die Widerstände $R_1 = 1$ Ohm, $R_2 = 7$ Ohm und $R_0 = 20$ Ohm. Die Summe der beiden Objektwiderstände wurde also gleich gross angenommen wie im ersten Beispiel. Dementsprechend wird der Fehlerstrom, nach vereinfachter Methode gerechnet, wieder 62,5 A betragen. Das Stromdiagramm ergibt Fehlerströme von $I_1 = 70$, $I_2 = 61{,}5$ und $I_0 = 11{,}5$ A. Der grössere der beiden Fehlerströme würde also in Wirklichkeit ungefähr 12 % grösser als der nach der vereinfachten Methode berechnete. Gemäss Spannungsdiagramm betragen die beiden an den Objekterdungen liegenden Spannungen $E_1 = 70$ V und $E_2 = 430$ V. Die vereinfachte Rechnung würde ergeben

$$\text{für } E_1 = I \cdot R_1 = 62{,}5 \cdot 1 = 62{,}5 \text{ und}$$
$$E_2 = I \cdot R_2 = 62{,}5 \cdot 7 = 437{,}5 \text{ V.}$$

Die eine Spannung wurde also ungefähr 10 % zu klein und die andere ungefähr 2 % zu gross berechnet. Nun wird aber nachstehend gezeigt, dass die Objekterdungen im Verhältnis zur Nullpunktserdung noch kleiner sein müssen, als in den beiden Beispielen angenommen wurde. Dementsprechend werden auch die durch die vereinfachte Rechnung gemachten Fehler entsprechend kleiner. Für den praktischen Betrieb genügt es deshalb vollkommen, die Fehlerströme unter Vernachlässigung des Nullpunktsstromes zu berechnen. Ausserdem haben die beiden Beispiele gezeigt, dass sich die an den Objekterdungen auftretenden Spannungen zur verketteten Netzspannung angenähert verhalten wie die einzelnen Objekterdwiderstände zur Summe dieser Widerstände. Sind die beiden Erdwiderstände gleich gross, so sind die Spannungen zwischen den Gehäusen der Objekte und der Erde gleich der halben verketteten Netzspannung; bei einem 500 V-Netz somit 250 V. Die an den Erdungsstellen maximal zulässigen Spannungen werden also ganz bedeutend überschritten, und eine Herabsetzung durch eine Veränderung der Erdwiderstände ist nicht möglich, weil die Verbesserung des einen Widerstandes nur eine Erhöhung der Spannung am andern Widerstand mit sich bringt, wie das zweite Beispiel gezeigt hat. Die Folgen des doppelpoligen Erdschlusses können deshalb nur durch das Abschmelzen der Sicherungen verhindert werden. Der Fehlerstrom muss also mindestens das 2,75-fache des Sicherungsnennstromes betragen. Da die Fehlerströme verhältnismässig grosse Werte annehmen müssen, so dürfen bei ihrer Berechnung die Widerstände der Transformatorwicklungen und der Leitungen nicht mehr vernachlässigt werden. *Unter Vernachlässigung des über den Nullpunkt fliessenden Stromes ist der Fehlerstrom gleich der verketteten Spannung dividiert durch die geometrische Summe der Widerstände der Transformatorwicklung der beiden in Frage kommenden Polleiter und der beiden Objekterdungen.* Bei der Berechnung der Leiterwider-

stände ist noch zu beachten, dass für den induktiven Widerstand der Leitungen nicht der für die Spannungsabfallberechnung übliche in Betracht kommt, sondern derjenige, der sich bei der Benützung der Erde als Rückleitung ergibt, denn der Strom fliesst ja vom Transformator über die eine Leitung zur ersten Objekterdung und von da durch die Erde zur zweiten Objekterdung, und dann über die zweite Leitung zum Transformator zurück. Der induktive Widerstand einer solchen Schleife, herrührend von dem zwischen dem Leitungsdraht und der Erde pulsierenden Magnetfeld, beträgt für Niederspannungsfreileitungen üblicher Stangenhöhen ungefähr 1 Ohm pro km Schleifenlänge.

