Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 25 (1934)

Heft: 25

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

Autor: Wettstein, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1056592

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: 22.08.2025

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

Erregung (nach Leerlauf). Der Charakter der Hüllkurve kommt besser zum Ausdruck durch die Wahl eines kleineren Kondensators.

Als Beispiel für die Verwendung der Brücke zur Frequenzänderungsoszillographie diene Fig. 8. Sie zeigt das «Frequenzoszillogramm» des «Heultones» einer Meßschallplatte. Die Frequenz schwankt zwischen 550 und 650 Per./s sinusförmig mit 12 Perioden hin und her.

Das beschriebene Verfahren lässt auch die Registrierung rasch ändernder Drucke, Dehnungen und Erwärmungen zu. Vorteilhaft ist die Möglichkeit der Fernmessung, ferner der geringe Raumbedarf für den Einbau der Saite. Gegenüber andern Verfahren ist hier wie beim Hochfrequenz-Kondensator-Verfahren eine Aufnahme rasch verlaufender *und* stationärer Vorgänge möglich. Dabei lässt sich für mehr qualitative Messungen die Apparatur wesentlich vereinfachen. Es bleiben dann nur Saite, Rückkopplungsverstärker, eine Wolframröhre, Brücke, Einwegtrockengleichrichter, Kondensator und Oszillograph.

Herrn Prof. E. Dünner und Herrn dipl. ing. A. Wälti bin ich für die Unterstützung dieser Arbeit sehr zu Dank verpflichtet. Mit dem Studium einer handelsfertigen Ausführung befasst sich die Firma Trüb, Täuber & Co. A.-G. in Zürich.

Schutzmassnahmen zur Vermeidung elektrischer Unfälle in den Hausinstallationen.

Von *M. Wettstein*, Zürich.

621.316.99

(Fortsetzung von Seite 666.)

D. Die Anwendung des Nullungssystems.

Bei der Anwendung der Nullung zum Schutze von Menschen und Tieren gegen die Gefahren des elektrischen Stromes, die bei Isolationsdefekten in Niederspannungsanlagen entstehen können, werden die Metallteile der Maschinen und Apparate, unter Umständen auch die Metallteile der Installationen (Metallmäntel von Isolierrohren), die nicht zur Stromführung dienen, die aber bei Isolationsdefekten unter Spannung kommen können, an den Nullleiter angeschlossen.

Kommt infolge eines Isolationsfehlers ein stromführender Leiter mit einem normalerweise nicht stromführenen Metallteil, der an den Nulleiter angeschlossen ist, in Berührung, so tritt ein Fehlerstrom auf, der vom Transformator aus über den betreffenden Polleiter zur Fehlerstelle und von da über den Nulleiter zum Transformator zurückfliesst.

Ist in einem Drehstromnetz nur der Nullpunkt des Transformators an Erde gelegt, so besteht zwischen diesem Punkt und der Erde keine Spannungsdifferenz, weil kein Strom zur Erde fliesst. Dagegen muss zwischen der Fehlerstelle und der Erde eine dem Spannungsabfall auf dem Nulleiter entsprechende Spannungsdifferenz bestehen. Ist aber nicht nur der Nullpunkt des Transformators, sondern auch der Nulleiter desjenigen Leitungsstranges, an dem das fehlerhafte Objekt angeschlossen ist, in der Nähe der Fehlerstelle ebenfalls geerdet, so fliesst ein Teil des Fehlerstromes von der Fehlerstelle zur Erde und über die Erdung des Nullpunktes zum Transformator zurück. In einem solchen Fall treten sowohl zwischen der Fehlerstelle und der Erde als auch zwischen dem Transformatornullpunkt und der Erde Spannungsdifferenzen auf, deren Höhe von der Grösse des über die Erde fliessenden Teilstromes und von der Grösse der Erdwiderstände abhängig ist. Diese Spannungen können unter Umständen gefährliche Werte annehmen. Da aber alle nicht stromführenden Metallteile der Maschinen und Apparate mit dem Nulleiter verbunden sind, so können auch an andern fehlerfreien Objekten gefährliche Berührungsspannungen entstehen. Im nachstehenden soll nun an Hand von Beispielen gezeigt werden, welche Mittel zur Vermeidung gefährlicher Berührungsspannungen oder zur raschen Beseitigung dieser gefährlichen Zustände zur Verfügung stehen. Dabei zeigt es sich, dass ein wesentlicher Unterschied darin besteht, ob die Nulleiter der Netze an künstliche Elektroden oder an ausgedehnte Wasserleitungsnetze geerdet werden. Die Untersuchung wird deshalb für die beiden Erdungsarten gesondert durchgeführt. Ausserdem können die Nulleiter eines Netzes und damit alle genullten Objekte eine Spannung gegen Erde annehmen, ohne dass an irgendeinem Objekt selbst ein Fehler aufgetreten wäre, was z. B. dann der Fall ist, wenn der Nulleiter irgendwo unterbrochen wird (Drahtbruch, unrichtige Schaltungen usw.), oder wenn ein Polleiter direkt mit dem Nulleiter oder mit der Erde in Berührung kommt (Drahtbruch, Isolationsfehler an geerdeten und nicht genullten Objekten usw.), oder wenn ein Uebertritt von Hochspannung auf Niederspannung erfolgt.

Auch diese Gefahrenquellen müssen bei der Anwendung der Nullung in Betracht gezogen werden. Die Mittel, die für die Vermeidung dieser Gefahren in Betracht kommen, werden im nachstehenden ebenfalls näher beschrieben.

1. Strom- und Spannungsverhältnisse beim Auftreten von Fehlern an genullten Objekten.

a) Nulleiter an künstliche Elektroden geerdet.

Die einfachsten Verhältnisse ergeben sich, wenn der *Nulleiter* eines Leitungsstranges *nur in der*

Transformatorenstation an Erde gelegt ist. Da die Starkstromverordnung nur die Erdung des Systemnullpunktes, für das Drehstromnetz also nur die Erdung des Sternpunktes vorschreiben und auch nach den Hausinstallationsvorschriften nur für Leitungen von mehr als 500 m Länge eine zweite Erdung des Nulleiters angebracht werden muss, so ist ein solcher Zustand durchaus denkbar. In Fig. 28 ist ein einfaches Drehstromnetz mit einem daran angeschlossenen Objekt, an welchem ein Isolationsfehler entstanden ist, schematisch dargestellt. Dieses Schema zeigt, dass ein Fehlerstrom

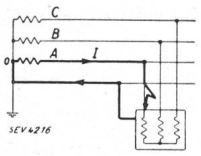


Fig. 28.

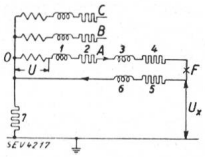


Fig. 29.

von der Transformatorklemme A über den einen Polleiter zur Fehlerstelle und von da über den Nulleiter zum Nullpunkt des Transformators zurückfliesst. Für die Grösse dieses Stromes sind die Phasenspannung und die im beschriebenen Stromkreis eingeschalteten Widerstände massgebend. Der gesamte Widerstand des Stromkreises ist zusammengesetzt aus den induktiven und Ohmschen Widerständen der Transformatorwicklung, des Pol- und des Nulleiters nach dem Widerstandsschema Fig. 29. Da über die Erdung des Transformatornullpunktes kein Strom fliesst (fehlerfreies Netz vorausgesetzt), so kann zwischen dem Transformatornullpunkt und der Erde keine Spannungsdifferenz bestehen. Dagegen besteht zwischen der Fehlerstelle und dem Transformatornullpunkt und damit auch gegen Erde eine Spannungsdifferenz entsprechend der am Nulleiter auftretenden, aus Strom und dem Scheinwiderstand des Nulleiters zu berechnenden Spannung. Diese Spannung beträgt

$$U_x = I \cdot \sqrt{(L_6\omega)^2 + R_5^2}$$

wobei der Strom aus folgender Formel zu berechnen ist

$$I = \frac{U}{\sqrt{(L_1\omega + L_3\omega + L_6\omega)^2 + (R_2 + R_4 + R_5)^2}}$$

Die Spannung zwischen dem fehlerhaften Objekt und der Erde wird somit

$$U_x = U \cdot \frac{\sqrt{(L_6\omega)^2 + R_5)^2}}{\sqrt{(L_1\omega + L_3\omega + L_6\omega)^2 + (R_2 + R_4 + R_5)^2}}$$

Die Spannung zwischen der Fehlerstelle und der Erde ist also gleich der Phasenspannung des Transformators multipliziert mit dem Verhältnis des Scheinwiderstandes des Nulleiters zum Scheinwiderstand des gesamten Stromkreises.

Bei gegebener Betriebsspannung wird die Spannung zwischen der Fehlerstelle und der Erde um so kleiner, je kleiner der Scheinwiderstand des Nulleiters im Verhältnis zur Summe der Scheinwiderstände der Transformatorwicklung und des Polleiters ist. Um möglichst kleine Spannungen zwischen Objektgehäuse und Erde zu erhalten, muss man den Nulleiterquerschnitt im Verhältnis zu den Polleiterquerschnitten möglichst gross wählen. In Netzen, in denen die Nullung nicht angewendet wurde, hat man im allgemeinen aber gerade das Gegenteil gemacht. Man hat den Nulleiterquerschnitt nur ungefähr halb so gross gewählt wie die Polleiterquerschnitte. Wie sich die Verhältnisse in solchen Netzen und in Netzen, in denen Nulleiter- und Polleiterquerschnitt gleich gross gewählt werden, gestalten, soll durch folgende zwei Beispiele gezeigt werden:

Ein mit der Normalspannung von 380/220 V, 50 Per./s, betriebenes Drehstromnetz werde von einem Transformator von 145 kVA Leistung gespiesen. Die Kurzschlußspannung des Transformators betrage 4,2 % und der Ohmsche Spannungsabfall 2,34 % der Nennspannung. Die in Frage kommende Leitung habe eine Länge von 500 m. Der Drahtdurchmesser der Polleiter betrage 5,5 mm und derjenige des Nulleiters das eine Mal 4 mm und das andere Mal 5,5 mm. Der bei einem Isolationsfehler (Schluss eines Polleiters mit dem Gehäuse) an einem am Ende der Leitung angeschlossenen Objekt auftretende Fehlerstrom sowie die zwischen diesem Objektgehäuse und der Erde auftretende Spannungsdifferenz sind auf Grund der angegebenen technischen Daten in Tabelle I berechnet.

Tabelle I.

	Nulleiter 4 mm ∅ Widerstände		Nulleiter 5,5 mm ∅ Widerstände	
	Ohmsche Ω	induktive Ω	Ohmsche Ω	induktive Ω
Transformatorwicklung	0,025	0,038	0,025	0,038
Polleiter	0,370	0,170	0,370	0,170
Nulleiter	0,700	0,180	0,370	0,170
Total	1,095	0,388	0,765	0,378
Scheinwiderstand des ganzen Stromkreises . . . . Ω	1,165		0,853	
Fehlerstrom . . A	**188,5**		**263**	
Scheinwiderstand des Nulleiters Ω	0,721		0,407	
Spannung zwischen fehlerhaftem Objekt und Erde V	**136**		**107**	

Zur bessern Uebersicht wurde in Tabelle II die EMK der einzelnen Leiterelemente berechnet und auf Grund der erhaltenen Resultate und mit Hilfe des Widerstandschemas in Fig. 30 und 31 die Spannungsdiagramme aufgezeichnet.

Tabelle II.

EMK	Nulleiterdurchmesser = 4 mm V	Nulleiterdurchmesser = 5,5 mm V
E_1	188,5 × 0,038 = 7,16	263 × 0,038 = 10,0
E_2	188,5 × 0,025 = 4,7	263 × 0,025 = 6,56
E_3	188,5 × 0,170 = 32,0	263 × 0,170 = 44,4
E_4	188,5 × 0,370 = 69,7	263 × 0,370 = 97,5
E_5	188,5 × 0,700 = 132,0	263 × 0,370 = 97,5
E_6	188,5 × 0,180 = 33,9	263 × 0,170 = 44,4

Die Spannungsdifferenz zwischen dem Objekt und der Erde entspricht in den Diagrammen Fig. 30 und 31 der Strecke O—F.

Diese Diagramme zeigen, dass bei einem derart grossen Transformator der Einfluss der Transformatorwicklung unbedeutend ist. Bei kleinen Transformatoren kann der Wicklungswiderstand dagegen einen wesentlichen Einfluss auf die zu betrachtenden Strom- und Spannungsverhältnisse haben. Um dies zu zeigen, sind in Tabelle III für die gleichen Leitungsverhältnisse, aber für einen Transformator von 20 kVA Leistung wiederum die Fehlerströme und die Spannungsdifferenz berechnet.

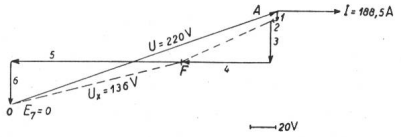


Fig. 30.

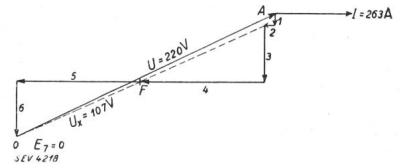


Fig. 31.

Tabelle III.

	Nulleiter 4 mm ⌀ Widerstände		Nulleiter 5,5 mm ⌀ Widerstände	
	Ohmsche Ω	induktive Ω	Ohmsche Ω	induktive Ω
Transformatorwicklung	0,285	0,207	0,285	0,207
Polleiter	0,370	0,170	0,370	0,170
Nulleiter	0,700	0,180	0,370	0,170
Total	1,355	0,557	1,025	0,547
Scheinwiderstand des ganzen Stromkreises . . . . Ω	1,46		1,16	
Fehlerstrom . . A	**151**		**190**	
Scheinwiderstand des Nulleiters Ω	0,721		0,407	
Spannung zwischen fehlerhaftem Objekt und Erde V	**108**		**77,4**	

Für diese Kurzschlußströme ergeben sich folgende EMK der einzelnen Leiterelemente, die in Fig. 32 und 33 zum Spannungsdiagramm zusammengesetzt sind.

Tabelle IV.

EMK	Nulleiterdurchmesser = 4 mm V	Nulleiterdurchmesser = 5,5 mm V
E_1	151 × 0,207 = 31,3	190 × 0,207 = 39,2
E_2	151 × 0,285 = 43,0	190 × 0,285 = 54,0
E_3	151 × 0,170 = 25,6	190 × 0,170 = 32,3
E_4	151 × 0,370 = 55,7	190 × 0,370 = 70,4
E_5	151 × 0,700 = 105,0	190 × 0,370 = 70,4
E_6	151 × 0,180 = 27,1	190 × 0,170 = 32,3

Diese beiden Diagramme zeigen, dass die Widerstände dieses Transformators einen bedeutenden Einfluss auf die Strom- und Spannungsverhältnisse auszuüben vermögen, und zwar werden wegen der grössern Widerstände die Fehlerströme und damit

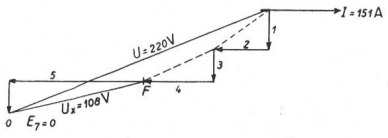


Fig. 32.

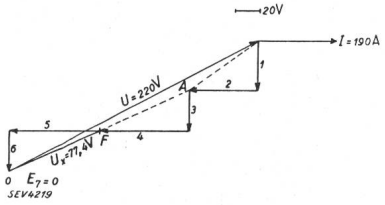


Fig. 33.

auch die Spannungsdifferenzen zwischen Fehlerstelle und Erde (U_x) kleiner als beim grossen Transformator. Aus allen vier Beispielen geht jedoch hervor, dass zwischen dem Objektgehäuse und der Erde unzulässig hohe Spannungen auftreten. Die Verstärkung des Nulleiters hat allerdings eine Senkung der am Objekt auftretenden Berührungsspannung zur Folge. Sie liegt aber immer noch bedeutend über der zulässigen Spannung von 50 V (Art. 26 der Bundesverordnungen). Es muss deshalb dafür gesorgt werden, dass der Fehlerstrom innert kürzester Frist unterbrochen wird, d. h. es

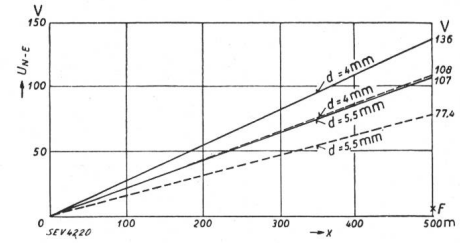


Fig. 34.
Spannung zwischen Nulleiter und Erde ($U_{N\text{-}E}$) in Abhängigkeit der Entfernung von der Transformatorenstation (x) bei verschiedenen Durchmessern d des Nulleiters.
——— für 145 kVA-Transformatoren.
— — für 20 kVA-Transformatoren.

dürfen dem Objekt keine Sicherungen vorgeschaltet sein, deren Nennstromstärke grösser als der 2,75ste Teil der Fehlerstromstärke ist.

