

Erdung, Nullung und Schutzschaltung

nebst Erläuterungen zu den
Erdungsleitsätzen

Von

Dr.-Ing. Oskar Löbl

Mit 78 Textabbildungen



Berlin
Verlag von Julius Springer
1933

ISBN-13: 978-3-642-90053-2 e-ISBN-13: 978-3-642-91910-7
DOI: 10.1007/978-3-642-91910-7

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung
in fremde Sprachen, vorbehalten.
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1933

Vorwort.

Die Aufstellung der neuen, seit dem 1. Januar 1932 gültigen Erdungsleitsätze des Verbandes Deutscher Elektrotechniker — Leitsätze für Schutzmaßnahmen in Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen unter 1000 V, L.E.S. 1/1932 — hat sich über mehrere Jahre erstreckt. Dies lag nicht nur an den technischen Schwierigkeiten des zu behandelnden Stoffes, sondern es waren auch wirtschaftliche Bedenken zu berücksichtigen: das Erdreich leitet nämlich zu schlecht, als daß wirksame Erdungen im allgemeinen mit mäßigen Kosten herstellbar wären. (Doch leitet es nicht schlecht genug, um Fehlerströme von gefährlicher Höhe nach der Erde zu verhindern.)

Diese Schrift enthält nun in erweiterter Form den Inhalt eines Vortrages, den der Verfasser 1928 vor dem Elektrotechnischen Verein Berlin und dann noch in einigen anderen elektrotechnischen Gesellschaften gehalten hat. Sie gibt die Überlegungen wieder, die bei der Abfassung der neuen Erdungsleitsätze zugrunde gelegen haben. Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht der Begriff der Berührungsspannung, der übrigens anders definiert ist als in den Leitsätzen für Schutzerdungen in Hochspannungsanlagen, und ihre Gefährlichkeitsgrenze. Begriff und Grenze waren viel umstritten. Ohne beide ist aber eine rechnerische Durchdringung nicht möglich, und ohne eine zahlenmäßige Einsicht kann man sich auch in der Erdungsfrage keine Klarheit verschaffen.

Im ersten Teil des Buches werden die physiologischen und technischen Grundlagen auseinandergesetzt, die zum Verständnis der Schutzmaßnahmen erforderlich sind, die dann im zweiten Teil behandelt werden. Im dritten Teil sind die Erdungsleitsätze abgedruckt und erläutert. Text und Kommentar sind aber nicht, wie üblich, voneinander getrennt, sondern jedem Textabsatz folgt unmittelbar, nur durch Kursivdruck kenntlich gemacht, die Erläuterung. Wo schon ein kurzer Zusatz zur Klarstellung genügt, ist dieser gleich in den Text eingefügt, und zwar wieder in Kursivdruck. Einige Male sind ungeeignete Textworte einfach durchgestrichen, aber so, daß auch der Originaltext gelesen werden kann.

Vieles in dem Buch ist erstmalig dargestellt, der Verfasser hat es jedoch unterlassen, auf die betreffenden Stellen hinzuweisen.

Um den erforderlichen Umfang der Schutzmaßnahmen ist jahrelang gekämpft worden. Man hat sogar eingewendet, daß eine so universelle Energie, wie die Elektrizität, ohne Schutzmaßnahmen auskommen müsse. Noch universeller ist die Gravitation; soll man deswegen alle Brücken ohne Geländer bauen? Im Gegenteil: die Ausbreitung der Elektrizität in dem jetzt angestrebten Umfang ist nur berechtigt, wenn durch geeignete Schutzmaßnahmen eine Gefährdung möglichst ausgeschlossen wird.

Die Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik hat sich seit jeher für solche Schutzmaßnahmen eingesetzt, und dieses Buch wurde in ihrem Sinne geschrieben, um die Kenntnis und die Anwendung dieser Schutzmaßnahmen zu verbreiten.

Berlin, November 1932.

Oskar Löbl.

Inhaltsverzeichnis.

Erster Teil.

Allgemeine Grundlagen.

	Seite
I. Der Mensch im elektrischen Stromkreis	1
1. Wirkungen des elektrischen Stromes auf den Menschen	1
2. Welche Spannung ist gefährlich?	3
3. Der elektrische Widerstand des menschlichen Körpers	6
4. Statistisches über Unfälle durch Berührungsspannungen	7
II. Das Auftreten von Spannungen an metallenen Gehäusen von Stromverbrauchern.	7
5. Sternpunkt direkt geerdet	7
6. Außenleiter direkt geerdet	8
7. Betriebserdung über Durchschlagsicherung	8
III. Die Berührungsspannung.	11
8. Begriffserklärung	11
9. Berechnung der Berührungsspannung	13
10. Messung der Berührungsspannung	15
IV. Wann sind Schutzmaßnahmen erforderlich?	17
11. Entscheidung der Schutzbedürftigkeit durch Messung	17
12. Entscheidung der Schutzbedürftigkeit ohne Messung	17
13. Bemerkungen	20
V. Erdungsschrauben, Schutzleitungen, Steckvorrichtungen	21
14. Ortsfeste Stromverbraucher	21
15. Ortsveränderliche Stromverbraucher	22
VI. Abschaltzeit und Abschaltstromstärke von Sicherungen	25
16. Gewöhnliche Schmelzsicherungen	25
17. Träge Schmelzsicherungen	27
VII. Erder	27
18. Spezifischer Widerstand des Erdreichs	27
19. Erdungswiderstand einiger Erder. Exakte Formeln	28
20. Die gebräuchlichsten Erder. Praktische Formeln	29
21. Mehrfacherder	32
22. Messung des Erdungswiderstandes	33
23. Messung des spezifischen Widerstandes des Erdreichs	34
24. Veränderung des Erdungswiderstandes mit der Zeit	34
25. Spannungsverlauf um Platten- und Rohrerder	35
26. Grenze des Spannungstrichters	37
27. Schrittspannung	38
28. Spannungsverlauf um ausgedehnte Erder.	40
VIII. Der Erdschlußstrom des Hochspannungsnetzes	40
29. Der kapazitive Erdschlußstrom	40
30. Der Reststrom.	41
31. Bemessung der Schutzerdung in Hochspannungsanlagen	42

	Seite
IX. Betriebserdung	43
32. Stromsysteme	43
33. Zweck der Betriebserdung	43
34. Betriebserdung am Nullpunkt (Nullpunktserdung).	43
35. Betriebserdung am Außenleiter (Außenleitererdung)	44
36. Bemessung der Betriebserdung	44

Zweiter Teil.

Schutzmaßnahmen.

37. Benennungen	48
X. Isolierung.	49
38. Grundgedanke	49
XI. Kleinspannung	49
39. Grundgedanke	49
40. Bedingungen	49
41. Anwendungsgrenzen	50
42. Anwendungsgebiet	50
XII. Schutzerdung.	50
43. Grundgedanke	50
44. Bemessung der Schutzerdung in Netzen, in denen ein Außenleiter über eine Durchschlagssicherung geerdet ist	51
45. Bemessung der Schutzerdung bei unmittelbarer Nullpunktserdung	52
46. Bemessung der Schutzerdung bei unmittelbarer Außenleitererdung	54
47. Vergleich zwischen Haupt- und Nebenformel	56
48. Anwendungsgebiet der Schutzerdung.	57
49. Prüfung der Schutzerdung auf Vorschriftsmäßigkeit	58
50. Zusammenstellung	59
51. Beispiel.	59
XIII. Nullung.	62
52. Grundgedanke	62
53. Erdschluß. 1. Nullungsbedingung	62
54. Einpoliger Kurzschluß. 2. Nullungsbedingung	63
55. Unterbrechung des Nulleiters. 3. Nullungsbedingung	74
56. Zusammenstellung	78
57. Vorzüge und Nachteile der Nullung	78
58. Anwendungsgebiet der Nullung	79
59. Beispiel.	79
60. Erdung und Nullung schließen sich gegenseitig aus	82
61. Einhaltung der Nullungsbedingungen mit Stationsschutzschaltern .	83
XIV. Schutzschaltung	87
62. Grundgedanke	87
63. Spannungsdiagramm. Einfluß des Hilfserdungswiderstandes	88
64. Bemessung der Betriebserdung bei Schutzschaltung	89
65. Arten der Schutzschalter	91

Dritter Teil.

Die Erdungsleitsätze nebst Erläuterungen.

I. Gültigkeit	96
§ 1. Geltungsbeginn	96
§ 2. Geltungsbereich.	96

Inhaltsverzeichnis.