Um zu zeigen, von welcher Grössenordnung die Erdübergangswiderstände der Objekterdungen sein dürfen, sollen diese für zwei Beispiele berechnet werden. Das erste Beispiel ist dem praktischen Betrieb entnommen und zeigt die Verhältnisse für lange Leitungen und kleine Transformatorenlei-

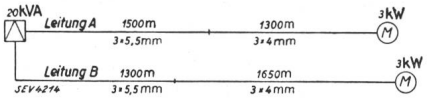

Fig. 26.

stungen bei 500 V Betriebsspannung. An jeder der beiden Leitungen ist ein 3 kW-Motor angeschlossen, die mit je 6 A abzusichern sind. Die Hausinstallations-Hauptsicherungen betragen 15 A. Sind die Zähler geerdet, so müssen beim Auftreten je eines Erdschlusses in den beiden Installationen die Hauptsicherungen durchschmelzen, damit keine gefährlichen Berührungsspannungen bestehen bleiben. Da die Hausinstallationssicherungen erst beim 2,75fachen des Nennstromes innerhalb weniger Sekunden abschmelzen, so muss der Fehlerstrom mindestens $I_{min} = 15 \cdot 2{,}75 = 41{,}2$ A betragen. Der Gesamtwiderstand des Stromkreises darf nicht grösser als

$$R_{max} = \frac{500}{41{,}2} = 12 \text{ Ohm sein.}$$

Die Widerstände der Transformatorwicklung und der Leitungen betragen

	Ohmscher Widerstand	Induktiver Widerstand
Transformator	0,485 Ohm	0,352 Ohm
Leitung A	2,930 »	2,80 »
Leitung B	3,270 »	2,95 »
Total	6,685 Ohm	6,102 Ohm

Bei einem induktiven Widerstand des Stromkreises von 6,1 Ohm bleiben für den gesamten Ohmschen Widerstand noch

$$R = \sqrt{12^2 - 6{,}1^2} = 10{,}3 \text{ Ohm übrig.}$$

Davon entfallen auf die Summe der Ohmschen Widerstände von Transformator und den Leitungen 6,68 Ohm. Die Summe der Erdwiderstände darf also nur 10,3 — 6,68 = 3,62 Ohm und jeder Widerstand für sich allein höchstens 1,8 Ohm betragen.

Noch kleiner müssen unter Umständen die Erdungswiderstände beim Anschluss grösserer Objekte in der Nähe der Transformatorenstation sein. Beim Anschluss eines 30 kW-Motors sind beispielsweise die Hauptsicherungen mit 60 A zu bemessen. Zum Durchschmelzen der Sicherungen muss also mindestens ein Strom von $60 \cdot 2{,}75 =$ 165 A auftreten. Der gesamte in den Fehlerstromkreis eingeschaltete Widerstand darf deshalb höchstens

$$R = \frac{500}{165} \cong 3 \text{ Ohm betragen.}$$

In diesem Falle müssten die Erdwiderstände der Schutzerdungen kleiner als 1,5 Ohm sein. Dabei muss noch damit gerechnet werden, dass bei den Fehlerstellen zusätzliche Widerstände vorhanden sein können, wie z. B. bei einem Gestellschluss einer Motorwicklung. Berücksichtigt man alle diese Umstände, so kommt man zum Schluss, dass der Messwert der Schutzerdung in 500 V-Netzen *nicht mehr als 1 Ohm betragen sollte.*

In bezug auf die maximal zulässigen Widerstände der Objekterdungen gestalten sich die Verhältnisse bei niedrigeren Betriebsspannungen noch ungünstiger. Eine Berechnung der Verhältnisse für die gleichen Motorgrössen wie in den beiden besprochenen Beispielen, aber für eine Betriebsspannung von 250 V verkettet, zeigt folgendes Bild:

Um für die beiden 3 kW-Motoren einen prozentual gleich grossen Spannungsabfall auf den Leitungen zu bekommen, dürfen die Leitungswiderstände nur den vierten Teil der Widerstände von denjenigen des genannten Beispieles aufweisen, weil die Belastungsströme der Motoren die doppelten Werte annehmen und die Spannungsverluste nur halb so gross sein dürfen. Für die Motoren kommen 15 A-Sicherungen und für den Hausanschluss 20 A-Sicherungen in Frage. Der Fehlerstrom muss also

$$I = 20 \cdot 2{,}75 = 55 \text{ A}$$

betragen und der Gesamtwiderstand darf nicht grösser werden als

$$R_{max} = \frac{250}{55} = 4{,}55 \text{ Ohm.}$$

Der vorstehenden Tabelle entsprechend würden die Ohmschen Widerstände von Transformator und Leitungen zusammen

6,685 : 4 = 1,675 Ohm und der induktive Widerstand
6,102 : 4 = 1,53 Ohm betragen.