Bis zum Durchschmelzen der Sicherungen würden aber nicht nur das fehlerhafte Objekt, sondern auch alle andern Objekte an der betreffenden Lei-

tung, die genullt sind, eine je nach der Lage des Anschlussortes mehr oder weniger hohe Spannung gegen Erde annehmen. Ist der Nulleiterquerschnitt auf der ganzen Länge unverändert, so nimmt die Spannung zwischen Nulleiter und Erde proportional der Entfernung vom Transformatornullpunkt zu und erreicht bei der Fehlerstelle den Höchstwert. Diese Erscheinung ist in Fig. 34 graphisch dargestellt, und zwar ist jeweils über der Entfernung von der Transformatorenstation (Abszisse) die zugehörige Spannungsdifferenz zwischen Nullleiter und Erde (Ordinate) aufgetragen. Da 50 V als maximal zulässige Berührungsspannung festgesetzt sind, so würden alle genullten Metallteile der Anschlussobjekte, deren Anschluss von der Transformatorenstation weiter entfernt wäre als

183 m bei einem Nulleiter von 4 mm ⌀ und der Speisung mit 145 kVA-Transformator,
231 m bei einem Nulleiter von 4 mm ⌀ und der Speisung mit 20 kVA-Transformator,
233 m bei einem Nulleiter von 5,5 mm ⌀ und der Speisung mit 145 kVA-Transformator,
325 m bei einem Nulleiter von 5,5 mm ⌀ und der Speisung mit 20 kVA-Transformator,

eine gefährliche Berührungsspannung annehmen.

Eine Verbesserung der Verhältnisse könnte offenbar durch das Anbringen einer zweiten Erdung möglichst nahe bei der Fehlerstelle erzielt werden. Es sollen deshalb die Strom- und Spannungsverhältnisse noch für eine Leitung, *deren Nulleiter sowohl in der Transformatorenstation, als auch am Ende der Leitung* an Erde gelegt ist, untersucht werden. Das bezügliche Leitungsschema ist in Fig. 35 und das zugehörige Widerstandsschema in Fig. 36 dargestellt.

Aus Fig. 35 ist ersichtlich, dass der Fehlerstrom von der Transformatorklemme A über den einen Polleiter zur Fehlerstelle und von da zum Teil über den Nulleiter und zum andern Teil über die

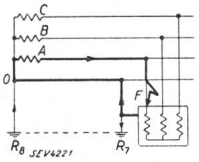


Fig. 35.
Leitungsschema.

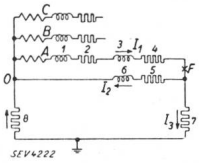


Fig. 36.
Widerstandsschema.

beiden Erdungsstellen zum Transformatornullpunkt zurückfliesst. Da die beiden Erdwiderstände R_7 und R_8 dem Widerstand des Nulleiters parallel geschaltet sind, so wird der Widerstand zwischen Fehlerstelle und dem Transformatornullpunkt je nach der Grösse der beiden Erdwiderstände mehr oder weniger herabgesetzt. Dadurch wird der Fehlerstrom entsprechend erhöht. Im allgemeinen wird aber diese Verbesserung nicht viel ausmachen, weil die Erdwiderstände im Verhältnis zum Nulleiterwiderstand sehr gross sein werden. Nimmt man z. B. an, die beiden Erdwiderstände seien gleich gross und betragen je 10 Ω, so beträgt beim ersten Beispiel (Transformator von 145 kVA, Polleiter 5,5 mm ⌀, Nulleiter 4 mm ⌀) der Fehlerstrom 195,5 A gegenüber 188,5 A ohne die Erdung bei der Fehlerstelle. Der über die Erde fliessende Strom beträgt 6,8 A und der über den Nulleiter fliessende 189 A. Diese Ströme erzeugen in den einzelnen Leiterelementen folgende EMK:

E_1	195,5	×	0,038	=	7,42 V
E_2	195,5	×	0,025	=	4,86 »
E_3	195,5	×	0,170	=	33,20 »
E_4	195,5	×	0,370	=	72,3 »
E_5	189,0	×	0,700	=	132,5 »
E_6	189,0	×	0,180	=	34,0 »
E_7	6,8	×	10	=	68,0 »
E_8	6,8	×	10	=	68,0 »

die in Fig. 37 zum Spannungsdiagramm zusammengesetzt sind.

Ein Vergleich dieses Diagrammes mit demjenigen der Fig. 30 (siehe auch die zugehörigen EMK-Tabellen) zeigt, dass durch das Erden des Null-

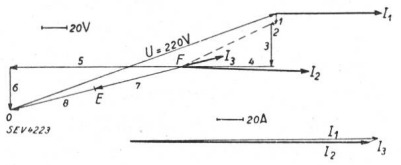


Fig. 37.

leiters am Ende der Leitung das Spannungsdiagramm nur unbedeutend verändert worden ist. Die Spannungsdifferenz zwischen dem Transformatornullpunkt und der Fehlerstelle beträgt wie im ersten Beispiel 136 V. Da in diesem Fall aber ein Teilstrom über die Erde fliesst, so ändern sich die Spannungsdifferenzen zwischen Nulleiter und Erde. Die Spannungsdifferenz zwischen Transformatornullpunkt und der Erde wird bestimmt durch den zur Erde fliessenden Strom und den Erdwiderstand dieser Erdungsstelle. Sinngemäss ergibt sich auch die Spannung zwischen Fehlerstelle und Erde. Da über beide Stellen der gleiche Strom fliesst und die Widerstände beider Erdungen als gleich gross angenommen wurden, so müssen auch die beiden Spannungen gleich gross sein. Und weil die geometrische Summe beider Spannungen gleich der am Nulleiter zwischen Fehlerstelle und Nullpunkt liegenden Spannung sein muss, so sind die Spannungsdifferenzen Nullpunkt — Erde und Fehlerstelle — Erde gleich der Hälfte der zwischen Nullpunkt und Fehlerstelle herrschenden Spannung. Dementsprechend besteht in der Mitte zwischen Transformator und Fehlerstelle auch keine Spannungsdifferenz zwischen dem Nulleiter und der Erde. Diese im Spannungsdiagramm mit E bezeichnete Stelle sei als «Erdpunkt» des Nulleiters bezeichnet. Vom Erdpunkt aus nimmt die Spannungsdifferenz Nullleiter — Erde zu und erreicht die Höchstwerte bei den beiden Erdungsstellen. Wären die beiden Erdwiderstände nicht gleich gross, würden ihre Summen aber wiederum 20 Ω betragen, so würde über die Erde ein gleich grosser Strom wie vorher flies-

sen. Dem einzelnen Erdwiderstand entsprechend würden sich aber die Spannungsdifferenzen Nullpunkt — Erde und Fehlerstelle — Erde ändern. Ausserdem würde der Erdpunkt verschoben. Beträgt zum Beispiel die Nullpunktserdung nur 1 Ω und die Erdung bei der Fehlerstelle 19 Ω, so nimmt der Nullpunkt eine Spannung von

$$U_0 = 1 \cdot 6{,}8 = 6{,}8 \text{ V}$$

und die Fehlerstelle eine solche von

$$U_F = 19 \cdot 6{,}8 = 129{,}2 \text{ V}$$

gegen Erde an. Der Erdpunkt liegt in einer Distanz vom Nullpunkt, für welche auf dem Nulleiter eine Spannungsdifferenz von 6,8 V besteht. Da der Nulleiterquerschnitt auf der ganzen Länge als unverändert angenommen wurde, so wird die Distanz zwischen Transformator und Fehlerstelle durch den Erdpunkt im Verhältnis von 6,8 : 129,2 geteilt. Wäre der Nulleiter aus Teilstücken mit verschieden grossen Querschnitten zusammengesetzt, so müsste die Lage des Erdpunktes aus dem Spannungsdiagramm ermittelt werden. Das betreffende Verfahren wird noch an einem Beispiel gezeigt werden.

Würde der Transformatornullpunkt einen Erdwiderstand von 19 Ω und die Erdung am Ende der Leitung einen solchen von 1 Ω aufweisen, so würde bei der Nullpunktserdung eine Spannungsdifferenz von 129,2 V und bei der Fehlerstelle eine solche von 6,8 V entstehen.

Diese Beispiele haben gezeigt, dass für eine Leitung, deren Nulleiter nicht nur am Anfang, sondern auch am Ende mit künstlichen Elektroden an Erde gelegt wird, der über die Erde fliessende Strom im allgemeinen so klein ist, dass der Fehlerstrom nur unbedeutend erhöht wird und das Spannungsdiagramm sozusagen unverändert bleibt. Sind ferner die Widerstände der Transformatorwicklung im Verhältnis zur Summe der Widerstände des Pol- und des Nulleiters klein (grosser Transformator, schwach dimensionierte oder lange Leitungen) so wird die Phasenspannung des Transformators angenähert im Verhältnis der Scheinwiderstände des Pol- und des Nulleiters und die zwischen Anfang und Ende des Nulleiters herrschende Spannungsdifferenz durch die beiden Erdungsstellen im Verhältnis ihrer Widerstände geteilt. Für die Höhe der zwischen Nulleiter und Erde herrschenden Spannung kommt es bei gegebenen Leitungsdimensionen und gegebener Netzspannung nicht auf die absolute Höhe der Erdwiderstände, sondern lediglich auf das Verhältnis dieser Widerstände an.

Sind zum Beispiel die Scheinwiderstände von Pol- und Nulleiter gleich gross und sind ferner die Erdwiderstände der beiden Erdungsstellen gleich gross, so tritt bei jeder Erdungsstelle ein Viertel der Phasenspannung auf. In einem 380/220 V-Netz würde auch in diesem günstigsten Fall immer noch eine Spannung von 55 V, also eine unzulässig hohe Spannung gegen Erde auftreten. Eine weitere Verbesserung könnte allerdings noch durch eine Vergrösserung des Nulleiterquerschnittes erzielt werden. In Freileitungsnetzen ist aber eine Vergrösserung des Nulleiterquerschnittes wegen des induktiven Widerstandes nur in beschränktem Masse wirksam. Ausserdem werden nur in Ausnahmefällen die Widerstände der beiden Erdungsstellen gleich gross sein. Es können deshalb trotz einer Verstärkung des Nulleiters an einzelnen Orten doch noch gefährliche Berührungsspannungen auftreten.

Wie sich die örtlichen Spannungsdifferenzen zwischen Nulleiter und Erde gestalten, zeigen die Fig. 38 bis 40, und zwar ist für alle drei Fälle die

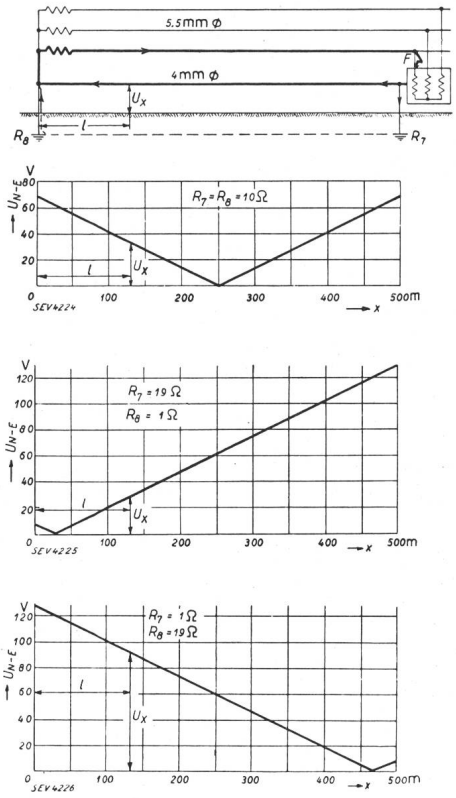


Fig. 38.

Fig. 39.

Fig. 40.

Spannung zwischen Nulleiter und Erde (U_{N-E}) in Abhängigkeit der Entfernung von der Transformatorstation (x). Nulleiter am Anfang und Ende geerdet. Fehlerstelle F am Ende der Leitung.

Netzspannung mit 380/220 V angenommen. Die Polleiter bestehen aus Draht von 5,5 mm Durchmesser und der Nulleiterdraht hat einen Durchmesser von 4,0 mm. Fig. 38 zeigt die Spannungsdifferenzen, wenn beide Erdwiderstände gleich gross sind, Fig. 39, wenn der Erdwiderstand der Nullpunktserdung im Verhältnis zum Erdwiderstand der Erdungsstelle am Ende der Leitung klein ist, und Fig. 40, wenn der umgekehrte Fall besteht. Würde der Nulleiterquerschnitt erhöht, so würde der dargestellte Spannungsverlauf sinngemäss der gleiche bleiben; es würden nur die Spannungsdifferenzen entsprechend kleiner werden.

Ausser dem Auftreten eines Fehlers an einem bei der zweiten Erdungsstelle angeschlossenen Objekt können auch Fehler auftreten an Orten, die zwischen beiden Erdungsstellen liegen, und, sofern die zweite Erdungsstelle nicht am Ende der Leitung angebracht ist, an Orten, die sich ausserhalb

der zweiten Erdungsstelle befinden. Es müssen deshalb auch diese beiden Fälle noch untersucht werden.

Für die Beurteilung des ersten Falles kommt das Widerstandsschema in Fig. 41 in Betracht. Daraus ist ersichtlich, dass der Fehlerstrom von der Transformatorklemme A über den Polleiter zur Fehlerstelle fliesst und sich von da verzweigt. Der eine Teil fliesst über den Nulleiter F — O direkt zum Transformatornullpunkt und der andere Teil über den äussern Teil des Nulleiters (F — B) und die Erdungen 9 und 10 ebenfalls zum Transformatornullpunkt zurück. Da für die Anschauung eine angenäherte Berechnung der Strom- und Spannungsverhältnisse genügt, so kann zur Vereinfachung der Rechnung der Fehlerstrom unter Vernachlässigung des über die Erde fliessenden Teilstromes aus der Phasenspannung und den Widerständen 1 bis 6 und der über die Erde fliessende

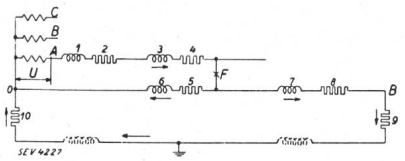


Fig. 41.

Teilstrom aus der zwischen den beiden Punkten F und O liegenden Spannungsdifferenz und den Widerständen 7 bis 10 berechnet werden. Für die Speisung der Leitung diene wiederum ein Transformator von 145 kVA Leistung. Die Leitungslänge sei 1000 m, der Polleiterdurchmesser betrage 8 mm und der Nulleiterdurchmesser 5,5 mm. Die Betriebsspannung betrage 380/220 V. Die Strom- und Spannungsverhältnisse werden berechnet für 50 und 500 m Entfernung der Fehlerstelle von der Transformatorenstation. Für den induktiven Widerstand $L_7\omega$ (induktiver Widerstand aus der aus Nulleiter und Erdrückleitung gebildeten Schleife zu berechnen) können 0,5 Ω pro km Drahtlänge angenommen werden. Die induktiven Widerstände der Erdrückleitung (punktiert eingezeichnete Widerstände) können vernachlässigt werden, weil sie im Verhältnis zu den Ohmschen Widerständen klein sind.

Im ersten Fall, Fehlerstelle 50 m von der Station entfernt, betragen die Widerstände 1 bis 6:

	Ohmsche Widerstände Ohm	Induktive Widerstände Ohm
Transformatorwicklung . .	0,025	0,038
Polleiter	0,017	0,016
Nulleiter	0,037	0,017
Total	0,079	0,071

Der Scheinwiderstand dieses Kreises beträgt 0,1065 Ω. Für 220 V Phasenspannung resultiert ein Fehlerstrom von

$$I_1 = \frac{220}{0{,}1065} = 2060 \text{ A.}$$

Diesem Strom entsprechend wird die Spannungsdifferenz zwischen Fehlerstelle und Transformatornullpunkt

$$U_{5,6} \cong 2060\sqrt{0{,}037^2 + 0{,}017^2} = \underline{84 \text{ V}}$$

Der induktive Widerstand ($L_7\omega$) der Drahtlänge von 950 m beträgt $0{,}5 \cdot 0{,}95 = 0{,}475\ \Omega$ und der Ohmsche Widerstand (R_8) 0,70 Ω. Nimmt man wiederum an, die Summe der Erdwiderstände ($R_9 + R_{10}$) betrage 20 Ω, so resultiert ein über die Erde fliessender Strom

$$I_2 \cong \frac{84}{20{,}7} \cong 4{,}06 \text{ A}$$

und diesem Strom entsprechend entsteht zwischen Fehlerstelle und Erdung B eine Spannung von

$$U_{7,8} = 4{,}06\sqrt{0{,}475^2 + 0{,}70^2} \cong 3{,}4 \text{ V.}$$

Die Summe der an den beiden Erdungen liegenden Spannung I_2 ($R_9 + R_{10}$) beträgt

$$U_{9,10} = 20 \cdot 4{,}06 = 81{,}2 \text{ V.}$$

Sind die beiden Erdwiderstände gleich gross, so nimmt der Transformatornullpunkt eine Spannung von

$$U_{10} = 81{,}2 : 2 = 40{,}6 \text{ V}$$

und die Fehlerstelle eine solche

$$U_{7,8,9} \cong \frac{81{,}2}{2} + 3{,}4 \cong 44 \text{ V}$$

gegen Erde an.