	VII Seite
II. Begriffserklärungen.	96
§ 3.	96
III. Bestimmungen	98
A. Allgemeines	98
§ 4. Anwendungsbereich der Schutzmaßnahmen	98
B. Isolierung	99
§ 5. Anwendung der Isolierung	99
C. Kleinspannung	100
§ 6. Anwendung der Kleinspannung	100
§ 7. Ausschließliche Verwendung der Kleinspannung.	100
D. Schutzerdung.	101
§ 8. Anwendung der Schutzerdung	101
§ 9. Bemessung der Schutzerdung	101
E. Nullung	102
§ 10. Anwendung der Nullung	102
§ 11. Nullungsbedingungen	102
§ 12. Erdung in Netzen mit Nullung	104
§ 13. Blanke Nulleiter.	105
§ 14. Nullung ortsveränderlicher Stromverbraucher	105
F. Schutzleitungssystem.	105
§ 15. Anwendung des Schutzleitungssystems	105
G. Schutzschaltung	106
§ 16. Anwendung der Schutzschaltung	106
H. Gemeinsames für Erdung, Nullung, Schutzleitungssystem und Schutz- schaltung	107
§ 17. Verhütung von Unterbrechungen der Schutzleitung	107
§ 18. Bemessung der Schutzleitung	107
I. Erdung eines Netzpunktes (Betriebserdung)	107
§ 19. Schutz bei Übertritt der Oberspannung	107
§ 20. Schutz bei Erdschluß auf der Unterspannungsseite	108
IV. Verlegung der Erder	109
V. Prüfung der Schutzmaßnahmen	110

Abkürzungen.

- V.E.S. 1 = Vorschriften nebst Ausführungsregeln für die Errichtung von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen unter 1000 V.
- V.E.S. 2 = Vorschriften nebst Ausführungsregeln für die Errichtung von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen von 1000 V und darüber.
- L.E.S. 1 = Leitsätze für Schutzmaßnahmen in Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen unter 1000 V.
- V.B.S. = Vorschriften nebst Ausführungsregeln für den Betrieb von Starkstromanlagen.
- K.P.I. = Vorschriften, Regeln und Normen für die Konstruktion und Prüfung von Installationsmaterial bis 750 V Nennspannung.
- R.E.S. = Regeln für die Konstruktion, Prüfung und Verwendung von Schaltgeräten bis 500 V Wechselspannung und 3000 V Gleichspannung.
- R.E.A. = Regeln für die Bewertung und Prüfung von Anlassern und Steuergeräten.
- V.E.Wz. = Vorschriften für Elektrowerkzeuge für Spannungen bis 250 V gegen Erde.
- R.E.T.K. = Regeln für die Konstruktion und Prüfung von Schutztransformatoren mit Kleinspannungen.

Erster Teil.

Allgemeine Grundlagen.

I. Der Mensch im elektrischen Stromkreis.

1. Wirkungen des elektrischen Stromes auf den Menschen. Der elektrische Strom kann auf zweierlei Weise für den Menschen gefährlich sein:

1. durch Verbrennung,
2. durch Einwirkung auf das Herz und die Atmungsorgane.

Die Verbrennung kann hervorgerufen sein

a) ohne daß dabei der Strom den menschlichen Körper durchfließt, z. B. durch einen Kurzschlußlichtbogen,

b) durch Stromwärme beim Durchfließen des Stromes durch den menschlichen Körper,

während die Einwirkung auf das Herz und die Atmungsorgane nur beim Stromdurchfluß zustande kommt. Bei den Verbrennungen handelt es sich meist um höhere Stromstärken; bei dem Einfluß auf das Herz und die Atmungsorgane können schon sehr niedrige Stromstärken den Tod herbeiführen. Es ist daher — gerade für Niederspannungsanlagen¹ — von Interesse, zu wissen, unter welchen Bedingungen ein Stromdurchfluß lebensgefährlich ist. Wir zählen die wichtigsten Faktoren auf:

1. die Stromstärke,
2. die Zeitdauer der Stromeinwirkung,
3. die Strombahn,
4. die Frequenz,
5. die individuelle Anlage.

Was den ersten Punkt — die Stromstärke — anlangt, so kann als sichergestellt gelten, daß eine Stromstärke von über

100 mA

¹ Wir benutzen noch das bequeme Wort „Niederspannung“: Niederspannungsnetze sind solche, bei denen kein Leiter eine höhere Spannung als 250 V gegen Erde bei Erdschluß eines anderen Außenleiters annehmen kann. In den neuen Errichtungsvorschriften wird die Bezeichnung Niederspannung nicht mehr gebraucht.

tödlich ist. In mehreren Todesfällen durch den elektrischen Strom konnte vom Verfasser nachträglich die Stromstärke nachgemessen und nachgerechnet werden¹. Es ergaben sich Ströme von wenig über 100 mA. Ströme über 50 mA hatten schon Bewußtlosigkeit zur Folge. Worin der Tod besteht, d. h. welches der Mechanismus des elektrischen Todes ist, darüber konnte bis jetzt noch keine völlige Klarheit geschaffen werden. Über diesen Punkt sind derzeit Forschungen im Gange, die auch die beste Methode der Wiederbelebung elektrisch Verunglückter ermitteln sollen.

Zweitens spielt die Zeitdauer der Stromeinwirkung eine wesentliche Rolle. Aus Tierversuchen schließt man, daß die genannte Stromstärke von 100 mA und darüber nur dann gefährlich ist, wenn der Strom mindestens

$\frac{1}{5}$ Sekunde

lang durch einen Menschen fließt². Aus diesem Grunde macht es auch einen großen Unterschied, ob ein Spannung führender Teil nur berührt oder ob er umfaßt wird. Im ersten Falle wird die berührende Hand infolge des elektrischen Schlages schnell wieder zurückgezogen werden, während im zweiten Falle ein Zurückziehen der Hand infolge des oft eintretenden Krampfes nicht mehr möglich ist.

Drittens ist es nicht gleichgültig, welchen Weg der Strom durch den Menschen nimmt. Gefährlich ist der Strom nur dann — von Verbrennungen abgesehen — wenn er das Herz durchströmt. Eine Berührung verschiedener Pole mit beiden Händen oder, wenn der Erdboden mit einem anderen Pol in Verbindung steht, mit Hand und Fuß ist daher erheblich gefährlicher als eine Berührung mit zwei Fingern derselben Hand (z. B. bei der jedoch nicht empfehlenswerten Prüfung auf Spannung mit zwei Fingern bei isolierendem Standpunkt).

Viertens die Frequenz. Es scheint, als ob gerade die üblichen Starkstromfrequenzen von 40 bis 60 Perioden je Sekunde am gefährlichsten sind. Gleichstrom (Frequenz Null) ist bei den gebräuchlichen Spannungen ungefährlicher und Hochfrequenz (z. B. Diathermiefrequenz von $\frac{1}{2}$ Million Perioden je Sekunde) ganz unschädlich.

Über den fünften Punkt, die individuelle Anlage, läßt sich derzeit noch nichts Genaues sagen. Es hat den Anschein, als ob manche Menschen gegenüber dem elektrischen Strom besonders empfindlich sind.

¹ Es handelte sich um Fälle kapazitiver Beeinflussung abgeschalteter Leitungen durch parallel laufende Hochspannungsleitungen. Hierbei spielt der nur unsicher bekannte Widerstand des menschlichen Körpers neben den endlichen Widerständen des elektrischen Stromkreises meist keine Rolle, so daß eine zuverlässige Rechnung und Messung der Stromstärke, die den Tod herbeigeführt hat, möglich ist.

² D. h. bei einem 50 periodigen Wechselstrom 10 Perioden lang.

2. Welche Spannung ist gefährlich? Da es bei der Beurteilung der Gefährlichkeit auf die Höhe der Stromstärke ankommt und der Widerstand des menschlichen Körpers von vielen Faktoren abhängt (siehe nächster Abschnitt), kann nicht von einer bestimmten Spannung gesprochen werden, die gefährlich ist.

Trotzdem ist es meist bequemer, nicht von einer gefährlichen Stromstärke, sondern von einer gefährlichen Spannung zu sprechen. Hierbei muß man dann eben im Interesse der Sicherheit mit ungünstigen Umständen rechnen. Da die Frage nach der Höhe der gefährlichen Spannung von großer Bedeutung und auch sehr umstritten ist, sei hier das Gutachten im Auszug abgedruckt, das Prof. Dr. H. F. Weber, damals Direktor des Physikalischen Instituts der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich, im Jahre 1897 für Brown, Boveri & Cie, Baden, über folgende Frage erstattet hat:

„Ist für die Kontaktleitung einer elektrischen Bahn die Verwendung einer Wechselstromspannung von mehr als 500 V in Rücksicht auf die Sicherheit der zu befördernden Personen zulässig?“

Das Gutachten lautet:

... Die Frage ist beantwortet, sobald auf die Vorfrage: „Welche Höhe muß eine Wechselstromspannung erreichen, damit sie als für den Menschen gefährlich betrachtet werden darf?“ die Antwort gegeben worden ist.

Da meines Wissens bisher keine planmäßigen Versuche zur Beantwortung dieser letzteren Frage gemacht worden sind, habe ich Ihre Fragestellung zur Veranlassung genommen, solche Versuche an meiner eigenen Person anzustellen.

Diese Versuche zerfielen in zwei Versuchsgruppen . . .