Der gesamte Ohmsche Widerstand des Stromkreises darf demnach nicht grösser sein als

$$R_\Omega = \sqrt{4{,}55^2 - 1{,}53^2} = 4{,}26 \text{ Ohm.}$$

Die Summe der Widerstände der beiden Objekterdungsstellen darf nicht mehr als

$$4{,}26 - 1{,}675 \simeq 2{,}58 \text{ Ohm}$$

und jeder Erdwiderstand für sich nicht mehr als 1,3 Ohm betragen.

Beim zweiten Beispiel (30 kW-Motor) sind im 250 V-Netz die Hauptsicherungen für 120 A Nennstrom bemessen. Der Fehlerstrom muss somit $120 \cdot 2{,}75 = 330$ A betragen, damit die Sicherungen innerhalb weniger Sekunden abschmelzen. Der Gesamtwiderstand des Stromkreises darf deshalb nicht mehr als

$$R = \frac{250}{330} = 0{,}76 \text{ Ohm betragen.}$$

In diesem Fall müssten die Erdwiderstände ausserordentlich klein sein.

Nachstehende Rechnung zeigt aber, dass mit künstlichen Elektroden unter Aufwendung wirtschaftlich tragbarer Mittel es im allgemeinen nicht möglich ist, solch kleine Widerstände zu erreichen. Um bei einer verhältnismässig gut leitenden Erde mit einem spezifischen Widerstand von 3000 Ohm $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$ einen Erdwiderstand von nicht mehr als 1 Ohm zu erhalten, müsste eine Elektrode verwendet werden, die bei einem spezifischen Widerstand der Erde von 10 000 Ohm $\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$

$$R = 1 \cdot \frac{10\,000}{3000} = 3{,}33 \text{ Ohm}$$

aufweisen würde. Um diesen Widerstand zu erreichen, wäre gemäss Fig. 18 eine Erdelektrode von *60 m Länge* bei einem Querschnitt von 30 × 3 mm nötig. Im allgemeinen wird der spezifische Widerstand der Erde aber wesentlich grösser sein und es müssten dementsprechend auch noch viel längere Elektroden verwendet werden.

Die Anwendung der Erdung kann deshalb nur da in Frage kommen, wo ausgedehnte Wasserleitungen vorhanden sind, die verhältnismässig kleine Erdübergangswiderstände aufweisen.

Bei Betriebsspannungen unter 500 V und in Fabriknetzen mit grossen Motoren oder anderen Anschlussobjekten mit verhältnismässig grossen Leistungen, in denen Betriebsspannungen von 500 und mehr Volt angewendet werden, ist auch bei Verwendung von Wasserleitungen für die Erdung eine genaue Untersuchung der Fehlerstromverhältnisse nötig. Zur Erhöhung der Fehlerströme kann in gewissen Fällen das Zusammenschliessen der Erdleitungen aller von einer Stromquelle aus versorgten Objekte in Frage kommen. Dadurch erreicht man, dass die Fehlerströme nicht über die Objekterdungen fliessen müssen und dementsprechend die Widerstände der Fehlerstromkreise kleiner werden.

Ergibt die Untersuchung, dass beim Auftreten eines doppelpoligen Erdschlusses in einem Netz keine genügend grossen Fehlerströme auftreten, so darf das Erdungssystem nicht angewendet werden und es ist durch ein anderes Schutzsystem zu ersetzen. Ist das Nachziehen des Nulleiters nicht mit sehr grossen Kosten verbunden, so kann die Nullung, in den andern Fällen besonders die Schutzschaltung, in Frage kommen.