Wären die Erdwiderstände der beiden Erdungsstellen ungleich gross, so würde wiederum die Summenspannung der beiden Erdungsstellen im Verhältnis der Erdwiderstände geteilt. In extremen Fällen könnte also entweder zwischen Nullpunkt und Erde oder zwischen Fehlerstelle und Erde eine Spannung von ca. 84 V bestehen.

Im zweiten Fall, Fehlerstelle in der Mitte der Leitung, betragen die Widerstände 1 bis 6

	Ohmsche Widerstände Ohm	induktive Widerstände Ohm
Transformator . . .	0,025	0,038
Polleiter	0,175	0,160
Nulleiter	0,370	0,170
	0,570	0,368

und es beträgt der Scheinwiderstand dieses Stromkreises 0,678 Ohm,

der Fehlerstrom $I_1 = \dfrac{220}{0{,}678} = 324$ A,

die Spannungsdifferenz zwischen Fehlerstelle und Nulleiter

$$U_{6,7} = 324\sqrt{0{,}370^2 + 0{,}170^2} = 131 \text{ V.}$$

Beträgt die Summe der Erdwiderstände wiederum 20 Ohm (Nulleiterwiderstände $L_7\omega = 0{,}250$, $R_8 = 0{,}370$), so beträgt der über die Erde fliessende Strom

$$I_2 \cong \frac{131}{20{,}37} = 6{,}41 \text{ A.}$$

Diesem Strom entsprechend wird die Spannungsdifferenz zwischen Fehlerstelle und Erdungsstelle B

$$U_{7,8} = 6{,}41 \sqrt{0{,}250^2 + 0{,}370^2} = 2{,}86 \text{ V.}$$

Die Summenspannung an den beiden Erdungsstellen beträgt

$$U_{9,10} = 20 \cdot 6{,}41 = 128{,}2 \text{ V.}$$

Sind die Widerstände der beiden Erdungsstellen gleich gross, so nimmt der Nullpunkt eine Spannung von

$$U_{10} = 64{,}1 \text{ V}$$

und die Fehlerstelle eine solche von

$$U_{7,8,9} \cong 64{,}1 + 2{,}6 = 66{,}7 \text{ V}$$

gegen Erde an.

Sind die Widerstände der beiden Erdungsstellen ungleich gross, so können in extremen Fällen entweder zwischen Transformatornullpunkt und Erde oder zwischen Fehlerstelle und Erde Spannungen bis zu 128 V auftreten.

Zur Erfüllung von § 27 der Hausinstallationsvorschriften wird man bei Leitungen, die mehr als 1000 m lang sind, die zweite Erdungsstelle in einer Entfernung von der Transformatorenstation von 1000 m anbringen. In solchen Fällen werden auch ausserhalb der zweiten Erdungsstelle Objekte angeschlossen sein. Es muss deshalb auch noch untersucht werden, wie sich beim Auftreten eines Isolationsfehlers an einem solchen Objekt die Strom- und Spannungsverhältnisse gestalten. Das hiefür in Frage kommende Widerstandsschema zeigt Fig. 42.

Aus diesem Schema geht hervor, dass der Fehlerstrom von der Transformatorklemme A über den Polleiter zur Fehlerstelle F und über den einen Teil des Nulleiters zurück bis zur Erdungsstelle B

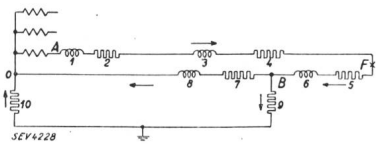


Fig. 42.

fliesst. Hier verteilt er sich; der eine Teil fliesst über den Nulleiter B — O und der andere über die Erde zum Transformatornullpunkt zurück. Für das Rechnungsbeispiel sei angenommen, dass die gesamte Leitungslänge 1500 m betrage und die zweite Erdungsstelle 1000 m von der Station entfernt angebracht sei.

Die Drahtquerschnitte, die Transformatorenleistung, die Erdwiderstände und die Betriebsspannung seien gleich gross, wie im vorangehenden Beispiel angenommen wurde. Diesen technischen Daten entsprechend betragen die für die Berechnung des Fehlerstromes massgebenden Widerstände:

	Ohmsche Widerstände Ohm	induktive Widerstände Ohm
Transformator . . .	0,025	0,038
Polleiter	0,525	0,480
Nulleiter	1,110	0,510
Total	1,660	1,028

Daraus resultiert ein Scheinwiderstand von 1,955 Ω. Der Fehlerstrom beträgt somit

$$I_1 = \frac{220}{1{,}955} = 112 \text{ A}$$

und die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Erdungsstellen

$$U_{7,8} = U_{9,10} = 112 \sqrt{0{,}74^2 + 0{,}34^2} = 91{,}5 \text{ V.}$$

Zwischen Fehlerstelle und Erdung B tritt eine Spannungsdifferenz von

$$U_{5,6} = 112 \sqrt{0{,}37^2 + 0{,}17^2} = 45{,}5 \text{ V auf.}$$

Sind die Widerstände der beiden Erdungsstellen gleich gross, so nimmt der Transformatornullpunkt eine Spannung von

$$U_{10} = \frac{91{,}5}{2} \cong 45{,}8 \text{ V}$$

und die Fehlerstelle

$$U_{5,6,9} = \frac{91{,}5}{2} + 45{,}5 = 91{,}3 \text{ V}$$

gegen Erde an. Beträgt dagegen der Erdwiderstand der Nullpunktserdung nur 1 Ω und derjenige des Nulleiters 19 Ω, so betragen die Spannungen

$$U_{10} = 91{,}5 \frac{1}{20} \cong 4{,}6 \text{ V}$$

und

$$U_{5,6,9} = 91{,}5 \frac{19}{20} + 45{,}5 = 132{,}5 \text{ V}$$

Umgekehrt, würde der Widerstand der Nullpunktserdung 19 Ω und derjenige der Nulleitererdung 1 Ω betragen, so würde

$$U_{10} = 91{,}5 \frac{19}{20} = 87 \text{ V}$$

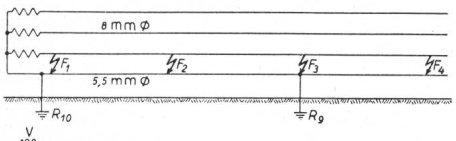
und

$$U_{5,6,9} = 91{,}5 \frac{1}{20} + 45{,}5 \cong 50 \text{ V}$$

betragen.

Um eine Uebersicht über alle Rechnungsergebnisse zu erhalten, sind die zwischen Nulleiter und Erde auftretenden Spannungen für die verschiedenen Lagen der Fehlerstellen in den Fig. 43 bis 46 graphisch dargestellt, und zwar zeigt jeweils die Kurve a die Spannung, die zwischen Nulleiter und Erde an den verschiedenen Orten der Leitung herrscht, wenn die beiden Erdwiderstände gleich gross sind, die Kurve b diejenige, wenn die Nullpunktserdung im Verhältnis zur Nulleitererdung bei B klein ist, und schliesslich die Kurve c die-

jenige, wenn der Erdwiderstand der Nullpunktserdung im Verhältnis zur Nulleitererdung bei B gross ist. Eine Betrachtung der Fig. 43 bis 45 zeigt, dass es nicht so sehr darauf ankommt, an welcher Stelle zwischen den beiden Erdungsstellen der Fehler auftritt; der Charakter der Kurve bleibt unverändert. Aber auch die Höhe der Spannungen weist keine bedeutenden Unterschiede auf. Dabei ist zu beachten, dass der Nulleiter von der Fehlerstelle hinweg bis an sein Ende eine Spannung gegen Erde annimmt, die ungefähr gleich gross ist wie die



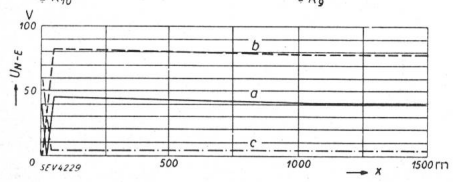


Fig. 43.

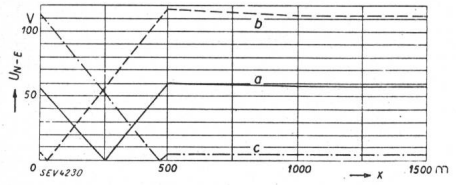


Fig. 44.

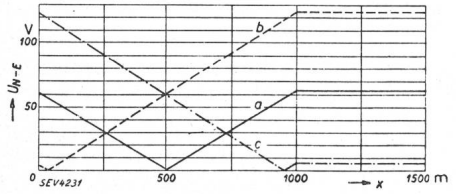


Fig. 45.

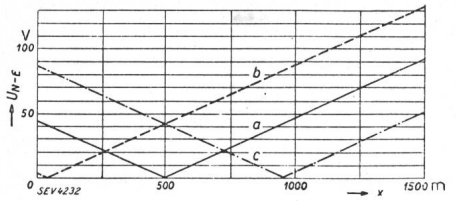


Fig. 46.

Spannung zwischen Nulleiter und Erde ($U_{N\text{-}E}$) in Abhängigkeit der Entfernung von der Transformatorenstation (x). Fehlerstelle an verschiedenen Orten der Leitung.

Spannung zwischen dem fehlerhaften Objekt und der Erde. Infolgedessen besteht auch an allen an diesem Nulleiterteil genullten Objektgehäusen ebenfalls eine solche Spannung gegen Erde.

Ueberschreitet diese Spannung die zulässige Grenze, so können an einer grossen Anzahl der Anschlussobjekte gefährliche Zustände auftreten, ohne dass an diesen Objekten selbst Isolationsfehler vorhanden sind.

Fig. 46 zeigt ferner, dass bei Fehlern an Objekten, die ausserhalb der Nulleitererdung angeschlossen sind, die Spannung zwischen dem fehlerhaften Objekt und der Erde in allen Fällen grösser wird als beim Auftreten von Fehlern an Objekten, die innerhalb der beiden Erdungsstellen angeschlossen sind. Je weiter die Fehlerstelle von der zweiten Nulleitererdung entfernt ist, um so mehr nähern sich die Spannungsverhältnisse den in Fig. 34 (nur Nullpunkt geerdet) dargestellten Zuständen.

Es ist deshalb zweckmässig, den Nulleiter am Anfang und am Ende der Leitung zu erden, so dass alle Anschlussobjekte zwischen die beiden Erdungen zu liegen kommen.

Es bleibt noch zu prüfen, ob das Anbringen weiterer Erdungen zwischen Anfang und Ende der Leitung noch eine Herabsetzung der Spannung zwischen Nulleiter und Erde bewirken kann. Für diese Untersuchung sei angenommen, dass eine Leitung an vier Stellen geerdet sei, die Erdungsstellen auf der ganzen Länge gleichmässig verteilt und die Widerstände aller Erdungen gleich gross seien. Für die Berechnung der Strom- und Spannungsverhältnisse kommt das Widerstandsschema Fig. 47 in Frage.

Die Verhältnisse seien für zwei Fehlerstellen F_1 und F_2 näher untersucht. Wäre bei F_1 ein Fehler vorhanden, so würde der Fehlerstrom von der Transformatorklemme A über den Polleiter zur Fehlerstelle fliessen und sich hier über den Nullleiter und die Erdung B verteilen. Da bei der Er-

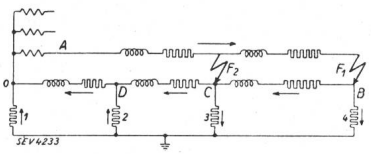


Fig. 47.

dungsstelle C zwischen Nulleiter und Erde eine Spannungsdifferenz herrscht, wird dieser und dem Widerstand R_3 entsprechend ein Strom zur Erde fliessen und der gegen den Transformator fliessende Nulleiterstrom wird entsprechend kleiner werden. Bei der Erdungsstelle D tritt das Umgekehrte auf. Der Strom fliesst von der Erde zum Nulleiter und verstärkt den Nulleiterstrom wieder auf das ursprüngliche Mass. Beim Punkt 0 vereinigen sich der Nulleiterstrom und der über diese Erdung fliessende Strom zum vollen Fehlerstrom. Wären die beiden Widerstände R_2 und R_3 im Verhältnis zu den andern beiden Erdwiderständen R_1 und R_4 und aber auch im Verhältnis zum Nullleiterwiderstand sehr klein, so würde zwischen dem Nulleiterstück C—D und der Erde keine oder nur eine ganz unbedeutende Spannung herrschen. Die an den Erdungsstellen 1 und 4 herrschenden Spannungen würden dagegen nicht wesentlich beeinflusst. Im allgemeinen werden aber alle vier Erdungsstellen Widerstände von der gleich grossen Ordnung aufweisen. Wie sich für einen solchen Fall die Spannungsverhältnisse gestalten, zeigt Fig. 48. Die gestrichelte Linie zeigt den Verlauf der Spannung, wenn die beiden Erdungsstellen C und D nicht vorhanden sind und die ausgezogene Linie denjenigen beim Anschluss der Erdungen C und D. Man sieht daraus, dass der Einfluss dieser beiden Erdungen unbedeutend ist.

Aber auch beim Auftreten eines Fehlers bei F_2 können diese zusätzlichen Erdungsstellen keinen wesentlichen Einfluss haben. Die Erdungsstellen C und B werden dabei parallel geschaltet. Der resultierende Widerstand würde demnach halb so gross wie die Widerstände der Erdungen O und D. Die Spannungskurve würde nach der strichpunktierten Kurve in Fig. 48 verlaufen. Da bei der Erdungsstelle D die Spannung sehr klein wäre, so könnte diese Erdung auch keinen nennenswerten Einfluss ausüben. Diese Ueberlegungen zeigen, dass Erdungen, die zwischen den am Anfang und Ende der Leitung angeschlossenen Erdungen liegen, für die Herabsetzung der Spannung zwischen Nulleiter und Erde keine wesentliche Bedeutung haben.

Bei allen diesen Untersuchungen wurde zur Vereinfachung der Rechnungen der Nulleiterquerschnitt auf der ganzen Länge als unverändert angenommen. Es wird dies aber in der Regel nicht der Fall sein. Die Zusammensetzung des Nulleiters aus Leitern mit verschiedenen Querschnitten hat allerdings auf die zwischen Nulleiter und Erde herrschende Spannung beim Auftreten eines Isolationsfehlers keinen grossen Einfluss. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass in diesem Fall an keiner Stelle des Nulleiters die Spannung zwischen Nulleiter und Erde verschwindet, wie es bei unverändertem Nulleiterquerschnitt der Fall ist. Es soll diese Erscheinung noch an einem Beispiel erläutert werden.

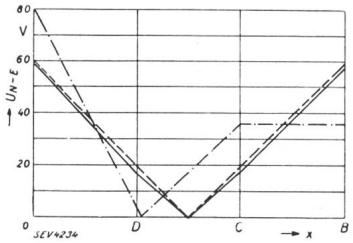


Fig. 48.
Spannung zwischen Nulleiter und Erde (U_{N-E}) in Abhängigkeit der Entfernung von der Transformatorenstation (x).

Der Nulleiter einer Leitung sei 1000 m lang und an beiden Enden geerdet. Sein Durchmesser betrage auf der halben Länge 8 mm und auf der andern Hälfte 5,5 mm. Die Widerstände der beiden Erdungen betragen je 20 Ω und es bestehe zwischen Anfang und Ende des Nulleiters eine Spannung von 100 V. Diesen technischen Daten entsprechend betragen die Nulleiterwiderstände

	Ohmsche Widerstände Ohm	induktive Widerstände Ohm
für die erste Hälfte . . .	0,175	0,160
für die zweite Hälfte . .	0,370	0,170
Total	0,545	0,330

Daraus resultiert ein Scheinwiderstand von 0,637 Ω.