Zur Durchführung der ersten Versuchsgruppe wurde ein Wechselstrom von 50 Perioden (eine Periodenzahl, die gewöhnlich bei Drehströmen benutzt wird) durch 630 Windungen eines gleichmäßig bewickelten Eisenringes hindurchgeleitet, welcher zwischen der ersten und letzten Windung eine effektive Spannung von 210 V auftreten ließ. Je eine Stelle der 1., der 30., der 60. . . , der 630. Windung war mit einem 10 cm langen und 6 mm dicken, blanken Kupferdraht verbunden — diese Drähte mögen die Drähte 0, 1, 2 . . . 21 heißen — so daß zwischen dem Drahte 0 und dem Drahte 1 die Spannung von 10 V, zwischen dem Drahte 0 und dem Drahte 2 die Spannung 20 V, zwischen dem Drahte 0 und dem Drahte 3 die Spannung 30 V usw. bestand.

Der Beobachter ließ nun diese verschiedenen Spannungsdifferenzen auf seinen Körper wirken, indem er mit der einen Hand den Draht 0, mit der anderen Hand den Draht 1 oder 2 oder 3 usw. seiner ganzen Länge nach fest umfaßte.

Diese Versuche wurden an drei verschiedenen Tagen mit genau gleichen Resultaten durchgeführt. Wie von vornherein zu erwarten war, fielen die physiologischen Wirkungen derselben Spannungen ganz verschieden aus, je nachdem die anfassenden Hände feucht oder trocken waren.

Als die anfassenden Hände feucht waren, ergab sich:

Spannungsdifferenz ist 10 V.

Sehr geringe Muskellerschütterungen in den Fingern. Der durch den Körper von Hand zu Hand fließende Strom ist kleiner als 0,001 A.

Spannungsdifferenz ist 20 V.

Sehr starke Muskel- und Nervenerschütterung in Fingern, Hand und Handgelenk bis in den Unterarm hinein. Stärkste Wirkung im Handgelenk. Hände und Arme sind noch frei beweglich. Die angefaßten Drähte können leicht losgelassen werden. Der durch den Körper fließende Strom schwankt zwischen 0,0020 und 0,0024 A.

Spannungsdifferenz ist 30 V.

Finger, Hand, Handgelenk, Unter- und Oberarm wie gelähmt, die Finger können kaum gerührt, die Hand kaum gedreht werden. Der gestreckte Arm kann nicht mehr gebogen, der gebogene Arm nicht mehr gestreckt werden. Sehr lebhaftes Schmerzen in Fingern, Händen und Armen. Der Zustand ist nur 5 bis 10 Sekunden aushaltbar. Die Drähte können, wenn Willenskraft aufgeboten wird, noch losgelassen werden. Der durch den Körper fließende Strom ist 0,012 bis 0,015 A.

Spannungsdifferenz ist 40 V.

Beim Umfassen der Drähte werden die Finger, Hände und Arme sofort vollständig temporär gelähmt. Es stellt sich ein kaum zu ertragender Schmerz ein. Die Drähte konnten fast in allen Fällen nicht mehr losgelassen werden. Über 5 Sekunden hinaus waren die Schmerzen nicht zu ertragen. Der den Körper durchfließende Strom betrug 0,019 bis 0,022 A.

Spannungsdifferenz ist 50 V.

Im Momente des Anfassens der beiden Drähte waren alle Muskeln in den Fingern, Händen und Armen sofort temporär gelähmt. Die Drähte konnten in keinem Falle trotz größter Willensenergie mehr losgelassen werden. Die Schmerzen waren so groß, daß der Zustand nur 1 bis 2 Sekunden ausgehalten werden konnte; wegen dieses Umstandes war eine Messung der Stromstärke unmöglich.

Diese bei 50 V gesammelten Erfahrungen ließen es den Beobachter ratsam erscheinen, keine höhere Spannung mit befeuchteten Händen zu versuchen. Es genügte ihm die Tatsache, daß ein Loslassen der mit feuchten Händen umfaßten Leitungen schon bei 50 V Spannungsdifferenz unmöglich ist. Mit diesem Phänomen tritt aber die Gefährlichkeit der Wechselstromspannungen auf.

Als diese Versuchsgruppe mit trockenen Händen durchgeführt wurde, zeigte sich:

Spannungsdifferenz ist 10, 20, 30 V.

Es sind keine oder nur äußerst schwache physiologische Wirkungen merkbar.

Spannungsdifferenz ist 40 V.

Nur in den Fingern ist leises Surren merkbar. Der Strom ist für die Messung zu schwach.

Spannungsdifferenz ist 50 V.

Leichte Erschütterungen der Muskeln in den Fingern und den Händen. Der Strom ist schwächer als 0,0001 A.

Spannungsdifferenz ist 60 V.

Lebhaftes Erschütterungen in den Fingern, den Händen und den Unterarmen, aber alle diese Organe sind noch leicht beweglich. Der den Körper durchfließende Strom beträgt ca. 0,0008 A.

Spannungsdifferenz ist 70 V.

Starke Erregung der Muskel der Finger, der Hände und der Arme bis über die Ellenbogen hinaus. Diese Organe sind jetzt nur noch wenig beweglich. Die Stromstärke beträgt 0,0018 A.

Spannungsdifferenz ist 80 V.

Viel stärkere Wirkungen als bei 70 V. Finger, Hände, Arme sind fast ganz steif. Lebhafter Schmerz in allen diesen Teilen. Die Drähte können nur mit Anstrengung losgelassen werden. Der Strom betrug 0,009 bis 0,011 A.

Spannungsdifferenz ist 90 V.

Im Momente, wo die Drähte gefaßt werden, sind die Hände vollständig temporär gelähmt. Das Loslassen der Drähte ist unmöglich. Der Schmerz in Händen und Armen ist so groß, daß der Beobachter unwillkürlich laut aufschreit. Länger als 1 bis 2 Sekunden war der Zustand nicht auszuhalten.

Als auf 80 V zurückgegangen wurde, erschienen dem Experimentator die Wirkungen gegenüber den Wirkungen von 90 V außerordentlich geringfügig; so groß ist der Unterschied der Wirkungen dieser zwei Spannungen!

Diese enorme Steigerung der Wirkungen beim Übergang von 80 V zu 90 V hielt den Experimentator davon ab, auch die Wirkung der Spannung von 100 V zu versuchen. Er glaubt nach seinen Erlebnissen sagen zu müssen:

„Das Anfassen zweier Wechselstromleitungen mit beiden Händen von trockener Beschaffenheit bringt Gefahren mit sich, sobald die Spannungsdifferenz zwischen diesen Leitungen 100 V übersteigt.“

Mit diesen Versuchsergebnissen harmonieren die Tatsachen, welche die letzten Jahre über die tödliche Wirkung des Anfassens zweier Wechselstromleitungen von geringer Spannungsdifferenz mit beiden Händen geliefert haben.

Dieses Gutachten ist in nachstehender Zahlentafel I ausgewertet.

Zahlentafel I.

I. Feuchte Hände			II. Trockene Hände		
Spannung	Strom	Wid.	Spannung	Strom	Wid.
V	mA	Ω	V	mA	Ω
10	1,0	10000	50	0,1	500000
20	2,2	9100	60	0,8	750000
30	13,5	2200	70	1,8	390000
40	20,5	1950	80	10	8000
50	unerträglich		90	unerträglich	

In der Abb. 1 sind Strom und Spannung aus der Zahlentafel eingetragen. Man erkennt durch Extrapolation, daß sowohl bei trockener als auch feuchter Haut ein Strom von

30 mA

unerträglich ist, welche Angabesich gut an die als gefährlich bezeichnete Grenze von 50 mA anschließt.

Aus dem Gutachten folgt ferner, daß — bei feuchter Haut — eine Spannung von 50 V schon unerträglich ist. Wenn diese Spannung unter normalen Umständen auch nicht tödlich sein wird, so müssen solche so unangenehmen Elektrisierungen auch im Interesse der Werbung

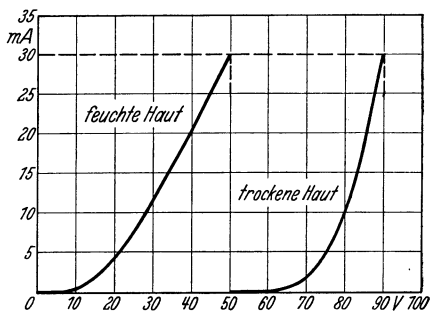


Abb. 1. Auswertung der Weberschen Versuche.

für die Verwendung der Elektrizität vermieden werden. Wir wollen daher als äußerste Grenze der zulässigen „Berührungsspannung“ (Begriffserklärung siehe Abschnitt 8) eine Spannung von

65 V

ohne Toleranz festsetzen¹.