3. Das Zusammentreffen von Netzen mit verschiedenen Schutzsystemen und die Folgen beim Auftreten von Fehlern.

Eine ganz besondere Aufmerksamkeit muss den Objekterdungen dann geschenkt werden, wenn eine Ortschaft mit zwei Netzen verschiedener Spannungen versorgt wird und im einen Netz die Erdung und im andern die Nullung angewendet wird. Es kann dies der Fall sein, wenn zum Beispiel ein sogenanntes Kraftnetz ohne nachgeführten Nullleiter und daneben ein Netz für die allgemeine Versorgung mit nachgeführtem Nullpunkt vorhanden ist. Wie gezeigt wurde, müssen die Gehäuse der zu erdenden Objekte an das Wasserleitungsnetz der Ortschaft angeschlossen werden. Im nächsten Kapitel wird ferner gezeigt, dass auch bei der Nullung der Nulleiter des allgemeinen Netzes an die Wasserleitung angeschlossen werden sollte. Sind nun eine Objekterdung des Kraftnetzes und eine Nulleitererdung des andern Netzes verhältnismässig nahe beieinander an die Wasserleitung angeschlossen und tritt im Kraftnetz an einem Objekt ein Isolationsfehler auf, so nehmen der Nulleiter des allgemeinen Netzes und damit die Gehäuse aller genullten Objekte eine Spannung gegen Erde von der gleichen Grössenordnung an wie das fehlerhafte Objekt. Da die Sicherungen des Objektes nicht sicher durchschmelzen, so kann der Zustand längere Zeit bestehen bleiben.

Am deutlichsten tritt diese Erscheinung da auf, wo z. B. ein 380/220 V-Netz von einem 500 V-Netz aus über einen Transformator gespiesen wird (Fig. 27).

Muss in einem solchen Fall das Transformatorgehäuse, weil es der Berührung zugänglich ist, geerdet werden, so muss die Schutzerdung nach Vor-

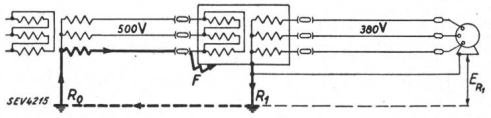

Fig. 27.

stehendem an die Wasserleitung, sofern eine solche vorhanden ist, angeschlossen werden. Mit Rücksicht auf die bei einem Erdschluss eines Polleiters im 380/220 V-Netz am Nulleiter auftretende Spannung gegen Erde sollte aber auch der Nulleiter an die Wasserleitung angeschlossen werden. Tritt nun an der 500 V-Seite des Transformators ein Erdschluss auf, so nehmen das Gehäuse des Transformators und wegen der gemeinsamen Erdung auch

alle Gehäuse der genullten Objekte eine Spannung von 50 V gegen Erde an, sofern das Widerstandsverhältnis der Schutzerdung zur Nullpunktserdung des Haupttransformators, wie verlangt, 1 : 4,8 beträgt. Gemäss § 26 der Starkstromverordnung wäre dieser Zustand zulässig. Da aber solche Zustände längere Zeit bestehen bleiben können und dabei unter Umständen eine grössere Zahl von Objekten betroffen werden, die nicht nur zufällig berührt werden können, sondern die betriebsmässig berührt werden müssen (Kochherde), so muss man sich fragen, ob es nicht angezeigt erscheint, die maximal zulässige Berührungsspannung noch weiter herabzusetzen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine Berührungsspannung von 50 V eine bedeutende Schreckwirkung auszuüben vermag und dass die von den EKZ durchgeführten Elektrisierversuche ergeben haben, dass unter Umständen schon 30 V gefährlich sein können. Auf Grund dieser Ueberlegung haben die EKZ in ihren Werkvorschriften für solche Fälle eine maximal zulässige Berührungsspannung von 20 V festgelegt.

Für die Einhaltung dieser Bedingung muss in einem 500 V-Netz das Verhältnis des Widerstandes der Objekterdung R_1 zum Widerstand der Nullpunktserdung R_0 sein:

$$\frac{R_1}{R_0} = \frac{20}{270} = \frac{1}{13{,}5}$$

Das heisst, der Widerstand der Nullpunktserdung muss 13,5mal grösser sein als der Widerstand der Objekterdung. Es wurde im weitern festgestellt, dass der Widerstand der Objekterdung in einem 500 V-Netz mit Rücksicht auf den zweipoligen Erdschluss nicht mehr als ca. 1 Ohm betragen soll. Dementsprechend muss der Widerstand der Nullpunktserdung mindestens 13,5 Ohm betragen. Dabei ist die in Abschnitt B4 erwähnte Abhängigkeit des Erdwiderstandes vom physikalischen Zustand des Erdbodens zu beachten. Es ist aber anzunehmen, dass sich in einem Ortsnetz die Widerstände sämtlicher Erdungen zeitlich prozentual gleichmässig und in gleichem Sinne ändern und infolgedessen das einmal bestehende Verhältnis der Erdungen zueinander nicht oder nur unwesentlich gestört wird. Bei der Messung der Erdwiderstände muss dagegen die Veränderung der Widerstände infolge der Temperatur- und Feuchtigkeitsänderung des Erdbodens berücksichtigt werden.