Der über den Nulleiter fliessende Fehlerstrom wird demnach

$$I_1 = \frac{100}{0{,}637} = 156{,}5 \text{ A}$$

und der über die Erde fliessende Strom beträgt

$$I_2 = \frac{100}{20 + 20} = 2{,}5 \text{ A}$$

Die Ermittlung der Spannungen zwischen Nulleiter und Erde kann am einfachsten dem Spannungsdiagramm entnommen werden, für welches das Widerstandsschema Fig. 49 massgebend ist. Den genannten Strömen und Widerständen entsprechend betragen die EMK der einzelnen Leiterelemente:

$$\begin{aligned} E_1 &= 156{,}5 \cdot 0{,}175 = 27{,}3 \text{ V} \\ E_2 &= 156{,}5 \cdot 0{,}160 = 25{,}0 \text{ »} \\ E_3 &= 156{,}5 \cdot 0{,}370 = 57{,}7 \text{ »} \\ E_4 &= 156{,}5 \cdot 0{,}170 = 26{,}5 \text{ »} \\ E_5 &= 2{,}5 \cdot 20{,}0 = 50 \text{ »} \\ E_6 &= 2{,}5 \cdot 20{,}0 = 50 \text{ »} \end{aligned}$$

Diese EMK sind nun in Fig. 50 zum Spannungsdiagramm zusammengesetzt. Da die beiden Erdwiderstände gleich gross angenommen wurden, so halbiert der Erdpunkt die Verbindungslinie der Punkte O und B. Die Spannungsdifferenzen zwischen den einzelnen Punkten des Nulleiters und der Erde findet man, wenn man die beiden Strecken O—A und A—B (Nulleiterspannungen) in gleiche Teile einteilt und die Strecken zwischen den einzelnen Teilpunkten und dem Erdpunkt abmisst. Die Punkte a bis h (10 Teilungen) entsprechen Teilpunkten auf dem Nulleiter, die je 100 m auseinander liegen. Die graphische Darstellung des so ermittelten Spannungsverlaufs ist in Fig. 51 gezeichnet.

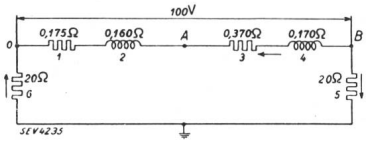


Fig. 49.

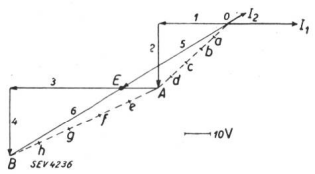


Fig. 50.

Um den Unterschied des Spannungsverlaufs zwischen Nulleiter und Erde bei gleichbleibendem und bei abgestuftem Nulleiterdurchmesser zu zeigen, ist in Fig. 51 auch der Spannungsverlauf für einen auf der ganzen Länge unveränderten Durchmesser des Nulleiters eingezeichnet (punktierte Linie).

Da alle vorstehenden Untersuchungen sich auf ein nur aus einer einzigen Leitung bestehendes Netz bezogen haben, soll zum Schluss noch gezeigt werden, wie sich die Verhältnisse gestalten, wenn *ein Netz aus mehreren Leitungen* besteht.

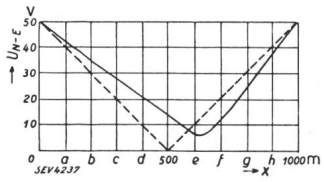


Fig. 51.
Spannung zwischen Nulleiter und Erde (U_{N-E}) in Abhängigkeit der Entfernung von der Transformatorenstation (x).

Es sei z. B. angenommen, ein Netz bestehe aus 3 Leitungssträngen. Der Nulleiter sei beim Transformatornullpunkt und am Ende der einen Leitung an Erde gelegt. Die beiden Erdwiderstände seien gleich gross und es trete ein Fehler am Ende der geerdeten Leitung auf. Dabei entstehen Span-

nungsdifferenzen zwischen dem Nulleiter dieser Leitung und der Erde, die in Fig. 38 dargestellt sind. Der Nullpunkt nimmt also eine gewisse Spannung gegen Erde an. Da die Nulleiter der beiden andern Leitungen mit dem Transformatornullpunkt metallisch verbunden sind, so müssen diese Nulleiter auch eine gleich grosse Spannung gegen Erde annehmen wie der Transformatornullpunkt. Würde man nun die Enden dieser beiden Leitungen auch

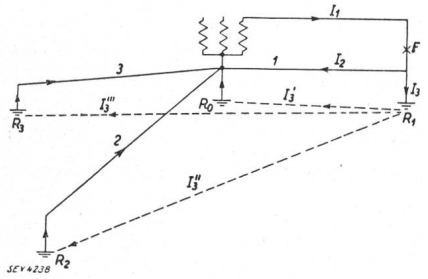


Fig. 52.
1, 2, 3:
Leitung 1, 2, 3.
F Fehlerstelle.

noch an Erde legen, so würde von der Fehlerstelle aus der zur Erde fliessende Strom zum Teil über die Nullpunktserdung und zum Teil über die Erdungen der andern beiden Leitungen und deren Nulleiter zum Transformatornullpunkt zurückfliessen. Die Erdungsstellen dieser beiden Leitungen wären also der Nullpunktserdung parallel geschaltet, wie die Skizze Fig. 52 zeigt.

Setzt man voraus, dass alle 4 Erdwiderstände R_0 R_1 R_2 R_3 gleich gross seien und vernachlässigt man die Nulleiterwiderstände der beiden Leitungen 2 und 3, so ist der resultierende Widerstand der 3 Widerstände R_0, R_2 und R_3 gleich $^1/_3$ von R_1. Die

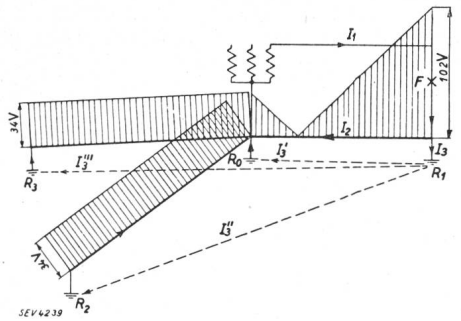


Fig. 53.
F Fehlerstelle.

Spannungsverteilung der am Nulleiter liegenden Spannung U geschieht demgemäss auf die beiden Erdungsstellen wie folgt:

Die Spannung bei der Fehlerstelle gegen Erde wird

$$U_1 = \frac{3}{4} U$$

und diejenige der Nulleiter 2 und 3 gegen Erde wird

$$U_0 = \frac{1}{4} U$$

Beträgt die am Nulleiter liegende Spannung 136 V wie bei dem zu Fig. 38 gehörenden Beispiel, so würde die Spannung an der Fehlerstelle durch den Anschluss der Erdungen R_2 und R_3 von 68 auf 102 V ansteigen und diejenige der Nulleiter 2 und 3 von 68 auf 34 V sinken. Die Spannung zwischen den einzelnen Punkten der Nulleiter und der Erde zeigt Fig. 53.

Würde dagegen die Erdung R_1 zufälligerweise an eine Wasserleitung angeschlossen und die andern 3 Erdungen mit künstlichen Elektroden ausgerüstet, so dass beispielsweise der Widerstand R_1

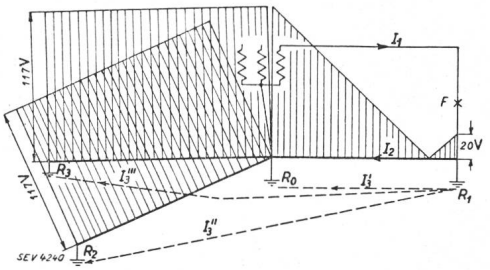


Fig. 54.
F Fehlerstelle.

1 Ω und der resultierende Widerstand der 3 Erdungen R_0, R_2 und R_3 6 Ω betragen würde, dann würde die Spannung

$$U_1 = \frac{1}{7} U$$

und

$$U_0 = \frac{6}{7} U$$

d. h. bei gleichen Spannungsverhältnissen wie im vorangehenden Beispiel würde zwischen Fehlerstelle und Erde eine Spannung von

$$U_1 = \frac{1}{7} \cdot 136 = 19{,}4 \text{ V}$$

und zwischen Nullpunkt bzw. den Nulleitern 2 und 3 und Erde eine solche von

$$U_0 = \frac{6}{7} \cdot 136 = 116{,}6 \text{ V}$$

entstehen. Die Spannungsdifferenzen zwischen den einzelnen Punkten der Nulleiter und der Erde zeigt Fig. 54.

Diese zwei Beispiele zeigen, dass die Untersuchungen über die zwischen Nulleiter und Erde herrschenden Spannungen beim Auftreten eines Isolationsfehlers an einem Netz, das nur aus einer Leitung besteht, ohne weiteres auch auf Netze, die aus mehreren Leitungen bestehen, übertragen werden kann. Es muss dabei lediglich beachtet werden, dass die Erdungen der fehlerfreien Leitungen mit der Erdung des Transformatornullpunktes parallel geschaltet sind.

Zur Bestätigung dieser theoretischen Ueberlegungen wurden in einem Netz der EKZ, in dem die Nullung eingeführt worden war, Versuche durchgeführt. Das betreffende Niederspannungsnetz ist in Fig. 55 abgebildet. Es besteht aus zwei

Leitungssträngen, wovon der eine als Versuchsleitung benützt wurde. Der Nulleiter dieses Netzes konnte wahlweise an künstliche Elektroden oder an eine Wasserleitung geerdet werden. Mit der Erdung des Nulleiters an künstliche Elektroden wurden 3 Versuche durchgeführt, und zwar war bei allen Versuchen der Nulleiter am Anfang und Ende der Leitung geerdet. Beim ersten Versuch war am Ende der Leitung und beim zweiten Versuch zwischen Anfang und Ende ein Polleiter mit dem Nulleiter kurzgeschlossen worden. Beim dritten Versuch war die zweite Leitung des Netzes, deren Nulleiter an

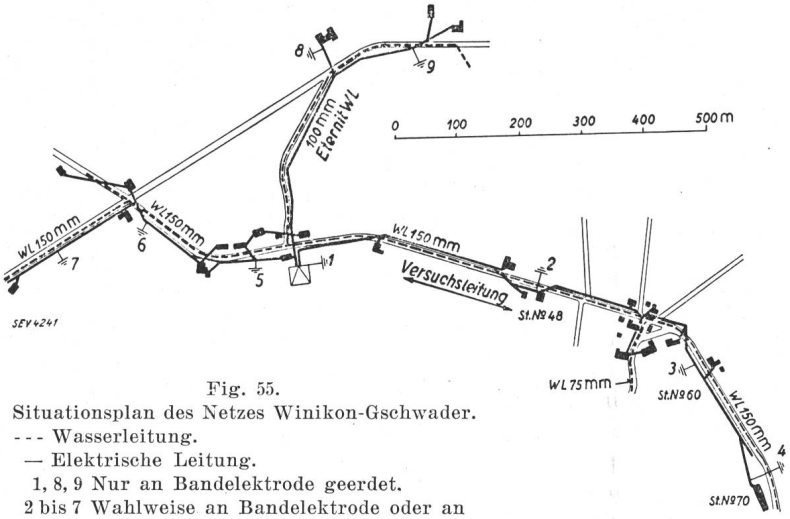


Fig. 55.
Situationsplan des Netzes Winikon-Gschwader.
--- Wasserleitung.
— Elektrische Leitung.
1, 8, 9 Nur an Bandelektrode geerdet.
2 bis 7 Wahlweise an Bandelektrode oder an Wasserleitung geerdet.

5 Stellen an Erde gelegt war, ebenfalls eingeschaltet. Die Fehlerstelle befand sich wiederum am Ende der Versuchsleitung. Die Anordnung des ersten Versuchs ist in Fig. 56 schematisch dargestellt.

Gemessen wurde der Fehlerstrom, der über die Erde fliessende Teilstrom, die zwischen Pol- und Nulleiter angelegte Spannung U_1 und die zwischen Nulleiter und Erde herrschenden Spannungen U_2 U_3 U_4 und U_5. Mit Rücksicht auf die Belastung des Stationstransformators wurde dessen Spannung mit einem Reguliertransformator herabgesetzt und

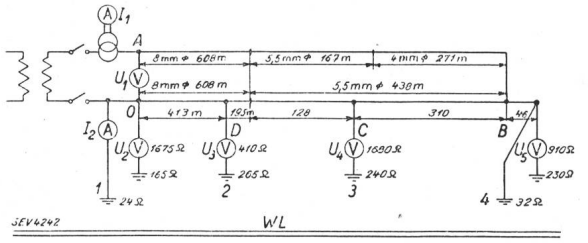


Fig. 56.
1 bis 4 Nummern der Erdungsstellen. *WL* Wasserleitung.

die Messungen mit reduzierter Spannung vorgenommen. Um sich davon zu überzeugen, dass die Messresultate ohne weiteres auf die Betriebsspannung umgerechnet werden dürfen, die Erdwiderstände also von der Grösse des Stromdurchganges unabhängig seien, wurden die Messungen mit zwei verschieden hohen Spannungen durchgeführt. Die Resultate bestätigten dann auch die Unabhängigkeit der Erdwiderstände von der Grösse des Stromes und damit die Zulässigkeit der Spannungsumrechnung. Um einen Vergleich zwischen den Rechnungs- und Messresultaten zu bekommen, wurden für die in Fig. 56 gegebenen Leitungsdaten, die zum voraus gemessenen Widerstände der beiden Erdungsstellen und die bei der Messung zwischen Nulleiter und Polleiter angelegte Spannung die Spannungsverteilung zwischen Nulleiter und Erde nach der beschriebenen Methode berechnet. Die Resultate sind in Fig. 57 als Kurve aufgezeichnet und die Messpunkte in diese Darstellung eingetragen. Ein Vergleich der gerechneten Kurve mit den Messpunkten zeigt eine gute Uebereinstimmung der Rechnung mit der Messung. Um zu zeigen, welche Spannung zwischen Nulleiter und Erde bei der Betriebsspannung von 380/220 V auftreten würde, ist in Fig. 57 die bezügliche Kurve ebenfalls eingezeichnet.

Beim zweiten Versuch wurde die Fehlerstelle gegen die Transformatorenstation hin verschoben, d. h. in $^2/_3$ der Leitungslänge angebracht. Sonst war an der Anordnung nichts geändert.

Die bezügliche Versuchsanordnung zeigt Fig. 58 und die berechneten Spannungsdifferenzen zwischen Nulleiter und Erde sowie die Messpunkte sind in Fig. 59 dargestellt. Auch diese Untersuchung ergab eine genügende Uebereinstimmung zwischen Rechnung und Messung.

Die Anordnung des dritten Versuchs geht aus Fig. 60 hervor.

Die Rechnungs- und Messergebnisse sind in Fig. 61 dargestellt; sie zeigen ebenfalls eine gute Uebereinstimmung. Damit dürfte der Beweis er-

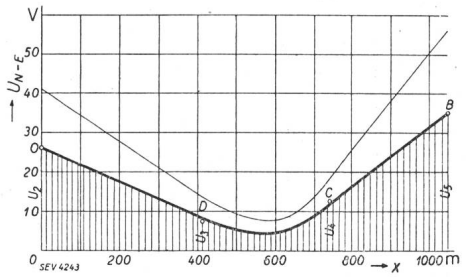


Fig. 57.
Spannung (U_{N-E}) zwischen Nulleiter und Erde in Abhängigkeit der Entfernung (x) von der Transformatorenstation. (Künstliche Erdungen am Anfang und Ende der Leitung. Fehlerstelle am Ende der Leitung.)
Dickausgezogene Kurve: Phasenspannung = 137,5 V.
Dünnausgezogene Kurve: Phasenspannung = 220 V.
o Messpunkte.

bracht sein, dass die theoretischen Ueberlegungen mit der Wirklichkeit übereinstimmen.