Gewisse Tierarten, z. B. Hunde, sind auf Stromeinwirkungen empfindlicher als die Menschen. Tiere sind ferner bei Schrittspannungen (siehe Abschnitt 27) mehr gefährdet, da der Strom fast immer über das Herz verläuft und bei größeren Tieren, wie Pferden und Rindern, auch die Schrittweite größer ist. Für Tiere nimmt man als zulässige Spannungsgrenze 24 V.

3. Der elektrische Widerstand des menschlichen Körpers. Dieser Widerstand hängt von folgenden Faktoren ab²:

1. Größe der Berührungsfläche,
2. Feuchtigkeit der Haut,
3. Dauer der Stromeinwirkung.
4. Stromstärke,

Wir besprechen diese Einflüsse der Reihe nach.

Erstens. Da der Widerstand im wesentlichen in der Haut liegt, ist der Einfluß der Größe der Berührungsfläche (und auch der Feuchtigkeit der Haut) erklärlich. So ist es ein großer Unterschied, ob ein spannungsführender Leiter nur mit den Fingerspitzen angetippt oder umfaßt wird.

Zweitens. Den großen Einfluß der Feuchtigkeit auf den Widerstand erkennt man aus den oben abgedruckten Versuchen von Weber (Zahlentafel 1).

Drittens. Mit der Dauer der Stromeinwirkung sinkt der Widerstand, vermutlich durch die Erwärmung.

Viertens. Der Widerstand nimmt mit der Höhe der Stromstärke ab, wie auch aus dem Versuchsbericht von Weber hervorgeht (siehe Zahlentafel 1). Hiernach beträgt der Widerstand des Menschen bei feuchter Haut und bei 30 mA etwa 1670 Ω , bei trockener Haut etwa 3000 Ω . Bei 50 bis 100 mA und Berührung mit feuchter Haut kann der Widerstand mit etwa

1300 Ω

angenommen werden.

¹ Vgl. besonders die neueren Untersuchungen: „Beitrag zur Kenntnis der Vorgänge beim Stromdurchgang durch den menschlichen Körper“; mitgeteilt von den Elektrizitätswerken des Kantons Zürich. Bull. schweiz. elektrotechn. Ver. 1929 Heft 13.

² Vgl. besonders die Arbeiten von Gildemeister. Weitere Forschungen von dritter Seite sind im Gange.

Bei größeren Stromstärken, wie sie bei Hochspannungen vorkommen, sinkt der Widerstand des menschlichen Körpers noch weiter herab. Untersuchungen, die von der Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik vorgenommen worden sind, haben ergeben, daß bei Stromstärken über 1 A der Widerstand bis

$$500 \Omega$$

und darunter sinken kann. Auch Erfahrungen an elektrischen Unfällen und dergleichen führen etwa auf diesen Wert¹.

4. Statistisches über Unfälle durch Berührungsspannung. Aus der Statistik des Starkstrom-Inspektorats der Schweiz geht hervor, daß in der Schweiz im Mittel der letzten 10 Jahre jährlich

4 tödliche Unfälle

durch Berührungsspannung vorgekommen sind.

Aus den Unfallakten der deutschen gewerblichen Berufsgenossenschaften folgt, daß im Jahre 1927 insgesamt 99 Unfälle durch Berührungsspannung gemeldet wurden. Davon waren

17 Unfälle tödlich,
82 ohne tödlichen Ausgang.

Von den genannten 82 Unfällen nahm die Heilung bei 12 Unfällen länger als 12 Wochen in Anspruch, bei den restlichen 70 Unfällen weniger als 12 Wochen. Es sei noch einmal betont, daß hier nur die Unfälle durch Berührungsspannung aufgezählt sind und nicht die Unfälle durch direkte Berührung spannungsführender Leitungen. Diese Statistik umfaßt nur die Unfälle in gewerblichen Betrieben, die Unfälle in landwirtschaftlichen Betrieben und in Privathaushalten sind nicht mit eingeschlossen.

II. Das Auftreten von Spannungen an metallenen Gehäusen von Stromverbrauchern.

Wir unterscheiden je nach dem Anschluß der Betriebserdung² drei Gruppen von Niederspannungsnetzen:

- a) Sternpunkt direkt geerdet,
- b) Außenleiter direkt geerdet,
- c) Sternpunkt oder Außenleiter über Durchschlagsicherung geerdet.

5. Sternpunkt direkt geerdet. In Abb. 2 ist ein Niederspannungsnetz von 380/220 V gezeichnet, dessen Sternpunkt direkt geerdet ist. Ein angeschlossener Motor habe einen Isolationsfehler, indem eine

¹ Vgl. K. Alvensleben: Elektrotechn. Z. 1926 S. 985.

² Vgl. Abschnitt 34 und 35.

Wicklungsphase nahe an der Klemme einen Körperschluß hat. Dann besteht zwischen dem Motorgehäuse und „Erde“ eine Spannung von 220 V, wie man durch Betrachtung des stark ausgezogenen Stromkreises erkennt. Der durch den Spannungsmesser fließende Strom

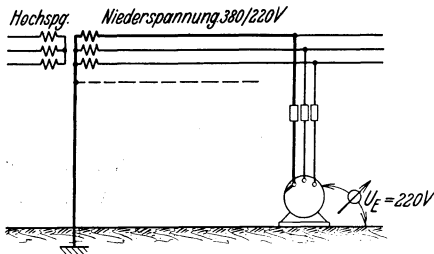


Abb. 2. Gefährliche Spannung durch Körperschluß eines elektrischen Gerätes. Erdstrom schließt sich über die Betriebserdung zurück.

schließt sich durch die Erde zum Sternpunkt des Transformators zurück. Die „Spannung gegen Erde“ ist also im vorliegenden Falle gleich der vollen sekundären Phasenspannung (Sternspannung) des Transformators.

6. Außenleiter direkt geerdet.

Ist ein Außenleiter direkt geerdet (was selten vorkommt), so

kann an einem Stromverbraucher, der einen Isolationsfehler hat, eine Spannung gegen Erde bis zur Größe der verketteten Spannung auftreten.

7. Betriebserdung über Durchschlagsicherung. In diesem Falle ist, solange die Durchschlagsicherung intakt ist, bei einem Körperschluß keine Spannung gegen Erde vorhanden¹ (kein Voltmeterausschlag). Dabei ist aber vorausgesetzt, daß keine Isolationsfehler im Netz vorhanden sind.

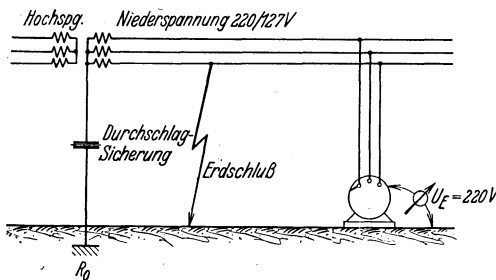


Abb. 3. Gefährliche Spannung durch Körperschluß eines elektrischen Gerätes. Erdstrom schließt sich über die Erdschlußstelle eines Außenleiters zurück.

handen sind.

Mit der Möglichkeit solcher Fehler muß aber gerechnet werden, und der ungünstigste Fall ist der, daß ein Außenleiter einen vollen Erdschluß bekommt, zum Beispiel infolge Schluß mit dem Kabelmantel.

Dann haben wir das Bild, wie es in Abb. 3 dargestellt ist. Jetzt besteht zwischen

Motorgehäuse und Erde die volle verkettete Spannung von 220 V (während im Fall einer direkten Sternpunktserdung nur die Phasenspannung, also $220/\sqrt{3} = 127$ V aufgetreten wäre).

¹ Früher wurde deshalb vielfach der Standpunkt vertreten, daß solche „reinen Netze“ ungefährlicher wären. Aber die Durchschlagsicherungen sind gewöhnlich durchgeschlagen und nicht erneuert. Auch müßten die Netze auf ihren Isolationszustand überwacht werden; denn in Wirklichkeit liegt in solchen Netzen einmal der eine Außenleiter, und dann wieder ein anderer mehr oder weniger gut an Erde, ohne daß diese Erdschlüsse irgendwie in Erscheinung treten. Eine direkte Betriebserdung bereinigt leichter diese Isolationsfehler.

Schon die kleinen Isolationsströme, die noch nicht als Isolationsfehler angesprochen werden können, sind imstande, Spannungen gegen Erde an einem Stromverbraucher mit Körperschluß hervorzurufen. Diese Ströme wirken wie ein unvollkommener Erdschluß. Nach den V.E.S. 1 § 5 braucht der Isolationszustand eines Stromkreises (d. h. hinter einer Stromkreissicherung einer Anlage) nicht besser zu sein als

1000 Ohm je Volt Betriebsspannung,

also in einer 220 V-Anlage nicht besser als $220\,000\ \Omega$ zwischen einem Leiter und Erde.

Sind etwa in einem Ortsnetz 100 solcher „Stromkreise“ vorhanden, die alle diesen noch zulässigen Isolationswiderstand haben sollen, so ist der gesamte Isolationswiderstand jedes Leiters gegen Erde wegen der Parallelschaltung nur

$$R = \frac{220\,000}{100} = 2\,200\ \Omega.$$

Bei diesem Isolationszustand wollen wir (Abb. 4*) die Spannung des Motorgehäuses gegen Erde, d. h. also den Ausschlag U_E des Spannungsmessers errechnen.