Setzt man in einem 500 V-Netz für die Objekterdung als Mittelwert 1 Ohm fest, so steigt dieser Widerstand im Winter auf ca. 1,3 Ohm und fällt im Sommer nach Regenwetter auf ca. 0,7 Ohm. Dementsprechend muss der Widerstand der Nullpunktserde bei mittleren Verhältnissen mindestens 13,5 Ohm, im Winter aber 17,5 Ohm aufweisen. Im Sommer bei durchnässtem Boden darf er auf 9,5 Ohm sinken.

4. Uebertritt von Hoch- auf Niederspannung.

Vorstehende Untersuchungen haben gezeigt, dass der Erdwiderstand der Nullpunktserdung einen verhältnismässig hohen Widerstand aufweisen muss. Artikel 23 der Starkstromverordnung schreibt aber anderseits vor, dass dieser Widerstand unter allen zu erwartenden Verhältnissen 20 Ohm nicht übersteigen dürfe. Man muss also bei der Erstellung einer solchen Erdung sowohl die untere als auch die obere Grenze des Erdwiderstandes beachten. Wenn man bedenkt, wie unsicher eine Vorausberechnung der Elektrodendimension wegen der unhomogenen Beschaffenheit des Erdbodens ist, so ist leicht einzusehen, dass die Erstellung einer Erdung, deren Widerstand innerhalb der verhältnismässig engen Grenzen liegen muss, keine leichte Aufgabe ist. Ausserdem ist es in vielen Fällen praktisch ganz unmöglich, die obere Grenze von 20 Ohm einzuhalten. Es sei zum Beispiel angenommen, der spezifische Widerstand der Erde betrage 50 000 Ohm$\frac{\text{cm}^2}{\text{cm}}$, so muss hiefür eine Elektrode von ca. 50 m Länge bei einem Querschnitt von 30 × 3 mm verlegt werden. Ausser den hohen Kosten, die die Verlegung einer solch langen Elektrode erfordern würde, würden der Verlegung noch eine Reihe anderer Schwierigkeiten entgegenstehen (Beanspruchung von fremdem Boden, Platzverhältnisse in stark überbauten Gegenden eventuell nicht vorhanden usw.). Ferner gibt es Bodenarten, deren spezifischer Widerstand noch viel grösser ist und dementsprechend auch die Elektroden länger sein müssten. Diese beiden Umstände lassen es als geboten erscheinen, die Gründe, die für die Aufstellung der genannten Vorschrift massgebend waren, etwas näher zu überprüfen.

Die Erdung des Systemnullpunktes muss ja offenbar deshalb erfolgen, damit bei einem Uebertritt von Hoch- auf Niederspanung im Niederspannungsnetz keine Spannungen auftreten, denen die Isolationen im Niederspannungsnetz nicht mehr gewachsen wären, so dass Beschädigungen an Anlagen, Maschinen und Apparaten und eventuell sogar Personengefährdungen entstehen könnten. Es frägt sich nun, wie hoch diese Spannung sein darf.

Tritt in einem Drehstromnetz, in dem das Erdungssystem im geschilderten Sinne durchgeführt ist, an einem Objekt ein Erdschluss auf, so nehmen die beiden nicht erdgeschlossenen Pole eine Spannung gegen Erde an, die ungefähr gleich gross ist wie die verkettete Spannung des Netzes. Da dieser Fall im Verhältnis zum Uebertritt von Hoch- auf Niederspannung sehr häufig vorkommt, so darf man offenbar auch beim Uebertritt von Hoch- auf Niederspannung eine Spannung zwischen den Polen und der Erde, die gleich gross ist wie die verkettete Netzspannung, zulassen. Der ungünstigste Fall für die Erhöhung der Spannungsdifferenz zwischen den Polen und der Erde tritt nun offenbar dann ein, wenn die am Erdwiderstand der Nullpunktserdung auftretende Spannung infolge der Schaltung des Transformators um 180° zu einer der drei Phasenspannungen verschoben ist, weil dann die Spannungsdifferenz zwischen dem einen Pol und