Zusammenfassend kann über die zwischen Nulleiter und der Erde herrschende Spannung beim Auftreten eines Isolationsfehlers, d. h. beim Zusammentreffen eines Polleiters mit dem Nulleiter

bei Anwendung künstlicher Elektroden für die Erdung der Nulleiter folgendes gesagt werden:

Die am Nulleiter auftretende Spannung ist unabhängig von der absoluten Grösse der Erdwiderstände der einzelnen Erdungsstellen. Sie ist nur abhängig vom Verhältnis des Widerstandes der in der Nähe der Erdungsstelle liegenden Erdung zu demjenigen der Nullpunktserdung bzw. zum resultierenden Widerstand der der Nullpunktserdung

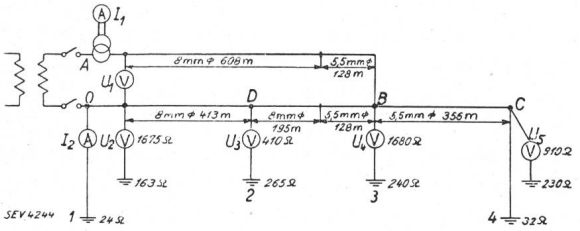


Fig. 58.
1 bis 4 Nummern der Erdungsstellen.

parallel geschalteten Erdungen. Für die Höhe der Spannung ist ferner massgebend die Höhe der Phasenspannung des Netzes sowie das Verhältnis des Scheinwiderstandes der einzelnen Polleiter zum Nulleiter. Die Beispiele haben ferner gezeigt, dass die günstigsten Spannungsverhältnisse auftreten, wenn die Nulleiter am Anfang und am Ende geerdet werden. Dazwischen liegende Erdungen haben keine grosse Bedeutung. Bei Verzweigung der Leitungsstränge sind möglichst alle Enden der Zweige an Erde zu legen. Um die Spannung zwischen Nulleiter und Erde beim Auftreten eines Isolationsfehlers möglichst klein zu halten, muss man in erster Linie den Widerstand des Nulleiters

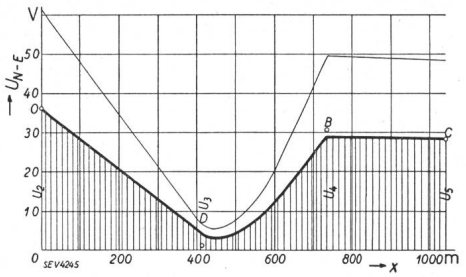


Fig. 59.
Spannung (U_{N-E}) zwischen Nulleiter und Erde in Abhängigkeit der Entfernung (x) von der Transformatorenstation. (Künstliche Erdungen, Fehlerstelle zwischen Anfang und Ende der Leitung.)
Dickausgezogene Kurve: Phasenspannung = 129 V.
Dünnausgezogene Kurve: Phasenspannung = 220 V.
o Messpunkte.

im Verhältnis zum Widerstand eines jeden Polleiters möglichst niedrig halten, d. h. man muss für den Nulleiter einen möglichst grossen Querschnitt wählen. Da aber bei Freileitungen der induktive Widerstand eines Leiters vom Querschnitt sozusagen unabhängig ist, so kann durch die Querschnitterhöhung nur der Ohmsche Widerstand herabgesetzt werden. Eine Erhöhung des Nulleiterquerschnittes über 50 mm² ergibt deshalb nur noch eine unbedeutende Herabsetzung des Scheinwiderstandes. Immerhin ist es zweckmässig, da wo für die Polleiter mit Rücksicht auf die spezifische Belastung oder mit Rücksicht auf die Leitungsverluste Querschnitte von mehr als 50 mm² verwendet werden, auch den Nulleiter mit entsprechend grösserm Querschnitt zu wählen. Diese Ueberlegungen kommen im Art. 26 der Starkstromverordnung zum Ausdruck, in dem verlangt wird, dass in genullten Netzen der Querschnitt des Null-

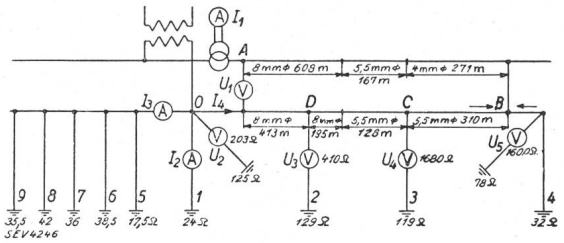


Fig. 60.
1 bis 9 Nummern der Erdungsstellen.

leiters mindestens so gross wie derjenige des Polleiters gewählt werden müsse. Sind beide Querschnitte gleich gross und spielt der Spannungsabfall in der Transformatorwicklung keine wesentliche Rolle, so ist bei einem Schluss zwischen einem Polleiter und dem Nulleiter die zwischen Fehlerstelle und Transformatornullpunkt auftretende Spannungsdifferenz gleich der Hälfte der Phasenspannung. Bei grossen Unterschieden in der Höhe der Erdwiderstände der in Frage kommenden Erdungsstellen (dies wird in der Regel wegen der der Nullpunktserdung parallel geschalteten Netzerdungen der Fall sein) kann zwischen einzelnen Stellen

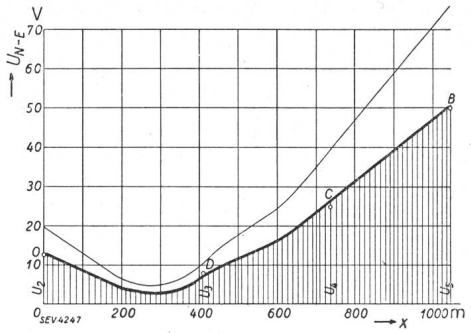


Fig. 61.
Spannung (U_{N-E}) zwischen Nulleiter und Erde in Abhängigkeit der Entfernung (x) von der Transformatorenstation. (Künstliche Erdungen, alle Netzerdungen eingeschaltet. Fehlerstelle am Ende der Leitung.)
Dickausgezogene Kurve: Phasenspannung = 149 V.
Dünnausgezogene Kurve: Phasenspannung = 220 V.
o Messpunkte.

des Nulleiters und der Erde angenähert die halbe Phasenspannung auftreten. Da nun im Art. 26 der Starkstromverordnung 50 V als maximal zulässige Spannung zwischen Nulleiter und Erde festgelegt sind, so müssten alle Niederspannungsleitungen, die mit einer Phasenspannung von mehr als 100 V betrieben werden und sofern die Nulleiter an künstliche Erdungen angeschlossen sind, so dimensioniert sein, dass beim Auftreten eines Fehlers die dem Fehler vorgeschalteten Sicherungen innert kürze-

ster Frist durchschmelzen. Ein Schluss zwischen einem Polleiter und dem Nulleiter ist nun nicht nur in den Hausinstallationen, sondern auch im Netz selbst denkbar. Infolgedessen müssen die Fehlerströme so gross sein, dass im gegebenen Fall auch die Sicherungen in der Transformatorenstation durchschmelzen. In grössern Niederspannungsnetzen ist es allerdings denkbar, die Nulleiter verschiedener Leitungsstränge zu geschlossenen Ringen zusammenzuschalten. Durch diese Massnahme erhält man eine weitere Herabsetzung des Nulleiterwiderstandes. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass die Herabsetzung des Nulleiterwiderstandes durch die Parallelschaltung zweier oder mehrerer Nulleiter verschiedener Stränge wegen des induktiven Schleifenwiderstandes, der verhältnismässig gross sein kann, nicht im Verhältnis der durch die Parallelschaltung bedingten Querschnittserhöhung für die Stromrückleitung erfolgt. Es muss deshalb in jedem einzelnen Fall durch den Versuch festgestellt werden, ob eine genügende Herabsetzung der Spannung erzielt wird. In solchen Netzen werden aber auch Leitungsstränge oder längere Abzweigungen vorhanden sein, die von der Zusammenschaltung der Nulleiter keinen Nutzen ziehen. Für diese Leitungen oder Leitungsstücke muss dann trotzdem das Abschalten der Sicherungen in der Transformatorenstation sichergestellt werden. Ausserdem ist bei der Anwendung der Nullung zu bedenken, dass beim Auftreten eines Fehlers nicht nur das betreffende fehlerhafte Objekt, sondern sämtliche am gleichen Netz angeschlossenen und genullten Objekte eine mehr oder weniger grosse Spannung gegen Erde annehmen. Da die Versuche der EKZ gezeigt haben, dass umfasste Elektroden bereits bei einer Spannung von 30 V nicht mehr losgelassen werden können und insbesondere bei fahrbaren Motoren und in der elektrischen Küche genullte Metallteile umfasst werden müssen und wegen der oft verhältnismässig guten Leitfähigkeit des Standortes die Berührungsspannungen gleich gross werden wie die zwischen dem betreffenden Objekt und der Erde herrschende Spannung, so muss man sich fragen, ob man Spannungen bis 50 V zwischen Nulleiter und Erde zulassen soll oder ob es nicht angezeigt wäre, in jedem Fall dafür zu sorgen, dass die Fehlerstelle abgeschaltet wird.

b) Nulleiter an Wasserleitungen geerdet.

Benützt man für die Erdung des Nulleiters ausgedehnte Wasserleitungen, so ergeben sich beim Auftreten eines Isolationsfehlers wesentlich andere Verhältnisse, als wenn die Erdung mit künstlichen Elektroden erfolgt. Die Berechnung der Strom- und Spannungszustände ist aber in der Regel nicht möglich, weil die Widerstände der Rohrleitungen und die Stromverteilung in der Erde nicht bekannt sind. Da die Rohrleitungen keine metallisch zusammenhängende Gebilde darstellen, sondern aus vielen Stücken zusammengesetzt sind und deshalb nicht nur die Widerstände der Rohre, sondern noch viele Uebergangswiderstände von Rohr zu Rohr vorhanden sind, so kann auch aus einer Messung der Widerstände nichts Genaues über die Widerstandsverteilung ausgesagt werden. Ferner sind die Gussrohre mit einem Asphaltüberzug versehen, der an und für sich elektrisch isoliert. Wie weit aber diese Asphaltschicht mit der Zeit ihre isolierende Eigenschaft beibehält, ist ebenfalls ungewiss. Aus diesem Grunde kann man auch keine sichern Schlüsse über den Stromübertritt zur Erde, der für die Spannung zwischen Wasserleitung und Erde massgebend ist, machen. Wie sich die Verhältnisse *ungefähr* gestalten, soll an nachstehendem Beispiel und an Hand von Versuchen erläutert werden.

Besteht ein Netz nur aus einer Leitung und ist der Nulleiter am Anfang und Ende an eine durchgehende Wasserleitung angeschlossen, wie die schematische Darstellung Fig. 62 zeigt, und tritt am Ende der Leitung ein Isolationsfehler auf, so fliesst von der Klemme A der Stromquelle ein Fehlerstrom über den Polleiter zur Fehlerstelle und ver-

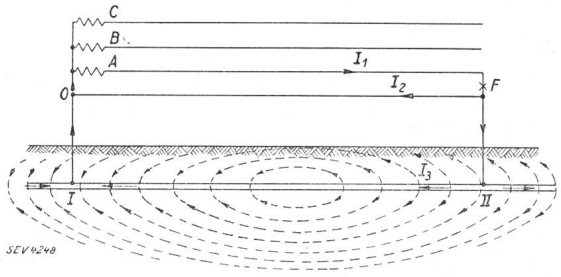


Fig. 62.
F Fehlerstelle.

zweigt sich hier. Der eine Teil fliesst über den Nulleiter und der andere über die Wasserleitung zum Transformatornullpunkt zurück.

Ist die Wasserleitung von der Erde nicht isoliert, so fliesst ein Teil des der Anschlußstelle II zufliessenden Stromes von der Rohrleitung aus in die Erde und in der Richtung gegen die Anschlussstelle I wieder zur Rohrleitung zurück. Infolge dieses Stromübertrittes von der Rohrleitung zur Erde muss auch eine Spannungsdifferenz zwischen der Rohrleitung und der Erde auftreten. Dementsprechend werden auch Spannungsdifferenzen zwischen dem Nulleiter und der Erde bestehen. Dabei muss die Summe der zwischen Anschlußstelle II und der Erde und zwischen der Anschlußstelle I und der Erde herrschenden Spannungen gleich gross wie die zwischen Fehlerstelle und Nullpunkt herrschende Spannung sein. Sind die Querschnitte des Nulleiters und der Wasserleitung auf der ganzen Länge unverändert, so kann zwischen der Wasserleitung und dem Nulleiter keine Spannungsdifferenz bestehen. Ist dagegen der Nulleiterquerschnitt abgestuft oder ist der Widerstand der Wasserleitung nicht gleichmässig auf der ganzen Länge verteilt, so treten auch zwischen der Wasserleitung und dem Nulleiter Spannungsdifferenzen auf. Da die Wasserleitungen in der Regel kleine Widerstände auf-

weisen und auch die Erdwiderstände für den Stromübertritt von der Wasserleitung zur Erde wegen der verhältnismässig grossen Ausdehnung der Wasserleitungen klein sind, ferner die Wasserleitungen und die Strombahnen in der Erde dem Nulleiter parallel geschaltet sind, so wird der Widerstand zwischen Fehlerstelle und Transformatornullpunkt durch diese Parallelschaltung der Wasserleitungen zum Nulleiter herabgesetzt. Dadurch wird aber auch der Widerstand des gesamten Stromkreises vermindert und der Fehlerstrom entsprechend erhöht. Für die Grösse des Fehlerstromes sind allerdings nicht allein die Ohmschen Widerstände massgebend, sondern es spielen dabei die induktiven Widerstände, die von den durch den Polleiter, den Nulleiter und die Wasserleitung gebildeten Stromschleifen erzeugt werden, eine ganz bedeutende Rolle. Auch die Berechnung dieser Widerstände stösst auf Schwierigkeiten, weil die Wasserleitungen nicht immer parallel mit den elektrischen Leitungen verlaufen und weil der Stromverlauf in der Erde ganz unbekannt ist. Durch die Erhöhung des Fehlerstromes und die Verminderung des Widerstandes zwischen Fehlerstelle und Transformatornullpunkt wird auch die Spannungsverteilung günstiger, d. h. die Spannungsdifferenzen zwischen Nulleiter und Erde werden im allgemeinen kleiner als bei der Erdung des Nulleiters mit künstlichen Elektroden. Besitzt die Erde in der Umgebung der Wasserleitung überall ungefähr den gleichen spezifischen Widerstand, so ist zu erwarten, dass an den beiden Anschlußstellen I und II gleich grosse Spannungen gegenüber der Erde auftreten, und zwar betragen sie die Hälfte der zwischen Nullpunkt und Fehlerstelle herrschenden Spannung. Diese Spannungsverteilung bleibt auch dann ungefähr dieselbe, wenn das Netz nicht nur aus einer, sondern aus mehreren Leitungen, deren Nulleiter an die nämliche Wasserleitung geerdet sind, besteht, denn durch die weitern Nulleiterverbindungen mit der Wasserleitung werden die Widerstandsverhältnisse zwischen Wasserleitung und Erde nicht beeinflusst. Um nun zu zeigen, wie sich die

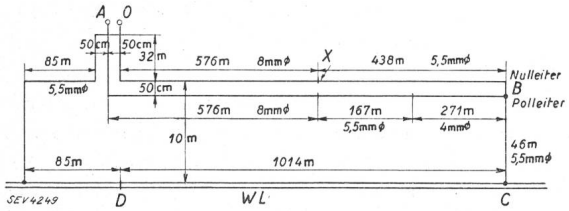


Fig. 63.
WL Wasserleitung.

Spannungsverhältnisse in Wirklichkeit gestalten, wurden an der Versuchsleitung des in Fig. 55 abgebildeten Niederspannungsnetzes Versuche durchgeführt, wobei die Versuchsleitung am Anfang und am Ende an eine Wasserleitung angeschlossen wurde. Die technischen Daten der Leitung können der Fig. 63 entnommen werden. Gemessen wurden dabei der über den Polleiter, der über den Nulleiter und der von der Wasserleitung zum Transformatornullpunkt zurückfliessende Strom, ferner an verschiedenen Punkten die Spannungen zwischen Nulleiter und Erde, Nulleiter und Wasserleitung und Erde gemäss Fig. 64.

Bei einer zwischen Pol- und Nulleiter angelegten Spannung von 148 V wurden folgende Ströme

	gemessen	auf 220 V umgerechnet
Nulleiter I_a . . .	A 68,5	100
Polleiter I_b . . .	A 125,0	185
Wasserleitung I_c . .	A 58,0	86

Bei den Versuchen an der gleichen Leitung, aber bei Erdung des Nulleiters am Anfang und Ende an

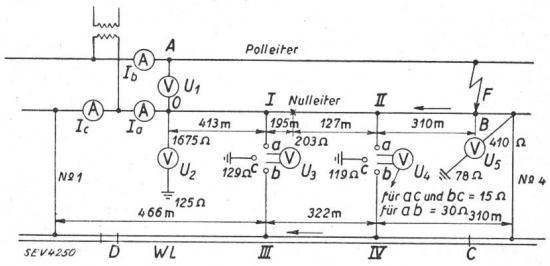


Fig. 64.
F Fehlerstelle.

künstliche Elektroden betrugen die auf 220 V umgerechneten Ströme

$$I_a \cong 154 \text{ A} \quad I_b \cong 155 \text{ A} \quad \text{und } I_c \cong 1{,}5 \text{ A}$$

Durch die Erdung des Nulleiters an die Wasserleitung ist der Fehlerstrom trotz des kleinen Widerstandes der Wasserleitung nur um 19 % gestiegen. Man sieht daraus, dass die Erhöhung des Fehlerstromes durch das Erden des Nulleiters an Wasserleitungen keine so bedeutende ist, wie man sehr oft annimmt.