Der innere Widerstand dieses Spannungsmessers sei R_i . Während es für sonstige Spannungsmessungen meist wenig darauf ankommt, welchen inneren Widerstand ein Spannungsmesser hat, spielt dieser Widerstand in unserem Falle eine wesentliche Rolle, da er die zu messende Spannung selbst sehr beeinflusst. Da nun der Widerstand des menschlichen Körpers für die vorliegenden Verhältnisse etwa $1\,300\ \Omega$ beträgt, müssen wir einen Spannungsmesser mit einem inneren Widerstand von

$$R_i = 1\,300\ \Omega$$

verwenden. Das Meßinstrument vertritt nämlich bei der Messung den eingeschalteten menschlichen Körper¹.

Die drei Isolationsströme seien I_1, I_2 und I_3 , die drei EMKe in den Sekundärwicklungen des Transformators E_1, E_2 und E_3 .

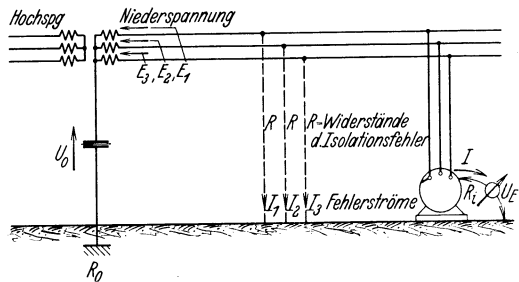


Abb. 4. Gefährliche Spannung durch Körperschluß eines elektrischen Gerätes. Erdstrom schließt sich über die Isolationsfehler der Außenleiter zurück.

* Der Zählpfeil von U_0 ist in der Abbildung verkehrt eingezeichnet.

¹ Steht bei einer Messung kein Instrument mit diesem Widerstand zur Verfügung, so beachte man die Ausführungen auf S. 16.

Infolge der „unsymmetrischen Belastung“ durch den „Erdschluß“ über das Instrument hat der sekundäre Sternpunkt des Transformators nicht mehr die Spannung Null gegen Erde, sondern die noch unbekannt Spannung U_0 . Die eingezeichneten Zählpfeile stellen die positiv gerechnete Richtung der Ströme und Spannungen dar. Dann ist, wenn wir die induktiven Spannungsabfälle vernachlässigen¹:

$$I_1 = \frac{U_0 - E_1}{R},$$

$$I_2 = \frac{U_0 - E_2}{R},$$

$$I_3 = \frac{U_0 - E_3}{R},$$

$$I = \frac{U_0 - E_1}{R_i}.$$

Nun ist die Summe aller Erdströme Null, d. h. $I + I_1 + I_2 + I_3 = 0$, also

$$\frac{U_0 - E_1}{R} + \frac{U_0 - E_2}{R} + \frac{U_0 - E_3}{R} + \frac{U_0 - E_1}{R_i} = 0$$

oder

$$\frac{3U_0}{R} + \frac{U_0}{R_i} = \frac{E_1 + E_2 + E_3}{R} + \frac{E_1}{R_i}.$$

Die drei EMKe geben, da sie gleich groß und um 120° gegeneinander versetzt sind, zusammen den Wert Null. Man erhält also für die Nullpunktsspannung die Beziehung

$$U_0 \left(\frac{3}{R} + \frac{1}{R_i} \right) = \frac{E_1}{R_i},$$

sie selbst ist

$$U_0 = \frac{E_1}{1 + 3 \frac{R_i}{R}},$$

und die Spannung des Gehäuses gegen Erde ist

$$U_E = U_0 - E_1 = -E_1 \cdot \frac{R_i}{R_i + \frac{R}{3}}.$$

Mit den Werten $R_i = 1300 \Omega$ und $R = 2200 \Omega$ wird

$$U_0 = \frac{127}{1 + 3 \cdot \frac{1300}{2200}} = 45,8 \text{ V}$$

und

$$U_E = -127 \cdot \frac{1300}{1300 + \frac{2200}{3}} = -81,2 \text{ V}.$$

¹ Die Gleichungen sind vektoriell zu verstehen.

Wir sehen also, daß die kleinen unvermeidlichen Isolationsströme — ohne Bestehen eines eigentlichen Erdschlusses — genügen, daß bei Vorhandensein eines Körperschlusses das Motorgehäuse eine Spannung gegen Erde erhält: in unserem Falle 81,2 V. In vielen Fällen läßt sich nicht einmal der Isolationszustand von 1000 Ω je Volt aufrecht erhalten. So wird z. B. für Brauereien und dergleichen von den V.E.S. I § 5 ein schlechterer Isolationszustand als 1000 Ω je Volt zugelassen. In einem solchen Fall ist natürlich die Spannung des vorhin betrachteten Motorgehäuses gegen Erde (bei Körperschluß) noch größer.

Im allgemeinen werden die drei Isolationswiderstände nicht gleich sein. Dann ist die Spannung des Motorgehäuses gegen Erde verschieden, je nach dem Außenleiter, der Körperschluß hat. So wurden in einem städtischen Drehstromnetz von 3×220 V ohne Nulleiter und ohne geerdeten Netzpunkt die Spannungen zwischen den drei Phasen und der Erde gemessen. Als Erde wurde die Wasserleitung benutzt und der Spannungsmesser hatte einen inneren Widerstand von 6000 Ω (300 V-Klemme). Es ergaben sich folgende drei Spannungen:

Zwischen	Phase	<i>R</i>	und Erde	. . .	176 V
„	„	<i>S</i>	„	„	. . . 130 V
„	„	<i>T</i>	„	„	. . . 100 V

Bei Verwendung eines Spannungsmessers mit einem Widerstand von 1300 Ω hätten sich kleinere Werte ergeben.

Wir fassen das Ergebnis unserer Untersuchung zusammen:

Mit dem Auftreten von Spannungen gegen Erde an metallenen Geräten usw. muß man stets rechnen, gleichgültig ob ein Punkt des Netzes (Sternpunkt oder ein Außenleiter) direkt geerdet ist oder nicht.

III. Die Berührungsspannung.

8. Begriffserklärung. Wir erläutern nun einen Begriff, der von grundlegender Bedeutung für die hier behandelten Fragen ist: die Berührungsspannung. Zu diesem Zweck betrachten wir nochmals die Abb. 2. Wir hatten gezeigt, daß bei Körperschluß am Eingang einer Phase eine Spannung von 220 V gegen „Erde“ entsteht. Wir wollen jetzt überlegen, welcher Anteil dieser Spannung auf einen Menschen entfällt, der auf der „Erde“ steht und das Motorgehäuse berührt. Offensichtlich nicht die volle Spannung gegen Erde, da es sehr darauf ankommt, wie gut der Standort isoliert. D. h. es kommt auf den Übergangswiderstand des Menschen zur Erde an. Wir zeichnen die in Betracht kommenden Linien der Abb. 2 noch einmal in Abb. 5 heraus und ersetzen das Voltmeter durch einen Menschen. Es kommt ein Strom zustande, der von der Phasenspannung 220 V getrieben wird und dem sich die folgenden Widerstände entgegensetzen:

- Widerstand des Außenleiters r ,
- Widerstand des menschlichen Körpers r_m ,
- Übergangswiderstand des Menschen zur Erde R ,
- Erdungswiderstand des Sternpunktes R_0 .

Hierbei ist vom induktiven Widerstand vorerst abgesehen. In Abb. 6 sind die Widerstände noch einmal schematisch dargestellt. Die Phasen-

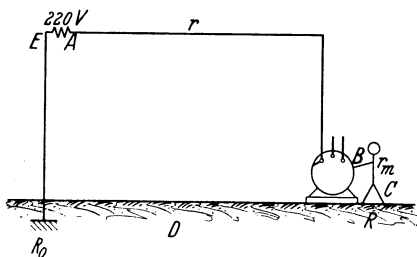


Abb. 5. Zur Erklärung der Berührungsspannung.

spannung verteilt sich auf die in Reihe liegenden Widerstände im Verhältnis von deren Größe. Den Anteil der Gesamtspannung, der auf den Menschen allein (ohne dessen Übergangswiderstand R) entfällt, wollen wir seine

Berührungsspannung

nennen. Diese ist also gleich der Spannung zwischen den Punkten B

und C der Abb. 5 bzw. 6. Die mehrfach erwähnte Spannung U_B des Motorgehäuses gegen „Erde“ ist die Spannung von B bis D . Die Berührungsspannung ist stets kleiner als die Spannung gegen Erde, oft nur ein Bruchteil davon, und sinkt bei vollkommener Isolierung

($R = \infty$) auf den Wert Null.