der Erde gleich der Phasenspannung plus der an der Erdung liegenden Spannung ist. Damit diese Summe nicht grösser als die verkettete Spannung wird, darf die an der Erde liegende Spannung also nicht grösser als die Differenz zwischen der verketteten und der Phasenspannung, in einem 500 V-Netz also nicht grösser als 210 V sein. Im grössten 8 kV-Netz der EKZ tritt ein Erdschlussstrom von 6 A auf. Demnach dürften die Erdwiderstände der Nullpunktserdungen der an diesem Netz angeschlossenen Transformatoren einen Widerstand von

$$R = \frac{210}{6} = 35 \text{ Ohm}$$

aufweisen. Würde man noch etwas weiter gehen und eine Spannung von 600 V zwischen den Polen und der Erde zulassen, so dürfte der Erdwiderstand der Nullpunktserdungen

$$R = \frac{600 - 290}{6} = 52 \text{ Ohm}$$

betragen. Für ein Hochspannungsnetz von gleich grossem Umfang aber doppelt so hoher Betriebsspannung würde der Erdschlußstrom doppelt so gross. Dementsprechend dürften die Erdwiderstände der Transformatornullpunkte nur halb so gross sein wie in vorstehendem Beispiel. Ferner wird im nächsten Kapitel gezeigt, dass der Erdwiderstand der Transformatornullpunktserdung bei der Anwendung der Nullung sehr klein sein muss, damit beim Uebertritt von Hoch- auf Niederspannung keine gefährlichen Zustände entstehen.

Diese zwei Beispiele zeigen einerseits, dass eine Ueberschreitung der in Art. 23, Ziffer 2, stehenden Vorschrift unter Umständen nicht umgangen werden kann, dass eine solche unter bestimmten Voraussetzungen aber auch keine Gefährdung mit sich bringt und deshalb von der Aufsichtsbehörde auf Grund des Art. 1, Ziffer 3, zugestanden werden sollte. Anderseits kann unter Umständen die Anwendung des maximal zulässigen Widerstandes der Nullpunktserdung einen sehr gefährlichen Zustand ergeben (Uebertritt von Hoch- auf Niederspannung bei Anwendung des Nullungssystems). In solchen Fällen lassen die Vorschriften einen zu grossen Spielraum zu. Es wäre deshalb sehr zu begrüssen, wenn die in Frage kommenden Artikel der Starkstromverordnung, die die Erdung des Systemnullpunktes der Wechselstrom-Niederspannungsnetze betreffen, gelegentlich den Bedingungen, die an die in den Hausinstallationen anzuwendenden Schutzsysteme gestellt werden müssen, angepasst würden.