Die gemessenen und auf 220 V umgerechneten Spannungen betrugen

	gemessen V	bzw.	bei 220 V V
U_2 =	18,3		27,2
$U_{3\,a,c}$ =	8,2		12,2
$U_{3\,a,b}$ =	0		0
$U_{3\,b,c}$ =	10,5		15,6
$U_{4\,a,c}$ =	1,3		1,9
$U_{4\,a,b}$ =	3,4		5,1
$U_{4\,b,c}$ =	5,0		7,4
U_5 =	8,6		12,7

Um ein Bild über den Spannungsverlauf zwischen Nulleiter und Erde zu bekommen, wurden an Hand der gemessenen Stromverteilung und der Widerstände der einzelnen Leiterelemente die EMK berechnet und zum Spannungsdiagramm zusammengesetzt. Dabei ist für die Berechnung der induktiven Schleifenwiderstände zwischen Nulleiter und Wasserleitung eine Distanz von 10 m angenommen und vorausgesetzt, dass der gemessene Erdstrom der Wasserleitung entlang geflossen sei. Das so berechnete Spannungsdiagramm ergab eine um 10 % grössere Spannung zwischen Pol- und Nulleiter als die tatsächlich angelegte. Bei den erwähnten Unsicherheiten in der Berechnung dürfte diese Abweichung

noch als zulässig erachtet werden. Die aus diesem Diagramm ermittelten Spannungen zwischen Nulleiter und Erde sind nun in Fig. 65 graphisch dargestellt und darin die gemessenen Spannungen eingetragen. Aus dieser Darstellung geht hervor, dass alle Messpunkte tiefer liegen als die gerechneten. Es rührt dies zum Teil davon her, weil im Spannungsdiagramm mit etwas zu hoher Betriebsspannung gerechnet wurde. Zum grossen Teil dürfte aber an der Differenz auch der Umstand schuld sein, dass die Sonden für die Spannungsmessungen noch im Bereich des Spannungstrichters der Wasserleitungen gelegen haben und deshalb diese Voltmeter nicht die ganze Spannung erfassten. Die Sonden waren in einer Distanz von 20 bis 30 m in senkrechter Richtung zur Hauptwasserleitung in die Erde gesetzt. Die Lage der Wasserzuleitungen zu den Gebäuden war nicht bekannt; man war deshalb über die Spannungsverteilung an der Erdoberfläche in der Umgebung der Wasserleitung nicht orientiert. Berücksichtigt man alle diese Umstände, so dürften diese Abweichungen verständlich sein.

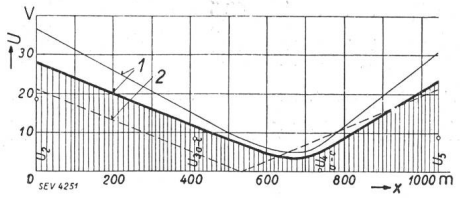


Fig. 65.
Spannung (U) zwischen Nulleiter und Erde und Wasserleitung und Erde in Abhängigkeit der Entfernung (x) von der Transformatorenstation.
(Nulleiter an Wasserleitung geerdet, Fehlerstelle am Ende der Leitung.)
1 Spannungsdifferenz Nulleiter-Erde.
2 Spannungsdifferenz Wasserleitung-Erde.
Dickausgezogene Kurve: Phasenspannung = 166 V.
Dünnausgezogene Kurve: Phasenspannung = 220 V.
o Messpunkte Nulleiter-Erde für 148 V Phasenspannung.

Bei einem zweiten Versuch wurde bei unveränderten Verbindungen zwischen Nulleiter und Wasserleitung die Fehlerstelle gegen die Transformatorenstation verschoben. Die Anordnung hiefür geht aus Fig. 66 hervor.

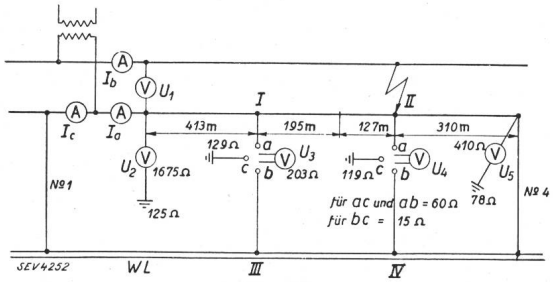


Fig. 66.
WL Wasserleitung.

Die gemessenen und auf 220 umgerechneten sowie die für den entsprechenden Versuch bei Verwendung künstlicher Elektroden auf 220 V umgerechneten Ströme sind in Tabelle V zusammengestellt.

Tabelle V.

	Nulleiter an Wasserleitung geerdet		Mit künstl. Elektroden 220 V Phasenspannung A
	gemessen bei 143 V A	umgerechnet auf 220 V A	
Nulleiterstrom . . . I_a	143	220	267
Polleiterstrom . . . I_b	200	308	269
Erdstrom . . . . . I_c	60	92,5	2,4

In diesem Fall würde der Fehlerstrom durch den Anschluss des Nulleiters an die Wasserleitung nur um ungefähr 15 % gegenüber dem Anschluss des Nulleiters an künstliche Elektroden erhöht. Die gemessenen bzw. auf 220 V umgerechneten Spannungen betrugen:

U_1	= 143 V	bzw.	220 V
U_2	= 19,3 V	"	29,6 V
$U_{3\,a,c}$	= 6,6 V	"	10,1 V
$U_{3\,a,b}$	= 8,6 V	"	13,2 V
$U_{3\,b,c}$	= 0 V	"	0 V
$U_{4\,a,c}$	= 31,7 V	"	48,6 V
$U_{4\,a,b}$	= 26,8 V	"	41,1 V
$U_{4\,b,c}$	= 3,4 V	"	5,2 V
U_5	= 8,6 V	"	13,2 V

Wie für das vorangehende Beispiel wurde auch für diesen Fall auf Grund der Stromverteilung und mit Hilfe des Spannungsdiagrammes die Spannungsdifferenzen zwischen Nulleiter und Erde berechnet. Sie sind in Fig. 67 graphisch dargestellt und es sind wiederum die Messpunkte zum Vergleich mit den Rechnungsresultaten eingetragen. Auch bei diesem Versuch liegen die Messpunkte und besonders die Messungen am Ende der Leitung tiefer als die gerechneten. Aus dieser Darstellung ist ersichtlich, dass bei der Fehlerstelle die grösste und am Anfang und Ende der Leitung kleinere Spannungsdifferenzen zwischen Nulleiter und Erde bestehen. Es zeigt sich also auch hier eine Abweichung von den Verhältnissen, die beim Erden des Nulleiters an künstlichen Elektroden vorkommen (vgl. Fig. 59). Diese Erscheinung rührt vom Spannungsabfall auf dem ausserhalb der Fehlerstelle liegenden Nulleiterstück her, der infolge des verhältnismässig hohen, über die Erde fliessenden Fehlerstromes erzeugt wird.

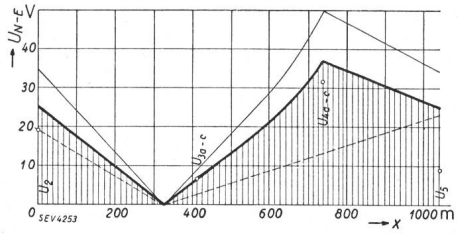


Fig. 67.
Spannung (U) zwischen Nulleiter und Erde in Abhängigkeit der Entfernung (x) von der Transformatorenstation.
(Nulleiter an Wasserleitung geerdet, Fehlerstelle zwischen Anfang und Ende der Leitung.)
Dickausgezogene Kurve: Phasenspannung = 160 V.
Dünnausgezogene Kurve: Phasenspannung = 220 V.
Gestrichelte Kurve: mutmassliche Spannung Wasserleitung-Erde bei 160 V Phasenspannung.
o Messpunkte Nulleiter-Erde für 143 V Phasenspannung.

Würde man den Nulleiter auch noch an der Fehlerstelle mit der Wasserleitung verbinden, so müssten wieder ähnliche Verhältnisse entstehen wie beim ersten Versuchsbeispiel, d. h. es müssten die Spannungen zwischen Nulleiter und Erde beim Transformatornullpunkt und bei der Fehlerstelle ungefähr gleich gross werden. Ferner müsste der ausserhalb der Fehlerstelle verlaufende Nulleiter eine ungefähr gleich hohe Spannung gegen Erde annehmen wie die bei der Fehlerstelle auftretende, denn in diesem Falle fliesst über den äussern Nulleiter ein unbedeutender Strom, weil durch die

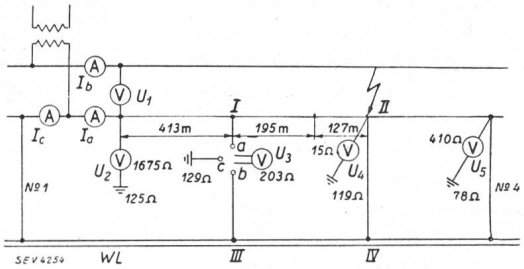


Fig. 68.
WL Wasserleitung.

Erdung bei der Fehlerstelle die durch den äussern Nulleiter und die zugehörige Wasserleitung gebildete Leiterschleife kurzgeschlossen wird. Dementsprechend kann auch der Spannungsabfall auf diesem Leiter nicht gross sein. Zum Nachweis der Richtigkeit dieser Anschauung wurde dann auch ein bezüglicher Versuch durchgeführt und dabei nachstehende Ströme und Spannungen gemessen. Bezüglich der Bezeichnungen sei auf Fig. 68 verwiesen. Zur Beurteilung der Wirkung der bei der Fehlerstelle angebrachten Erdung sind in Tabelle VI auch die Ströme notiert, die sich bei 220 V Phasenspannung ohne diese Erdung ergeben, und zum Vergleich mit der Erdung des Nulleiters an künstliche Elektroden sind ausserdem die Ströme bei dieser Erdungsart notiert.

Tabelle VI.

	Gemess. Ströme bei 138,5 V Spannung	bei 220 V Phasenspannung		
		mit Erdung bei der Fehlerstelle	ohne Erdung bei der Fehlerstelle	mit künstl. Elektroden
	A	A	A	A
Nulleiterstom . . I_a	126	201	220	267
Polleiterstrom . I_b	212,6	340	308	269
Erdstrom . . . . I_c	88	140	92,5	2,4

Man sieht daraus, dass durch das Anbringen einer Erdung bei der Fehlerstelle sowohl der Fehlerstrom als auch der Erdstrom gesteigert werden. Das Anbringen von Erdungsstellen zwischen Anfang und Ende der Leitung hat also im Gegensatz zum Erden an künstliche Elektroden eine Bedeutung. Infolge des grössern Fehlerstromes müssen aber auch die Spannungen zwischen Nulleiter und Erde kleiner werden, denn der Spannungsabfall im Transformator und auf dem Polleiter muss grösser und die Spannungsdifferenz zwischen Fehlerstelle und Transformatornullpunkt muss kleiner werden. Ein Vergleich der bezüglichen Spannungskurven in den Fig. 67 und 69 bestätigen diese Annahme ebenfalls. In Fig. 69 sind ausserdem die berechneten und gemessenen Spannungen, die zwischen Nulleiter und Erde herrschen, wenn ein zweiter Leitungsstrang mit ebenfalls an die Wasserleitung geerdetem Nulleiter zugeschaltet wird, enthalten. Diese Darstellung sowie Tabelle VII zeigen, dass durch die Parallelschaltung weiterer Verbindungen zwischen Nulleiter und Wasserleitungen zu

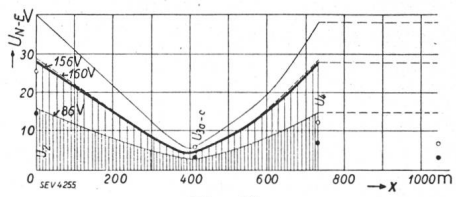


Fig. 69.
Spannung (U) zwischen Nulleiter und Erde in Abhängigkeit der Entfernung (x) von der Transformatorenstation. (Fehlerstelle zwischen Anfang und Ende der Versuchsleitung. Erdung am Anfang und Ende der Leitung und an der Fehlerstelle.)
Dickausgezogene Kurve: nur Versuchsleitung eingeschaltet, Phasenspannung = 156 V.
Gestrichelte und dünnausgezogene Kurve: zweite Leitung eingeschaltet. Phasenspannung = 160 V und 86 V.
o Messpunkte Nulleiter-Erde bei 138 V Phasenspannung.
● Messpunkte Nulleiter-Erde bei 76 V Phasenspannung.

der zwischen Nullpunkt und Wasserleitung bestehenden Verbindung in der Spannungsverteilung keine Aenderung eintritt.

Tabelle VII.

	Fehlerstelle am Ende der Leitung		Fehlerstelle zwischen Anfang u. Ende der Leitung		
	ohne Anschluß d. zweiten Leitung	mit Anschluß d. zweiten Leitung	ohne Anschluß d. zweiten Leitung	mit Anschluß d. zweiten Leitung	mit Leitung mit reduz. Spannung gemessen
Fehlerstrom (Polleiterstrom) . I_b A	186	186,5	336	335	332
Nulleiterstrom I_a A	102	103,5	200	200	198
Erdstrom . . I_c A	86,5	88,2	139,5	139	138
Spanng. Transf.-Nullp.-Erde U_2 V	27,2	26,0	41,5	40,2	43,0
Zwischenspannungen					
$U_{3\,a,c}$ V	15,7	15,0	10,5	10,5	9,8
$U_{3\,a,b}$ V	11,7	12,3	16,4	15,8	15,7
$U_{3\,b,c}$ V	0	0	6,2	6,05	6,65
$U_{4\,a,c}$ V	7,45	7,25	19,8	20,3	20,6
$U_{4\,a,b}$ V	1,99	2,58			
$U_{4\,b,c}$ V	5,3	5,16			
Spannung zwischen Leitungsende und Erde U_5 . . . V	12,80	12,8	11,6	11,9	10,4

In Tabelle VII sind ferner die auf die Phasenspannung von 220 V umgerechneten Messwerte für eine Fehlerstelle zwischen Anfang und Ende der Leitung mit und ohne Erdung bei der Fehlerstelle und mit 76 und 138 V Phasenspannung gemessene Werte eingetragen.

Aus den gemessenen Strömen und Spannungen geht deutlich hervor, dass die Spannungsverteilung zwischen Nulleiter und Erde praktisch unabhängig von der Anzahl der Erdungsstellen ist, dass das

Erden des Nulleiters nicht nur am Anfang und Ende einer Leitung, sondern auch auf dazwischen liegenden Punkten zur Herabsetzung der Spannungsdifferenz zwischen Nulleiter und Erde zweckmässig ist.

Die Erdung des Nulleiters an ausgedehnte Wasserleitungen bietet also gegenüber einer Erdung an künstlichen Elektroden folgende Vorteile:

1. Es treten grosse Fehlerströme auf, wodurch das Durchschmelzen der Sicherungen beschleunigt und damit die Zeitdauer gefährlicher Zustände herabgesetzt wird.
2. Es treten zwischen den Nulleitern bzw. zwischen den Gehäusen der genullten Objekte und der Erde kleinere Spannungsdifferenzen auf.
3. Die Spannungsdifferenzen zwischen Nulleiter und Erde sind praktisch unabhängig von der Anzahl der der Nullpunktserdung parallel geschalteten Nulleitererdungen. Die Spannungsdifferenzen Fehlerstelle — Erde und Transformatornullpunkt — Erde werden ungefähr gleich gross. Man erreicht damit also die kleinstmöglichen Spannungsdifferenzen.
4. Zwischen Anfang und Ende einer Leitung angebrachte Erdungen kommen zur besseren Wirkung und tragen in vielen Fällen zur Herabsetzung der Spannungsdifferenzen zwischen Nullleiter und Erde bei.

2. Strom- und Spannungsverhältnisse beim Auftreten von Fehlern im Niederspannungsnetz und in den Hausinstallationen.

Ausser den Fehlern an den elektrischen Anschlussobjekten und deren Schaltapparaten können auch Fehler im Niederspannungsnetz und in den Hausinstallationen vorkommen.

Als solche kommen in Betracht:

a) Erdschluss eines Polleiters;
b) Kurzschluss zwischen Nulleiter und Polleiter im Netz;
c) Unterbruch des Nulleiters in der Installation oder im Netz;
d) Das Zusammentreffen von Netzen mit verschiedenem Schutzsystem und die Folgen beim Auftreten von Fehlern;
e) Der Uebertritt von Hochspannung auf Niederspannung.

Im nachstehenden werden nun die Wirkungen solcher Zustände untersucht und es wird auf die entsprechenden Schutzmassnahmen hingewiesen.

a) Erdschluss eines Polleiters.