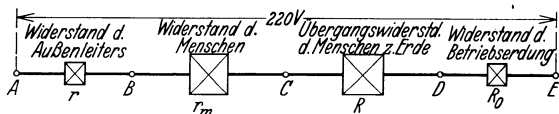


Abb. 6. Schematisierung der Abb. 5.

Wegen der Wichtigkeit dieses Begriffes wollen wir ein einfaches Zahlenbeispiel

anführen. Der Widerstand des Außenleiters bis zum Motor sei $r = 1 \Omega$; der Widerstand des Menschen $r_m = 1300 \Omega$ (vgl. Abschnitt 3), der Übergangswiderstand des Menschen zur Erde $R = 890 \Omega$ und der Widerstand der Betriebserdung $R_0 = 9 \Omega$. Die Summe aller Widerstände ist

$$1 + 1300 + 890 + 9 = 2200 \Omega .$$

Es wird also ein Strom fließen von

$$\frac{220 \text{ V}}{2200 \Omega} = 0,1 \text{ A} .$$

Durch Multiplikation mit den Widerständen ergeben sich die einzelnen Spannungen:

der (Ohmsche) Spannungsabfall im Außenleiter	$0,1 \cdot 1 =$	$0,1 \text{ V}$
die Berührungsspannung	$0,1 \cdot 1300$	$= 130 \text{ V}$
die Spannung zwischen Fußsohle und Erde	$0,1 \cdot 890$	$= 89 \text{ V}$
die Spannung zwischen Erde und Sternpunkt	$0,1 \cdot 9$	$= 0,9 \text{ V}$
<hr style="width: 100%;"/>		Summe 220 V

Die Berührungsspannung ist also, kurz gesagt, der Spannungsabfall im Menschen, hier die Spannung zwischen Hand und Fuß¹.

Die so definierte Berührungsspannung berücksichtigt (und das ist der Zweck dieser Definition) die Isolierung des Menschen von der Erde; die Berührungsspannung wird bei gleichbleibender Spannung gegen Erde um so kleiner je größer der Übergangswiderstand des Menschen zur Erde ist.

Für die Gefährdung eines Menschen ist die Berührungsspannung maßgebend und nicht die Spannung gegen Erde. Die Berührungsspannung bestimmt den Strom, der den Menschen durchfließt. Nur wenn der Übergangswiderstand des Menschen zur Erde relativ klein gegenüber dem Körperwiderstand des Menschen ist, genügt es, die Spannung gegen Erde statt der Berührungsspannung anzugeben, da diese beiden sich dann zahlenmäßig wenig unterscheiden.

9. Berechnung der Berührungsspannung. Wir sind jetzt in der Lage festzustellen, von welchen Faktoren die Größe der Berührungsspannung abhängt. Bezeichnen wir die Spannung gegen Erde wieder mit U_E , so ist die Berührungsspannung

$$U_B = \frac{U_E}{1 + \frac{R}{r_m}}.$$

Hierin ist U_E bei direkter Sternpunktserdung mindestens² gleich der Phasenspannung (in einem 380/220 V-Netz also mindestens 220 V) und bei direkter Erdung eines Außenleiters oder Erdung über eine Durchschlagsicherung die verkettete Spannung, wenn r und R_0 gegenüber R und r_m vernachlässigt wird.

Wir benötigen nun noch die Kenntnis des Übergangswiderstandes R des Menschen zur Erde. Eine auf der Erdoberfläche liegende Kreisplatte vom Durchmesser d hat einen Übergangswiderstand (vgl. Abschnitt 19)

$$R = \frac{\rho}{2d},$$

worin ρ der spezifische Widerstand des Erdbodens ist. Die Fläche der Sohle eines menschlichen Fußes ist etwa 200 cm², also ist der äquivalente Durchmesser einer Sohle $d_1 = 16$ cm und der äquivalente Durchmesser beider Sohlen, wenn die Füße eng nebeneinander stehen,

¹ Natürlich sind gefährliche Spannungen auch zwischen Hand und Hand möglich, sogar in ganz trockenen Räumen. So hatte in einem Falle eine Stehlampe in Phase R und ein Staubsauger, der zum Abstauben des Seidenschirmes der Stehlampe benutzt wurde, in Phase S Körperschluß. Durch gleichzeitige Berührung der metallenen Stehlampe und des Staubsaugers erhielt der Bedienende eine Spannung von 380 V, die schwere Brandwunden zur Folge hatte. Der Widerstand gegen Erde spielt hier keine Rolle.

² Bei Erdschluß eines Außenleiters steigt U_E über die Phasenspannung. Vgl. Abschnitt 45, letzter Absatz, und § 4 der L.E.S. 1.

$d_2 = 22,6$ cm. Steht also ein Mensch mit gespreizten Beinen¹, so ist sein Übergangswiderstand²

$$R = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{2 d_1} = \frac{\rho}{0,64} = 1,56 \rho,$$

falls wir ρ in Ohm-Meter einsetzen. Stehen dagegen beide FüÙe eng nebeneinander, so ist

$$R = \frac{\rho}{2 d_2} = \frac{\rho}{0,45} = 2,22 \rho.$$

Der erste Fall liefert den ungünstigeren Wert; wir setzen im Mittel unter Bevorzugung des ungünstigeren Wertes rund

$$R = 1,7 \rho. \quad (1)$$

Mit $r_m = 1300 \Omega$ folgt dann für die Berührungsspannung der Wert

$$U_B = \frac{U_E}{1 + \frac{1,7 \rho}{1300}} = \frac{765 \cdot U_E}{765 + \rho}. \quad (2)$$

Hierin muß, um es nochmals zu erwähnen, ρ in Ω m eingesetzt werden, also nicht wie üblich in Ω cm.

Die Berührungsspannung ist also um so größer, je größer die Spannung gegen Erde und je kleiner der spezifische Widerstand des Erdbodens ist.

Bei der Beurteilung der Gefährlichkeit eines Raumes hinsichtlich Berührungsspannung empfiehlt sich daher eine Klassifikation des Raumes und eine Unterscheidung nach der Höhe der Spannung gegen E:de.

Verringern wir in einem bestimmten Falle allmählich den spezifischen Widerstand ρ des Fußbodens, so wächst die Berührungsspannung immer mehr an. Bei dem kritischen Wert ρ_{krit} erreicht die Berührungsspannung die zulässige Grenze 65 V. Durch Auflösung der Gl. (2) findet man

$$\rho = 765 \left(\frac{U_E}{U_B} - 1 \right),$$

also

$$\rho_{krit} = 765 \left(\frac{U_E}{65} - 1 \right). \quad (3)$$

Zahlentafel 2 gibt den kritischen spezifischen Widerstand für die üblichen Netze.

Der spezifische Widerstand von Ackerboden ist etwa 100 Ω m, von feuchtem Sandboden 500 Ω m und von feuchten Steinfliesen 700 Ω m.

¹ Die beiden Übergangswiderstände stören sich nicht gegenseitig.

² Wir rechnen die Hauptabmessung der Erder in Metern und den spezifischen Widerstand in Ohm-Meter.

Diese Werte liegen unter dem kritischen, teilweise sogar beträchtlich, so daß hier Schutzmaßnahmen stets erforderlich werden.

Zahlentafel 2.

Netz V	Betriebserdung	U_E V	Q_{krit} Ωm
220/127	} direkte Sternpunktserdung	127	730
380/220		220	1820
3 × 110	} direkte Außenleitererdung oder Erdung über Durchschlagsicherung	110	530
3 × 220		220	1820

10. Messung der Berührungsspannung. Die Definition der Berührungsspannung gibt sofort ein Verfahren an die Hand, um die Größe der bei einem Körperschluß auftretenden Berührungsspannung zu messen. Auf den Fußboden in der Nähe des Stromverbrauchers wird eine Blechplatte gelegt (Abb. 7) von den Abmessungen

$$26 \times 26 = 680 \text{ cm}^2.$$

Der Erdübergangswiderstand einer solchen Platte ist, da ihr äquivalenter Durchmesser 29,4 cm ist,

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot 0,294} = 1,7 \rho,$$

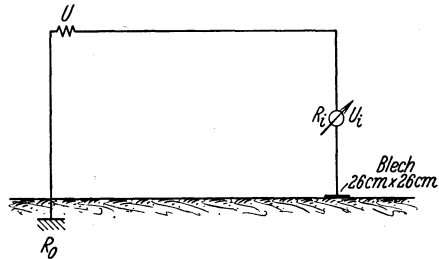


Abb. 7. Messung von Berührungsspannungen.

ist also gemäß Gl. (1) gleich dem Erdübergangswiderstand eines Menschen.

Zwischen einem Außenleiter (Steckdose!) und der Platte wird mit einem Spannungsmesser, dessen innerer Widerstand zweckmäßig 1300 Ω beträgt, die Spannung gemessen. Wir haben dann dieselben elektrischen Verhältnisse, wie wenn der Außenleiter über die Fehlerstelle berührt wird. Der Spannungsmesser befindet sich an Stelle des Menschen; deswegen muß der Widerstand des Instruments etwa 1300 Ω betragen, oder es muß die Spannungsangabe auf diesen Wert umgerechnet werden. Das Blech vermittelt den Übertritt des Stromes zur Erde und hat, wie wir gesehen haben, einen gleich großen Übergangswiderstand zur Erde wie der Mensch.