5. *Zusammenfassung.*

Zusammenfassend kann folgendes gesagt werden: Bei der Anwendung des Erdungssystemes in Niederspannungsanlagen, die an Freileitungsnetzen angeschlossen sind, können im allgemeinen gefährliche Zustände beim Auftreten eines einpoligen Erdschlusses nur dadurch vermieden werden, indem man dafür sorgt, dass an der Objekterdung nur eine ungefährliche, unter 50 V liegende Spannung auftritt. Zu diesem Zwecke müssen die Erdwiderstände der Objekterdungen im Verhältnis zur Nullpunktserdung klein sein. Dieses Verhältnis ist von der Grösse der Betriebsspannung abhängig. Vorstehende Anordnung bedingt aber, dass an der Transformatornullpunktserdung verhältnismässig hohe Spannungen auftreten. Es muss deshalb an dieser Stelle dafür gesorgt werden, dass die Erdleitung nicht berührt werden kann und dass durch geeignete Verlegung der Erdelektrode für die Vermeidung gefährlicher Schrittspannungen gesorgt wird. Infolge des relativ hohen Widerstandes im Fehlerstromkreis werden die Objektsicherungen beim Auftreten eines einpoligen Erdschlusses in der Regel nicht schmelzen; es kann ein solcher Zustand längere Zeit bestehen bleiben und es besteht die Wahrscheinlichkeit, dass ein zweiter Erdschluss an einem andern Pol entsteht. Diese Wahrscheinlichkeit wird noch dadurch erhöht, weil beim einpoligen Erdschluss die beiden andern Pole eine höhere Spannung gegen Erde (bis zur verketteten Spannung) annehmen, die Isolationen also stärker beansprucht werden als beim normalen Netzzustand. Beim Auftreten des doppelpoligen Erdschlusses ist eine Beeinflussung der Spannungen an den Objekterdungen im günstigsten Sinne nicht möglich. Es muss deshalb für die Unterbrechung des Fehlerstromkreises gesorgt werden, d. h. es muss dafür gesorgt werden, dass die Objektsicherungen durchschmelzen oder dass die den Objekten vorgeschalteten automatischen Schalter auslösen. Diese Forderung kann nur erfüllt werden, wenn die Widerstände der Objekterdungen sehr klein sind. Aus diesem Grunde ist die Anwendung des Erdungssystems in der Regel nur da möglich, wo für das Erden der Objekte ausgedehnte Wasserleitungen zur Verfügung stehen. Da bei einem doppelpoligen Erdschluss an jedem Objekt nur die eine der drei Sicherungen, die den Objekten vorgeschaltet sind, durchschmilzt, so besteht bei Motoren die Gefahr, dass sie einphasig weiterlaufen und die Wicklungen infolge übermässiger Erwärmung beschädigt werden. Es ist deshalb zweckmässig, die Motoren durch automatische Schalter zu schützen. Diese Schalter müssen aber *dreipolige*, vom Strom abhängige Auslöseeinrichtungen besitzen. Sind in einem Netz Objekte mit verhältnismässig grossen Leistungen angeschlossen, so kann unter Umständen auch der Anschluss der Objekterdung an die Wasserleitungen nicht zum Ziele führen. In kleinen Netzen, wie z. B. in Fabriknetzen, kann man sich in solchen Fällen dadurch helfen, dass man die Erdleitungen aller in Frage kommenden Objekte metallisch zusammenschliesst, denn durch diese Massnahme werden beim doppelpoligen Erdschluss die Erdwiderstände überbrückt. Ferner ist gezeigt worden, dass die Erdwiderstände der Objekterdung für die Beherrschung des doppelpoligen Erdschlus-

ses um so kleiner sein müssen, je kleiner die Betriebsspannung eines Netzes ist. Die Anwendung des Erdungssystemes eignet sich deshalb eher für höhere als für niedrigere Netzspannung. Auf alle Fälle müssen für die in Frage kommenden Netzverhältnisse die Bedingungen, die an das Erdungssystem gestellt werden müssen, genau geprüft werden. Insbesondere ist das Verhältnis der Erdwiderstände der Objekterdung zur Transformatornullpunktserdung sorgfältig abzuwägen, wenn in einem Ortsnetz zwei verschiedene Spannungssysteme bestehen, wobei in einem die Erdung und im andern die Nullung angewendet wird.

Wird in einem Ortsnetz das Erdungssystem angewendet und können einzelne Objekte nicht an geeignete Wasserleitungen angeschlossen werden, oder ergibt die Untersuchung, dass die Objektsicherungen bei einem doppelpoligen Erdschluss nicht schmelzen, so muss für diese Objekte ein anderes Schutzsystem angewendet werden, und zwar kommt besonders die Schutzschaltung in Frage.

Sind zwei oder mehrere Niederspannungsnetze, in denen die Nulleiter nachgezogen sind, dauernd miteinander parallel geschaltet, so sind auch die Erdwiderstände der Nullpunktserdungen der einzelnen Transformatoren miteinander parallel geschaltet und es muss dementsprechend bei der Abstimmung des Widerstandsverhältnisses zwischen den Objekterdungen und der Nullpunktserdung der resultierende Widerstand aller Nullpunktserdungen berücksichtigt werden. Bei einer Aenderung des Schaltungszustandes ist das Widerstandsverhältnis der Erdungen neu zu prüfen.

Sind Niederspannungsnetze ohne nachgeführten Nulleiter parallel geschaltet, so ist zu beachten, dass das Spannungsverhältnis nicht mehr dem Widerstandsverhältnis der Objekterdung zur Nullpunktserdung entspricht. Bei einem solchen Schaltungszustand fliesst nämlich über die in Frage kommende Objekterdung ein grösserer Strom als über die Nullpunktserdungen bzw. der über die Objekterdung fliessende Strom verteilt sich auf die Nullpunktserdungen der verschiedenen zusammengeschalteten Netze. Dadurch wird die an der Objekterdung liegende Spannung grösser als bei getrenntem Zustand der Netze.