Bei Anschlussobjekten, die eine natürliche Erdung besitzen, wie z. B. Heisswasserspeicher, geerdete Radioapparate, die nicht genullt sind, können Isolationsfehler auftreten, bei denen ein Polleiter mit der natürlichen Erdleitung in Berührung kommt. Ebenso ist in einer elektrischen Installation, die Wasser- oder Gasleitungen kreuzt, infolge von Isolationsfehlern das Zusammentreffen eines Polleiters mit einer solchen zur Erde führenden Metalleitung möglich *). Ferner ist es möglich, dass in einem Niederspannungsnetz ein Polleiterdraht reisst und zur Erde fällt. In allen diesen Fällen treten ganz ähnliche Verhältnisse auf, wie sie beim Auftreten von Fehlern an den Anschlussobjekten gezeigt wurden. Es fliesst ein Strom vom Transformator über den Polleiter zur Fehlerstelle, von da zur Erde und über die Erde zum Transformatornullpunkt zurück. Infolge der Erdwiderstände treten an beiden Erdübergangsstellen Spannungen auf, die von der Grösse des Fehlerstromes und der Höhe der Erdwiderstände abhängig sind. Ist die Summe der Erdwiderstände verhältnismässig gross, so ist die Summe der beiden gegen Erde auftretenden Spannungen ungefähr gleich der Phasenspannung des Netzes, und die Einzelspannungen verhalten sich zueinander wie die betreffenden Erdwiderstände. Ist nun der Erdwiderstand der Nulleitererdung im Verhältnis zum Erdwiderstand der Fehlerstelle gross, so kann zwischen dem Nullleiter und damit zwischen sämtlichen im betreffenden Netz angeschlossenen und genullten Objekten und der Erde eine verhältnismässig hohe Spannung auftreten. Dieser Zustand kann insbesondere in Netzen mit künstlichen Nulleitererdungen bei Fehlern an nicht genullten, aber mit natürlicher Erdung versehenen Anschlussobjekten zutreffen. Ist umgekehrt der Erdwiderstand der Fehlerstelle im Verhältnis zum Nulleitererdungswiderstand hoch, so kann zwischen der Fehlerstelle und der Erde eine gefährlich hohe Spannung auftreten. Solche Zustände können z. B. beim Bruch eines Polleiters der Freileitung auftreten. Ein auf den Boden gefallener Draht wird sozusagen in allen Fällen einen verhältnismässig grossen Erdwiderstand und insbesondere einen wesentlich grössern Widerstand als der resultierende Widerstand aller Nulleitererdungen aufweisen. Zwischen dem gebrochenen Polleiterdraht und der Erde kann also angenähert die Phasenspannung des Netzes auftreten und es sind infolgedessen auf dem Boden in der Nähe des Drahtes hohe Schrittspannungen und beim Berühren des Drahtes hohe Berührungsspannungen zu erwarten. Aehnliche Verhältnisse können auch entstehen, wenn z. B. ein Dachständer mit dem Blitzableiter oder andern geerdeten Metallkonstruktionen eines Hauses verbunden ist und nicht genullt wäre. Die geerdeten Gebäudeteile könnten auch ganz beträchtliche Spannungen gegen Erde annehmen. Da bei allen diesen Zuständen wegen der verhältnismässig hohen Widerstände im Fehlerstromkreis die dem Fehler vorgeschalteten Sicherungen nicht schmelzen werden, so können diese gefährlichen Zustände längere Zeit bestehen bleiben. *Zur möglichst weitgehenden Vermeidung solcher Fälle muss deshalb gefordert werden, dass die Gehäuse aller Objekte, die geschützt werden müssen, ausnahmslos an den Nulleiter anzuschlies-*

*) E. Sprecher, Ueber den Erdschluss in Niederspannungsanlagen, Bull. SEV 1933, S. 438.

sen, d. h. zu nullen sind, dass alle Objekte, die eine natürliche Erdleitung besitzen, genullt werden müssen, auch wenn die bezüglichen Vorschriften einen Schutz nicht vorschreiben, und dass alle geerdeten Metallteile eines Gebäudes (Wasser-, Gasleitungen usw.), die bei einem Isolationsdefekt mit einem Polleiter der Installation in Berührung kommen können, an den Nulleiter angeschlossen werden müssen (siehe Art. 26 der Starkstromverordnungen).

b) Kurzschluss zwischen Polleiter und Nulleiter im Netz.

Treffen in einem Niederspannungsnetz ein Polleiter und ein Nulleiter infolge eines Drahtbruches oder aus irgendwelchen andern Gründen zusammen, so entstehen ganz ähnliche Strom- und Spannungsverhältnisse wie beim Auftreten eines Isolationsfehlers an einem Anschlussobjekt. Es können zwischen Nulleiter bzw. zwischen den genullten Objekten und der Erde gefährliche Spannungen entstehen. Infolgedessen muss dafür gesorgt werden, dass die Fehlerstelle abgeschaltet wird, bzw. dass in der betreffenden Transformatorenstation die in Frage kommenden Strangsicherungen innert kürzester Zeit durchschmelzen. Das heisst, die Niederspannungsnetze sowie die Strangsicherungseinsätze müssen so berechnet werden, dass das Durchschmelzen der Sicherungen innert einiger Sekunden auch dann noch gewährleistet ist, wenn das Zusammentreffen des Nulleiters mit einem Polleiter am Ende des betreffenden Stranges stattfindet. Gehen von starken Leitungen, die auch eine grosse Belastung aufweisen, schwächer dimensionierte Leitungsstränge zur Speisung abgelegener Orte mit geringer Belastung ab, so ergeben Leitungen, die in bezug auf den Spannungsabfall richtig dimensioniert sind, bei der Berechnung in bezug auf die Kurzschlussverhältnisse Strangsicherungen, die bei der normalen Belastung schmelzen würden. In solchen Fällen muss man sich dadurch helfen, dass man solche Zweige separat absichert, d. h. dass man Freileitungssicherungen bei der Abzweigung einbaut. Bei der Wahl der Sicherungen in der Transformatorenstation ist das im Abschnitt B_3 Gesagte zu beachten. Ausserdem werden in den Transformatorenstationen der EKZ die durch Rechnung festgestellten, maximal zulässigen Nennstromstärken der Schmelzeinsätze der einzelnen Strangsicherungen angeschrieben, so dass die Einsätze jederzeit auf die Zulässigkeit geprüft werden können. Damit ist eine Gewähr dafür geboten, dass keine zu stark dimensionierten Einsätze verwendet werden.

c) Unterbruch des Nulleiters in den Hausinstallationen oder im Niederspannungsnetz.

Wird der Nulleiter an irgendeiner Stelle unterbrochen, so entstehen zwei verschiedene Zustände, je nach dem das abgetrennte Nulleiterstück isoliert oder geerdet ist. Im ersten Fall kommt für die Betrachtung der Spannungsverhältnisse das Widerstandsschema Fig. 70 in Frage. Für die Berechnung können die Transformator- und Leitungswiderstände vernachlässigt werden, weil sie im Verhältnis zu den zwischen Pol- und Nulleiter eingeschalteten Widerständen klein sind. Die Widerstände 4, 5 und 6 stellen die resultierenden Widerstände der zwischen den drei Phasen und dem Nulleiter angeschlossenen Objekte dar. In der Regel handelt es sich nur um Ohmsche Widerstände (Glühlampen, Kochplatten, elektrische Oefen und dergleichen). Die Untersuchung der Spannungsverhältnisse kann sich deshalb auf solche Widerstände beschränken.

Die einfachsten und aber auch ungünstigsten Verhältnisse ergeben sich, wenn nur einer der drei Widerstände angeschlossen ist, bzw. die *eine Phase* belastet ist. Sobald der Nulleiter unterbrochen wird, fliesst auch kein Strom mehr durch die angeschlossenen Objekte, denn der Nulleiter, der die Rückleitung bildet, ist ja unterbrochen. Besteht im betreffenden Netz sonst kein Fehler, so fliesst auch kein Strom durch die Erdungswiderstände des Nulleiters (R_0 und R_1). Dementsprechend herrscht

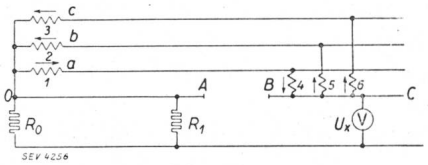


Fig. 70.

zwischen Nulleiter B — C und Erde die Phasenspannung des Netzes. Alle an dieses Nulleiterstück genullten Objekte nehmen demgemäss z. B. in einem 380/220 V-Netz eine Berührungsspannung gegen Erde von 220 V an. Dieser Zustand kann längere Zeit bestehen bleiben, weil keine Sicherungen schmelzen werden. Streng genommen werden allerdings die Berührungsspannungen etwas kleiner sein, denn bei einer gleichzeitigen Berührung von Nulleiter (B — C) und Erde sind im fraglichen Stromkreis ausser dem Widerstand des menschlichen oder tierischen Körpers auch noch der Widerstand der Anschlussobjekte und der Nullpunktserdung eingeschlossen. Die letztgenannten Widerstände können aber im Verhältnis zu erstgenannten so klein sein, dass die Berührungsspannung praktisch gleich der Phasenspannung wird. Sind *zwei Phasen belastet*, z. B. die Widerstände 4 und 5 angeschlossen, so fliesst ein Strom von der Transformatorklemme a über die Widerstände 4 und 5 zur Klemme b. Für den Stromdurchfluss ist somit die Summe der beiden Widerstände und die verkettete Spannung massgebend. Sind z. B. beide Widerstände gleich gross, so wird die verkettete Spannung a b im Spannungsdiagramm Fig. 71 durch die Widerstände halbiert. Die Berührungsspannung U_x ist dann halb so gross wie die Phasenspannung. Sind die Widerstände ungleich gross, so verschiebt sich der Punkt (BC) gegen a oder gegen b je nach dem Verhältnis der beiden Widerstände. Bei der Belastung von zwei Phasen kann

die Berührungsspannung somit zwischen der halben und der vollen Phasenspannung variieren. Weichen die Widerstände beträchtlich voneinander ab, so kann die Spannung am Objekt mit dem grössern Widerstand grösser als die Phasenspannung werden (Grenzfall = verkettete Spannung), wobei dann das betreffende Objekt überlastet und, falls keine Sicherung schmilzt, beschädigt werden kann.

Sind *alle drei Phasen belastet*, die Widerstände aber verschieden gross, so liegt der Punkt (BC) an irgendeiner Stelle innerhalb des Dreiecks a b c (Fig. 71). Die Berührungsspannung U_x kann in diesem Fall zwischen O (alle drei Widerstände gleich gross) und der Phasenspannung (Widerstand der einen Phase im Verhältnis zu den Widerständen der beiden andern Phasen sehr klein) variieren. Auch in diesem Fall können an einzelnen Objekten grössere Spannungen als die Phasenspannung auftreten, wodurch die Objekte beschädigt werden können.

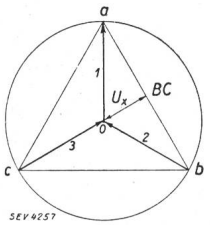


Fig. 71.

Wesentlich anders werden die Verhältnisse, wenn das Nulleiterstück BC geerdet ist. Für die Betrachtung dieses Falles kommt das Widerstandsschema Fig. 72 in Frage.

Ist wiederum nur *eine der drei Phasen* belastet, z. B. der Widerstand R_4 eingeschaltet, so fliesst ein Strom von der Transformatorklemme a über den Objektwiderstand R_4, die Erdungswiderstände R_7 und R_8 zum Transformator zurück. Für die Grösse des Stromes sind die Phasenspannung und die Summe der Widerstände R_4, R_7 und R_8 massgebend. Infolge des Stromdurchganges durch die Widerstände R_7 und R_8 ergeben sich sowohl für die am Nulleiterstück O — A als am Stück B — C genullten Objekte Berührungsspannungen. Sie sind von der Grösse des Stromes und der in Betracht kommenden Widerstände abhängig. Wie sich die Verhältnisse beispielsweise in einem 380/220 V-Netz gestalten können, ist aus Tabelle VIII ersichtlich. Es sind darin die Berührungsspannungen berechnet für verhältnismässig grosse und kleine Netzbelastung und für die Widerstände $R_7 = 20\ \Omega$ bzw. $1\ \Omega$ und $R_8 = 5\ \Omega$.

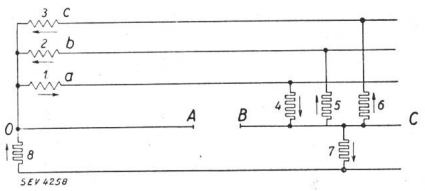


Fig. 72.

Bei den genannten Widerstandsverhältnissen treten bei einer einphasigen Belastung des Netzes von ungefähr 1 kW bereits gefährliche Berührungsspannungen auf. Eine zwischen Pol- und Nulleiter eingeschaltete Kochplatte genügt also, um gefährliche Zustände herbeizuführen. Die Fehlerströme sind in allen Fällen kleiner als die normalen Ströme der Objekte; die gefährlichen Spannungszustände können deshalb längere Zeit bestehen bleiben. Die einphasige Belastung stellt allerdings den Grenzfall der unsymmetrischen Belastungen in einem Drehstromnetz dar. Es kann aber ohne weiteres nachgewiesen werden, dass auch bei ungleichmässiger dreiphasiger Belastung gefährliche Zustände entstehen können. Die hiefür nötige Unsymmetrie der Belastung zur Erzeugung gefährlicher Zustände hängt von der Grösse der beiden Erdwiderstände und vom Verhältnis dieser beiden Widerstände zueinander ab. Immerhin sind die Verhältnisse günstiger, wenn das abgetrennte Nulleiterstück geerdet ist, als wenn dies nicht der Fall ist, denn im ersten Falle ist immer eine gewisse Stromstärke, die über die Erdungsstelle fliesst, nötig, um gefährliche Zustände herbeizuführen, und damit diese Stromstärke zustande kommt, ist wiederum eine ganz bestimmte Unsymmetrie der Belastung nötig.

Tabelle III.

Belastung der Phase 1		100 W	1000 W	10000 W
Phasenspannung	V	220	220	220
Widerstände	Ω	484	48,4	4,84
1. $R_7 = 20$ $R_8 = 5$				
Widerstand des Stromkreises	Ω	509	73,4	29,84
Fehlerstrom	A	0,431	3,00	7,35
Berührungsspannungen				
U_7	V	8,62	60,0	147,0
U_8	V	2,15	15,0	36,8
2. $R_7 = 1$ $R_8 = 5$				
Widerstand des Stromkreises	Ω	490	54,4	10,84
Fehlerstrom	A	0,45	4,04	20,3
Berührungsspannungen				
U_7	V	0,45	4,04	20,3
U_8	V	2,25	20,2	101,5

Aus allen diesen Ueberlegungen geht hervor, dass in erster Linie der Nulleiter im Netz und in der Hausinstallation lückenlos erstellt und so ausgeführt werden muss, dass jede Unterbrechung tunlichst vermieden wird. Dies bedingt, dass die Nulleiter an keiner Stelle abgesichert werden. Ausserdem muss dafür gesorgt werden, dass beim Abschalten von Leitungen immer zuerst die Polleiter und erst nachher der Nulleiter abgeschaltet werden und beim Einschalten einer Leitung die umgekehrte Reihenfolge eingehalten wird. Die Nullleiterquerschnitte der Freileitungen sollen zur Herabsetzung der Bruchgefahr bei Sturm und nassem Schneefall nicht zu klein gewählt werden. Um die Gefahren, die ein allfälliger Drahtbruch mit sich bringt, herabzusetzen, ist es zweckmässig, alle Nullleiter an den Enden an Erde zu legen (also auch Abzweigungen von Leitungen). Ferner werden die Gefahren dadurch vermindert, dass möglichst alle einphasigen Anschlussobjekte nicht zwischen Pol- und Nulleiter, sondern zwischen zwei Polleiter angeschlossen werden.

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

Ist in einem Niederspannungsnetz die Nullung und in einem andern, mit dem ersten zusammenschaltbaren Netz das Erdungssystem eingeführt und tritt an einem geerdeten Objekt ein Isolationsfehler auf, so ergeben sich im genullten Netz genau die gleichen Erscheinungen, wie wenn im genullten Netz ein Erdschluss an einem Polleiter auftreten würde. Es können entweder zwischen Nullleiter bzw. allen genullten Objektgehäusen und der Erde oder zwischen dem fehlerhaften Objekt und der Erde oder zwischen Nulleiter und dem fehlerhaften Objekt und der Erde gefährliche Spannungen auftreten. Es muss deshalb ein Zusammenschalten solcher Netze tunlichst vermieden werden. Ist aber ein Zusammenschalten zeitweise trotzdem nötig, so kann der Gefahr, dass zwischen dem Nulleiter des genullten Netzes und der Erde gefährliche Spannungen auftreten, durch ein Zusammenschalten der beiden Netze über einen Schutzschalter, dessen Auslösespule an den Nullleiter des genullten Netzes und an die Erde angeschlossen wird, begegnet werden. Ausser diesem verhältnismässig seltenen Fall des Zusammentreffens von Netzen mit verschiedenen Schutzsystemen kommt es verhältnismässig häufig vor, dass neben einem allgemeinen Netz noch ein eigentliches Kraftnetz mit gleicher oder höherer Spannung vorhanden ist, in welchem der Nulleiter fehlt und infolgedessen in der Regel nicht die Nullung, sondern die Erdung angewendet wird. Es wurde nun bereits im dritten Abschnitt des Kapitels C, «Die Anwendung des Erdungssystemes», gezeigt, welchen Einfluss das Auftreten eines Isolationsfehlers im geerdeten Netz auf das genullte Netz haben kann, und es wurde im genannten Abschnitt auch auf die Massnahmen, die zur Vermeidung gefährlicher Zustände dienen, hingewiesen. Eine nochmalige Beschreibung dieser Zustände erübrigt sich deshalb.

e) Uebertritt von Hochspannung auf Niederspannung.