Für eine gute Auflage des Bleches muß gesorgt werden. Dies geschieht am einfachsten dadurch, daß sich jemand während der Messung auf das Blech stellt. Auch muß, falls es sich um einen Raum handelt, dessen Fußboden feucht sein (z. B. Badezimmer) oder mit nassem Schuhwerk betreten werden kann, der Fußboden unter dem Blech durch Übergießen von etwas Wasser ($\frac{1}{4}$ Wasserglas) angefeuchtet werden.

Die Voltmeter haben bei dem hier in Betracht kommenden Meßbereich gewöhnlich einen größeren Widerstand als 1300 Ω . Man muß

dann die Spannungsangabe des Instrumentes auf den richtigen Wert umrechnen¹. Die Spannung gegen Erde sei U_E . Der tatsächliche Widerstand des verwendeten Voltmeters sei R_i . Aus der Spannungsangabe U_i (Abb. 7) errechnet sich zunächst der Übergangswiderstand R des Bleches zur Erde:

$$\begin{aligned} U_E &= I(R_i + R), \\ I R_i &= U_i, \end{aligned}$$

also

$$R = \left(\frac{U_E}{U_i} - 1 \right) R_i. \quad (4)$$

Vernachlässigt man wieder den Widerstand des Außenleiters und der Betriebserdung sowie den induktiven Widerstand, so ist $U_E = U$ (Abb. 7).

Wäre aber der Widerstand des Voltmeters 1300Ω gewesen, so wäre ein Strom geflossen

$$I' = \frac{U_E}{1300 + R}$$

und das Instrument hätte die gesuchte Berührungsspannung

$$U_B = I' \cdot 1300 = \frac{U_E}{1 + \frac{R}{1300}}$$

angezeigt. Ersetzt man noch R durch seinen Wert, so ist

$$U_B = \frac{U_E}{1 + \frac{R_i}{1300} \left(\frac{U_E}{U_i} - 1 \right)}. \quad (5)$$

Diese Gleichung ermöglicht es also, aus dem am Voltmeter abgelesenen Wert U_i die wirkliche Berührungsspannung U_B zu errechnen. Schließlich folgt noch aus Gl. (1) der spezifische Widerstand des Fußbodens unter und in der Nähe der Platte zu

$$\varrho = \frac{R}{1,7}. \quad (6)$$

Um den ungünstigsten Fall zu treffen, sollte bei dem Versuch ein Außenleiter über höchstens 5Ω geerdet werden. Praktisch ist dies jedoch nur nötig, wenn der Außenleiter über eine Durchschlagssicherung geerdet ist. Gewöhnlich genügen dann aber schlechtere Erdungen als 5Ω , da R_i und R sehr groß sind.

¹ Man kann auch dem Instrument (Widerstand R_i) einen Widerstand R_a parallel schalten. Es muß sein: $\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_a} = \frac{1}{1300}$, also $R_a = \frac{R_i}{\frac{1300}{R_i} - 1}$. Einem

statischen Voltmeter z. B. ($R_i = \infty$) muß man also 1300Ω parallel schalten.

IV. Wann sind Schutzmaßnahmen erforderlich?

11. Entscheidung der Schutzbedürftigkeit durch Messung. Schutzmaßnahmen sind nur dann erforderlich, wenn die Berührungsspannung größer als 65 V ist. Das zuverlässigste Verfahren um zu entscheiden, ob eine Schutzmaßnahme erforderlich ist, geschieht durch eine Messung der Berührungsspannung. Wie dies zu geschehen hat, wurde im vorigen Abschnitt beschrieben. An einem Beispiel sei das obige Meßverfahren gezeigt. Die Messung geschah in einer Margarinefabrik, deren Fußboden in einigen Räumen mit Steinfliesen belegt war und aus hygienischen Gründen täglich mehrmals mit heißem Wasser abgespritzt wurde. Die Netzspannung betrug 380/220 V; der Sternpunkt war direkt geerdet; die Spannung gegen Erde war also 220 V.

Eine Platte von 680 cm² wurde auf den Fußboden gelegt und durch einen Menschen belastet, der sich darauf stellte. Dann wurde ein Voltmeter zwischen dem einen Pol einer Steckdose und der Platte (vgl. Abb. 8) gelegt. Das Voltmeter hatte einen inneren Widerstand von 5172 Ω (Meßbereich von 300 V). Abgelesen wurde eine Spannung von 182 V. Also ist die Berührungsspannung nach Gl. (5)

$$U_B = \frac{220}{1 + 3,98 \left(\frac{220}{182} - 1 \right)} = 120 \text{ V.}$$

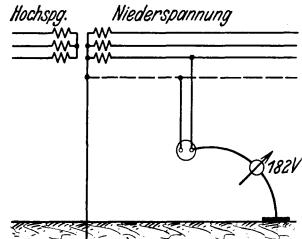


Abb. 8. Beispiel einer Berührungsspannungsmessung.

Da nur 65 V zugelassen sind, ist also im vorliegenden Fall eine Schutzmaßnahme erforderlich.

Der Übergangswiderstand des Bleches gegen Erde beträgt nach Gl. (4)

$$R = \left(\frac{220}{182} - 1 \right) 5172 = 1085 \text{ } \Omega$$

und der spezifische Widerstand der Steinfliesen ist nach Gl. (6)

$$\rho = \frac{1085}{1,7} = 640 \text{ } \Omega.$$

Vergleiche hierzu Zahlentafel 7.

Weitere Messungen in der erwähnten Margarinefabrik zeigt die Zahlentafel 3.

12. Entscheidung der Schutzbedürftigkeit ohne Messung. Im allgemeinen wird es unbequem sein, die Entscheidung der Schutzbedürftigkeit in jedem Falle durch eine Messung vorzunehmen. Um nun ohne Messung eine Entscheidung treffen zu können, erinnern wir uns an unsere

Zahlentafel 3.

Art des Betriebes	Bodenbelag	Boden feucht					Boden trocken				
		Widerstand des Instr. R_i Ω	Spannung U_i Volt (abgelesen)	Übergangswiderstand R Ω (gerechnet)	Spez. Widerst. $\frac{\rho}{m}$ $\Omega \times m$ (gerechnet)	Be-rührungs-Spannung U_B Volt (gerechnet)	Widerstand des Instr. R_i Ω	Spannung U_i Volt (abgelesen)	Übergangswiderstand R Ω (gerechnet)	Spez. Widerst. $\frac{\rho}{m}$ $\Omega \times m$ (gerechnet)	Be-rührungs-Spannung U_B Volt (gerechnet)
Packraum	Betonboden mit Platten belegt	3900	210	175	103	194	3900	192	566	333	163
Kühltrommelraum Erdgeschöß	Betonboden mit Platten belegt	3900	204	292	171	177	nicht gemessen, da Boden ständig feucht				
Öllager	Boden aus säurefesten Klinkern	1950	118	1675	970	96	1950	2	212600	124500	1,34
Milchrühranlage hochgelegenes Stockwerk	Betonboden mit Platten belegt	1950	108	2020	1185	86,2	1950	5,5	76200	44900	36,9
Elektrische Werkstatt	Ziegelsteinboden	1950	84	3160	1860	64,0	1950	0	∞	∞	0
Kistenlager	Zementboden mit Eisenträgern	1950	30	12400	7300	20,8	1950	0	∞	∞	0

Untersuchung im Abschnitt 9, aus der hervorging, daß die Berührungsspannung zunimmt

- a) mit der Höhe der Spannung gegen Erde,
- b) mit der Leitfähigkeit des Fußbodens.

Die Zahlentafel 4 ist auf dieser Einteilung aufgebaut, wobei noch unterschieden wird, ob ein Stromverbraucher betriebsmäßig umfaßt wird oder nur großflächig berührt werden kann (vgl. S. 2).

Je größer nun die zu erwartende Berührungsspannung ist, um so eher müssen Schutzmaßnahmen ergriffen werden.

Zahlentafel 4.

Raum Klasse	Spannung gegen Erde		
	66 bis 150 V	151 bis 250 V	über 250 V
A. Trockene Räume mit isolierendem Fußboden	Schutzmaßnahmen nicht erforderlich		
B. Trockene Räume mit leitfähigem Fußboden	Schutzmaßnahmen nur erforderlich bei betriebsmäßiger Umfassung	Schutzmaßnahmen erforderlich	Schutzmaßnahmen stets erforderlich
C. Feuchte Räume	bei großflächiger Berührung		

Zu den Räumen der Klasse A gehören: Wohnräume mit Holzfußboden.

Zu den Räumen der Klasse B gehören: Räume mit Fußboden aus Lehm, Steinfliesen, Holzzement, Beton ohne Eisen.