Mit Rücksicht darauf, dass ein einpoliger Erdschluss längere Zeit bestehen bleiben kann und dass beim Auftreten eines doppelpoligen Erdschlusses in den wenigsten Fällen die Sicherungen beider in Frage kommenden Objekte durchschmelzen, der eine Erdschluss also weiter bestehen bleiben wird, ist eine öftere Prüfung der Niederspannungsnetze, in denen die Erdung angewendet wird, auf Endschluss nötig. Zur Erleichterung dieser Prüfung sind in den Transformatorstationen zweckmässige, geeignete Prüfeinrichtungen anzubringen, die jederzeit ein rasches Ueberprüfen des Netzes erlauben.

Ferner ist in allen denjenigen Fällen, wo ein Durchschmelzen von Sicherungen vorkommt und kein sichtbarer Kurzschluss in der betreffenden Installation festgestellt werden kann, ein Aufsuchen des zweiten Erdschlusses am Platz.

In städtischen Netzen, wo sehr ausgedehnte Wasserleitungsnetze für die Erdung der Objekte und der Netznullpunkte zur Verfügung stehen, kann im allgemeinen mit dem Schmelzen der Sicherungen beim Auftreten eines einpoligen Erdschlusses gerechnet werden. Eine gegenseitige Abstimmung der Erdungen ist dann nicht nötig. Immerhin sollten bei Objekten mit grosser Anschlussleistung die Verhältnisse nachgeprüft werden.

(Fortsetzung folgt.)

Technische Mitteilungen. — Communications de nature technique.

Selbsttätige Laststossregelung bei den Berliner Städtischen Elektrizitätswerken.

621.316.728

Durch die Ende 1933 im Kraftwerk West der Berliner Städtischen Elektrizitätswerke (Bewag) in Betrieb genommene Fernregelapparatur werden zwei Turbogeneratoren von je 35 000 kVA im Kraftwerk West selbsttätig so geregelt, dass sie im Parallelbetrieb mit dem gesamten Netz der Bewag vorzugsweise die Belastungsstösse aufnehmen, die durch den elektrischen Bahnbetrieb auf der Berliner S-Bahn hervorgerufen werden und die wegen der raschen und starken Belastungsändeungen für den Netzbetrieb sehr unangenehm sind. Für die Erfüllung dieser Aufgabe bestehen zwei grundsätzliche Voraussetzungen:

1. Die automatische Regelung muss sich an eine Fern- und Summenmessung der Bahnbelastung anschliessen, da diese im Kraftwerk Klingenberg in einer Entfernung von etwa 35 km vom Kraftwerk West gemessen wird.

2. Die automatische Regelung muss ausserordentlich rasch arbeiten, wenn sie die Laststösse auf die Maschinen übertragen soll, ohne dass vorher die anderen parallel arbeitenden, durch Drehzahlregler geregelten Maschinen eingreifen. Jede Verzögerung in der Fernmessapparatur oder in der Regelapparatur würde eine rechtzeitige Lastübernahme durch die geregelten Maschinen verhindern und muss daher peinlichst vermieden werden. Die Regelung setzt einige Zehntelsekunden nach dem Auftreten des Belastungsstosses bereits ein und ist im allgemeinen nach etwa derselben Zeit bereits beendet.

Mit der Leistungsregelung ist eine Frequenzregelung kombiniert, bei der die geregelten Maschinen sich an einer Frequenzänderung ebenso beteiligen wie an einer Lastschwankung, und zwar in einstellbaren, vorgeschriebenen Verhältnissen.

Fig. 1 zeigt die elektrifizierten Strecken der Berliner S-Bahn, also der Stadt-, Ring- und Vorortbahnen, die in ihrer Gesamtheit einen sehr ansehnlichen Stromabnehmer darstellen. Der tägliche Arbeitsbedarf ist etwa 800 000 kWh bei einem höchsten Stundenmittel von etwa 70 000 kW; die aufgenommene Leistung ist wegen der Eigenart des Schnellbahnbetriebes mit ausserordentlich raschen und grossen Schwankungen verknüpft. Normalerweise ist das Bahnnetz in zwei Gruppen aufgeteilt, deren westliche von den Kraftwerken Zschornewitz und Trattendorf der Elektrowerke, deren östliche davon unabhängig von der Bewag versorgt wird. Die beiden Netze sind schematisch mit ihren Hauptkraftwerken angedeutet, die Elektrowerke mit den Kraft-