Kommt ein Pol einer Hochspannungsanlage infolge eines Isolationsdefektes mit einem Pol eines von der Hochspannungsanlage gespeisten Niederspannungsnetzes in Berührung, so fliesst von der Hochspannungsstromquelle aus ein kapazitiver Strom über den betreffenden Hochspannungsleitungsdraht zur Fehlerstelle und von da je nach Lage der Fehlerstelle über einen Teil oder die ganze Niederspannungswicklung des Transformators zum Transformatornullpunkt und über die Nullpunktserdung zur Erde. Von da verteilt sich der Strom und fliesst über den zwischen den beiden gesunden Polleitern der Hochspannungsleitung und der Erde liegenden kapazitiven Widerstand zur Stromquelle zurück. Kommt der Pol der Hochspannungsanlage mit dem Nulleiter des Niederspannungsnetzes in Berührung, so wird die Wicklung des Transformators vom Strom nicht durchflossen, sondern der Strom fliesst direkt zur Erde. In diesem Fall ist die Höhe des Stromes durch die Höhe der Betriebsspannung der Hochspannungsanlage, den Ohmschen Widerstand der Nulleitererdung des Niederspannungsnetzes (resultierender Widerstand aller Nulleitererdungen) und die kapazitiven Widerstände der beiden gesunden Leiter des Hochspannungsnetzes bestimmt. Diesem Strom und dem Widerstand der Nulleitererdung entsprechend tritt zwischen Nulleiter und Erde eine Spannung auf, die längere Zeit bestehen bleiben kann, weil in einem ungeerdeten Hochspannungsnetz der einpolige Erdschluss keine Auslösung des in Frage kommenden Hochspannungsschalters bewirkt. Da die zwischen Nulleiter und Erde herrschende Spannung nicht mehr als 50 V betragen darf, so darf der resultierende Erdwiderstand aller Nulleitererdungen nicht grösser als

$$R = \frac{50}{I_c}$$

sein, wobei I_c den Erdschlußstrom der Hochspannungsanlage bedeutet.

Ein 8 kV-Freileitungsnetz von ungefähr 200 km Stranglänge weist bei einem Erdwiderstand der Fehlerstelle von weniger Ohm einen Erdschlussstrom von ca. 6 A auf. In einem solchen Netz dürfte also der aus allen Nulleitererdungen resultierende Erdwiderstand nicht mehr als ungefähr 8 Ω betragen. Aus den bereits angeführten Gründen ist es aber zweckmässig, darnach zu trachten, auch für solche Fälle den Erdwiderstand wenn möglich noch kleiner zu halten. Ganz besonders wichtig ist es aber mit Rücksicht auf den doppelpoligen Hochspannungserdschluss, dass dieser Erdwiderstand so klein als möglich gehalten wird, damit entweder der Erdwiderstand der zweiten in Betracht kommenden Erdungsstelle grösser als derjenige der Nulleitererde ist und zwischen Nulleiter und Erde eine möglichst kleine Spannung auftritt, oder die beiden Erdwiderstände so klein sind, dass an beiden Erdungsstellen infolge des grossen Spannungsabfalles auf der Hochspannungsleitung und in der Stromquelle nur kleinere Spannungen auftreten können.

Erfolgt der Uebertritt der Hochspannung auf einen Polleiter, so ändern sich die Spannungsverhältnisse zwischen Nulleiter und Erde nur unwesentlich, denn in diesem Falle wird der Erdschlußstrom nur ganz unbedeutend kleiner.

3. Zusammenfassung.

Bei der Anwendung jedes beliebigen Schutzsystems trachtet man darnach, die beim Auftreten eines Fehlers zwischen den berührbaren, nicht stromführenden Metallteilen oder Anschlussobjekten und der Erde entstehende Spannung entweder auf ein ungefährliches Mass herabzusetzen oder durch Abschalten der Fehlerstelle zum Verschwinden zu bringen.

Für die Nullung schreibt die Starkstromverordnung in Art. 26, Ziffer 4, vor, dass diese Spannungsdifferenz bei der Anwendung der Nullung nicht mehr als 50 V betragen darf. bzw. Spannungen von mehr als 50 V nicht länger als einige Sekunden bestehen bleiben dürfen. Durch vorstehende Untersuchung über die beim Auftreten irgendwelcher Fehler in den Installationen oder im Niederspannungsnetz sich ergebenden Zustände wurde gezeigt, dass bei der Anwendung der Nullung nicht nur bei der Fehlerstelle, sondern bei allen genullten Metallteilen eines metallisch zusammenhängenden Niederspannungsnetzes mehr oder weniger hohe Spannungsdifferenzen zwischen diesen und der Erde entstehen. Es können also gefährliche Zustände auf viele andere genullte Objekte des gleichen Netzes übertragen werden. Die Versuche der EKZ über den Einfluss des elektrischen Stromes auf den menschlichen Körper haben gezeigt, dass bei Spannungen von mehr als 30 V umfasste Elektroden unter Umständen nicht mehr losgelassen werden können. Da nun insbesondere mit der Verbreitung der elektrischen Küche die Zahl der Objekte, deren Metallteile umfasst werden müssen, immer grösser wird, so muss unter Berücksichtigung der genannten Umstände die Frage aufgeworfen werden, ob man unter solchen Umständen die maximal zulässige Spannungsdifferenz zwischen nicht stromführenden Metallteilen und der Erde im Falle eines Fehlers ausnützen solle oder ob es nicht angezeigt wäre, die zulässige Spannung entsprechend tiefer anzusetzen. Berücksichtigt man ausserdem, dass schon sehr kleine Spannungen eine Schreckwirkung auszuüben vermögen, so kommt man zum Schluss, dass man bei der Anwendung der Nullung in erster Linie darnach trachten sollte, die mit dem Auftreten von Fehlern entstehenden Spannungsdifferenzen zwischen den genullten Objekten und der Erde so rasch als möglich zum Verschwinden zu bringen und in denjenigen Fällen, wo dies nicht möglich ist, dafür zu sorgen, dass keine Spannungen von mehr als 30 V auftreten. In den internen Vorschriften der EKZ wurde diese Spannung sogar auf 20 V herabgesetzt. Aber auch dann, wenn die Fehlerstellen abgeschaltet werden, ist darnach zu trachten, dass die bis zur Abschaltung bestehenden Spannungsdifferenzen möglichst niedrig werden. Um sicher zu sein, dass in jedem Fall, wo ein Schluss zwischen Pol- und Nulleiter auftritt, die Fehlerstelle abgeschaltet wird, müssen die Leitungen so dimensioniert sein, dass beim Auftreten eines solchen Fehlers am Ende eines Leitungsstranges der Fehlerstrom genügend gross wird, um die Sicherungseinsätze der Strangsicherungen in der Transformatorenstation innerhalb weniger Sekunden abzuschmelzen. Stösst man bei langen, schwach belasteten Zweigleitungen, die an stark belastete Leitungen angeschlossen sind, in dieser Beziehung auf Schwierigkeiten, so kann man sich durch den Einbau von Sicherungen in die Zweigleitung mit entsprechend schwächer dimensionierten Schmelzeinsätzen behelfen. Die EKZ haben bis Ende September 1933 81 Ortsnetze ganz und 45 zum Teil auf die Normalspannung umgebaut und die Nullung eingeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass in den Netzen zusammengebauter Ortschaften sozusagen keine, in mehr zerstreuten Ortschaften dagegen 1 bis 5 solcher Sicherungsgruppen eingebaut werden mussten. Die Bemessung der Schmelzeinsätze der Strangsicherungen in den Stationen und der Freileitungssicherungen nach vorstehenden Gesichtspunkten hat bis jetzt keine Schwierigkeiten gezeitigt. Befürchtungen, dass infolge dieser Massnahmen die Sicherungen wegen Ueberlastung durchschmelzen, haben sich nicht erfüllt. Zur Erhöhung der Fehlerstromstärke und gleichzeitig zur Herabsetzung der Spannungsdifferenzen zwischen den genullten Objekten und der Erde sind die Nulleiterquerschnitte der Netzstränge möglichst hoch zu wählen. In den Netzen der EKZ, in denen die Nullung eingeführt ist, wurden die Nulleiterquerschnitte immer mindestens gleich gross wie die Polleiterquerschnitte und nicht unter 24 mm² (5,5 mm Drahtdurchmesser) gewählt. Zur Herabsetzung der Spannungen dient im weitern das Erden des Nulleiters mindestens am Anfang und Ende eines jeden Leitungsstranges und an den Enden längerer Abzweigungen. Dazwischen liegende Erdungsstellen haben ausserdem beim Erden des Nulleiters an Wasserleitungen eine besondere Bedeutung. Als Elektroden für das Erden des Nulleiters sollen wenn immer möglich ausgedehnte Wasserleitungen benützt werden, weil dadurch der Fehlerstrom erhöht und die Spannungsdifferenz zwischen den genullten Objekten und der Erde herabgesetzt wird. Bei der Berechnung der Fehlerströme wird man allerdings gut tun, den Einfluss der Wasserleitung nicht zu berücksichtigen, sondern die durch die Wasserleitung bedingte Erhöhung des Fehlerstromes als Sicherheitsfaktor zu betrachten.

Da man beim Nullungssystem darnach trachtet, den einpoligen Erdschluss abzuschalten, so besteht für die Motoren die Gefahr, dass sie nach dem Auftreten eines Fehlers einphasig weiterlaufen und die Wicklung infolge übermässiger Erwärmung beschädigt wird. Es ist deshalb zweckmässig, die Motoren durch automatische Schalter zu schützen. Damit aber der einpolige Erdschluss in jedem Fall erfasst wird, müssen alle drei Pole mit Auslöseeinrichtungen ausgerüstet sein.

Im vorstehenden wurde ferner gezeigt, dass bei Isolationsfehlern an geerdeten und nicht genullten Objekten oder bei Isolationsfehlern an Objekten, die eine natürliche Erdung besitzen (Heisswasserspeicher) oder wenn ein Polleiter mit geerdeten Metallteilen eines Gebäudes (Wasser-, Gasleitungen usw.) in Berührung kommt, nicht nur bei der Fehlerstelle, sondern an allen genullten Objekten des betreffenden Niederspannungsnetzes gefährliche Zustände entstehen können. Um dies zu verhüten, schreibt Ziffer 5 des Art. 26 der Starkstromverordnung vor, dass in genullten Niederspannungs-

anlagen alle nicht stromführenden Metallteile von Apparaten und Metallumhüllungen von Leitungen, für welche besondere Schutzmassnahmen für den Fall möglicher Isolationsdefekte vorgeschrieben sind, *ausnahmslos* an den Nulleiter angeschlossen werden müssen und dass alle Metallteile, die mit Einzelerdung versehen sind und solche, die natürlicherweise gut mit Erde verbunden sind und auf welche Ueberschläge von Polleitern zu befürchten sind, an den Nulleiter angeschlossen werden müssen. Wenn also in einem Niederspannungsnetz die Nullung eingeführt werden soll, so darf nicht so vorgegangen werden, dass nur die neu anzuschliessenden Objekte genullt werden, sondern es müssen innert möglichst kurzer Frist alle bisher geerdeten Objekte genullt werden. Aus dem gleichen Grunde dürfen auch nicht zwei Niederspannungsnetze, von denen im einen die Nullung und im andern die Erdung angewendet wird, zusammengeschaltet werden, ohne dass für den Fall eines Erdschlusses im geerdeten Netz durch einen Schutzschalter für die Trennung der Netze gesorgt wird.

Ferner wurde auf die ganz besondern Gefahren, die bei einem Unterbruch eines Nulleiters entstehen, hingewiesen. Es müssen deshalb sowohl in jeder Hausinstallation als auch im Niederspannungsnetz und in der Transformatorenstation Massnahmen getroffen werden, die eine Verhütung des Nulleiterunterbruches bezwecken. In den Hausinstallationen muss insbesondere dafür gesorgt werden, dass der Nulleiter von der Hauseinführung bis zu den Objektgehäusen lückenlos erstellt ist und dass keine Verbindungsstellen vorhanden sind, die ohne besonderes Werkzeug gelöst werden können. In den Freileitungsnetzen muss besonders für eine hohe mechanische Festigkeit des Nulleiters gesorgt werden, um Unterbrechungen infolge von Sturm oder Schneelast zu vermeiden. Die Starkstromverordnung schreibt deshalb in Art. 26, Ziffer 6, vor, dass die mechanische Festigkeit des Nullleiters überall mindestens derjenigen der Polleiter entsprechen müsse. In den Transformatorenstationen muss dafür gesorgt werden, dass beim Abschalten einzelner Leitungsstränge der Nulleiter nicht abgeschaltet werden kann, bevor die Polleiter ausgeschaltet sind, und beim Einschalten, dass der Nulleiter vor den Polleitern eingeschaltet wird. Bezügliche Vorschriften sind in Ziffer 7 des erwähnten Artikels der Starkstromverordnung enthalten.

Da bei der Nullung der Nulleiter mit den berührbaren Apparatengehäusen verbunden ist, so bildet auch der Uebertritt von Hochspannung auf Niederspannung eine ganz besondere Gefahr. Zu deren Verminderung muss darnach getrachtet werden, dass der resultierende Widerstand aller Nullleitererdungen eines metallisch zusammenhängenden Netzes möglichst klein ist. Auf jeden Fall sollte der Erdschlußstrom keine grössere Spannung als 50 V, besser noch keine grössere Spannung als 30 V erzeugen können. Beim Erden des Nulleiters an ausgedehnte Wasserleitungen wird diese Forderung im allgemeinen erfüllt sein. Müssen dagegen künstliche Elektroden verwendet werden, so muss dieser Widerstand durch Messung ermittelt und, wenn nötig, durch Vermehrung der Erdungsstellen oder durch Vergrösserung der Erdelektrode auf das nötige Mass herabgesetzt werden.

Die EKZ, in deren Hochspannungsnetzen mit einem Erdschlußstrom von 6 A gerechnet werden muss, trachten darnach, den resultierenden Widerstand aller Nulleitererdungen auf unter 3 Ω zu halten. Die beim Uebertritt von Hochspannung auf Niederspannung entstehende Spannungsdifferenz zwischen Nulleiter und Erde kann also ca. 20 V nicht übersteigen.

Vorstehende Untersuchung zeigt, dass die Anwendung der Nullung eine sehr sorgfältige Ausführung der erforderlichen Massnahmen in den Hausinstallationen, in den Niederspannungsnetzen und in den Transformatorenstationen bedingt. Sind diese Massnahmen in zweckmässiger Weise durchgeführt, so wird die Nullung im allgemeinen als gute Schutzmassnahme angesprochen werden können. Eine Anwendung der Nullung, ohne diese Massnahmen zu treffen, könnte dagegen zu sehr gefährlichen Zuständen führen.

(Schluss folgt.)

Hochfrequenztechnik und Radiowesen — Haute fréquence et radiocommunications

Messung der charakteristischen Grössen von Rundfunkstörern.

621.396.82

Sowohl in der Schweiz als auch in den meisten umliegenden Ländern sind seit einiger Zeit Bestrebungen zur wirksamen Bekämpfung der Radiostörungen im Gange, die ihren Niederschlag teilweise in regelnden Vorschriften und Wegleitungen gefunden haben. Ein erster Schritt zur praktischen Bekämpfung wird in der Schweiz durch die Einführung eines Radiostörschutzzeichens getan, das auf Apparaten angebracht werden darf, die sich bei einer Prüfung als störfrei erweisen [1]). Zur Prüfung auf Radiostörfreiheit wurde namentlich von S & H ein besonderes Gerät entwickelt, das im folgenden kurz beschrieben werden soll [2]).

[1]) Siehe den Entwurf zu einem solchen Reglement im Bull. SEV 1934, No. 23.

Die Messprinzipien.

Wenn bei einem radiostörenden Apparat die Störintensität gemessen werden soll, so kann dies dadurch geschehen, dass er in möglichster Angleichung an die wirklichen Verhältnisse an eine typische Installation angeschlossen wird und mit einem Radioempfangsapparat mit bestimmter, typischer Antenne die Störungen gemessen werden. Eine solche Messmethode liefert zwar reproduzierbare, aber nicht allgemein gültige Werte, da die Festlegung einer typischen Installations- und Antennenanlage wegen der ausserordentlich verschiedenen Verhältnisse in der Wirklichkeit absolut willkürlich ist.

[2]) K. Müller; Veröff. aus dem Gebiete der Nachrichtentechnik. 4. Bd. (1934), 2. Folge, S. 139.