Zu den Räumen der Klasse C gehören: Badezimmer, Waschküchen, Molkereien, Gerbereien, Backofenstuben, Käsereien, Metzgereien, Futterküchen.

1. Bei Spannungen über 250 V gegen Erde sind also Schutzmaßnahmen stets erforderlich.

2. Bei Spannungen bis 250 V gegen Erde:

- a) Räume Klasse A: Keine Schutzmaßnahme.
- b) Räume Klasse B:

α) bei 66 bis 110 V gegen Erde: Bloße Berührung, auch großflächige (z. B. von Gehäusen von Maschinen), zwingt noch nicht zur Anwendung einer Schutzmaßnahme. Die Möglichkeit einer Umfassung des metallenen Stromverbrauchers (u. dgl.), der Spannung annehmen kann, genügt auch nicht, um eine Schutzmaßnahme zu fordern; die Umfassung muß betriebsmäßig vorkommen: Griffe, Handräder.

β) bei 151 bis 250 V gegen Erde: Schutzmaßnahmen sind schon bei Berührung (nicht erst bei Umfassung) erforderlich. Jedoch muß die Berührung großflächig sein, d. h. mit der vollen Handfläche erfolgen.

c) Räume Klasse C: Schutzmaßnahmen bei großflächiger Berührung.

Es ist wichtig zu bemerken, daß nicht die im Abschnitt 11 beschriebene Messung der Berührungsspannung, sondern die Zahlentafel 4 den L.E.S. I (§ 4) entspricht, also „VDE-mäßig“ ist.

13. Bemerkungen. Bisher hatten wir als Charakteristikum eines schutzbedürftigen Raumes die Leitfähigkeit des Fußbodens kennengelernt. Die gleiche Wirkung wie ein leitfähiger Fußboden haben naturgemäß alle Teile, die mit der Erde in leitender Verbindung stehen und berührt werden können. Dazu gehören:

Wasserleitungen, insbesondere die Wasserhähne,
Heizkörper der Zentralheizung,
Koch- und Gasherde,
Radioapparate,
Fernsprecher.

Hier kann eine Gefahr dadurch entstehen, daß einer dieser Teile mit der einen Hand berührt wird, während die andere Hand einen Stromverbraucher mit Isolationsfehler ergreift. Hierbei fließt der Strom von Hand zu Hand durch den Körper (über das Herz), während er in den bisher geschilderten Fällen von einer Hand nach den Füßen zu strömt. Die Berührungsspannung muß also durch Messung der Spannung zwischen einem Außenleiter und den oben angeführten Anlageteilen ermittelt werden. Die Blechplatte kommt hierbei in Fortfall. Infolge der guten Erdung dieser Anlageteile ist die Berührungsspannung gleich der „Spannung gegen Erde“.

Im Gegensatz zum Fußboden, der begangen werden muß, werden diese geerdeten Anlageteile nur gelegentlich berührt. Man ist beim VDE übereingekommen, aus der Anwesenheit solcher Teile noch keine Verpflichtung zur Anwendung einer Schutzmaßnahme herzuleiten, wenn gleich es sich oft empfiehlt, auch in solchen Räumen eine Schutzmaßnahme zu verwenden.

Auch wenn in einem Raum der Fußboden nicht leitfähig und kein metallener geerdeter Teil vorhanden ist, bestehen noch Möglichkeiten einer Gefährdung bei Isolationsfehlern. Bei Vorhandensein mehrerer gleichzeitig benutzter Steckdosen kann nämlich das eine Gerät mit einem Außenleiter, ein anderes mit dem Nulleiter (oder einem anderen Außenleiter) Schluß haben, so daß zwischen den metallenen Gehäusen beider Geräte die volle Spannung besteht. Um diese Gefahrmöglichkeit zu beseitigen, empfiehlt es sich, auch in Räumen der Klasse A alle Metallteile, die Spannung annehmen können, miteinander und, wenn möglich, auch mit dem Heizkörper und mit der Deckenbeleuchtung zu verbinden. Das geschieht am zweckmäßigsten dadurch, daß man Dosen mit Schutzkontakt anwendet und diese an Schutzleitungen anschließt, die miteinander leitende Verbin-

ding haben, ohne daß deshalb notwendigerweise die Schutzleitungen geerdet bzw. an den Nulleiter bzw. an einen Schutzschalter angeschlossen sein müßten.

Das Badezimmer zählt elektrisch zu den gefährlichsten Räumen. Es empfiehlt sich daher, in Badezimmern überhaupt keine Steckdosen anzubringen und dort keine elektrischen Geräte wie Heizsonnen, Massagegeräte, Heißluftduschen zu verwenden. Auch sei davor gewarnt, das Nichtvorhandensein von Steckdosen durch eine Verlängerungsschnur (aus einem anderen Zimmer) zu umgehen. Die V.E.S. 1 verbieten allerdings nicht die Anbringung von Steckdosen im Badezimmer, sondern schreiben nur vor, daß sie einen Schutzkontakt haben müssen, so daß ein Stecker ohne Schutzkontakt nicht gesteckt werden kann. In Baderäumen ist es ferner ratsam, Zu- und Abflußrohr miteinander leitend zu verbinden. Die Klingelschnur soll nicht aus Metall sein.

Ebenso wie im Badezimmer verwende man im Waschhaus keine Steckdosen, sondern nur festinstallierte Stromverbraucher.

V. Erdungsschrauben, Schutzleitungen, Steckvorrichtungen.

14. Ortsfeste Stromverbraucher. Der Anschluß ortsfester Stromverbraucher an die Schutzleitung geschieht mit Erdungsschrauben (oder Erdungsklemmen). Hier ist die Bezeichnung Erdung üblich, auch wenn die Schraube (oder Klemme) für Nullung oder Schutzschaltung verwendet wird. Die Erdungsschraube muß als solche gekennzeichnet sein. An einigen Arten von (metallinen) Stromverbrauchern usw. müssen nach den VDE-Vorschriften stets Erdungsschrauben vorhanden sein, z. B.

nach den V.E.S. 1:

- für Maschinen und Transformatoren: §§ 6c und 7 b,
- für Schalt- und Verteilungsanlagen: § 9 b,
- für Apparate: § 10f,
- für Schalter: § 11 h,
- für Steckvorrichtungen: § 13 g;

nach den V.E.Wz.:

- für Elektrowerkzeuge, Schleif- und Poliermaschinen: § 8;

nach den R.E.S.:

- für Schaltgeräte: § 47;

nach den R.E.A.:

- für Anlasser: § 44;

nach den K.P.I.:

- für metallene Gehäuse von Installationsmaterial: §§ 9 und 17.

Erdungsschrauben werden derzeit noch nicht für Beleuchtungskörper gefordert; es ist jedoch zweckmäßig, sie vorzusehen.

Die Schutzleitungen¹ ortsfester Stromverbraucher können verlegt werden:

- a) in Rohren,
- b) als Beidraht² in Rohrdrähten oder kabelähnlichen Leitungen³,
- c) als blanker offenverlegter Leiter (kleinster zulässiger Querschnitt 4 mm²).

Die Rohre dürfen auch, wenn die Verbindung untereinander durch sorgfältige Verschraubung oder auch kontaktsicheres Ineinanderstecken gut leitend ist, selbst als alleinige Schutzleitung benutzt werden. Die Metallhüllen von Rohrdrähten und kabelähnlichen Leitungen dürfen jedoch nicht als (alleinige) Schutzleitung verwendet werden; dazu kann der Beidraht verwendet werden. — Zur Verbindung der Beidrähte ist in jeder Verbindungsdose eine Klemme vorzusehen, die bei Metall Dosen mit dieser in leitender Verbindung stehen muß.

Nach den V.E.S. 1 dürfen übrigens weder die metallenen Rohre noch die Metallhüllen der Rohrdrähte und der kabelähnlichen Leitungen als (alleinige) Stromrückleitung verwendet werden, da die Verbindung der Mäntel untereinander nicht als zuverlässig gilt. Bei Rohrdrähten und umhüllten Rohrdrähten (jedoch nicht bei Bleimetalleitungen⁴) kann der Beidraht als Rückleitung verwendet werden.

15. Ortsveränderliche Stromverbraucher. Ortsveränderliche Stromverbraucher werden im allgemeinen nur mit Hilfe von Steckvorrichtungen angeschlossen und nur in besonderen Fällen (z. B. bei Herden) auch mit Hilfe von Klemmdosen. Eine Vorschrift, Steckvorrichtungen zu verwenden, besteht nicht.

Der Schutzleiter muß stets innerhalb der Schnur liegen (z. B. als dritte Ader), darf also nicht etwa als gesonderter Leitungsdraht geführt und an die ortsfeste Schutzleitung angeschlossen werden. Bei Nullung eines Gerätes, das mit einem Pol am Nulleiter angeschlossen ist, könnte man sich den Schutzleiter in der Schnur anscheinend sparen, indem man den Nulleiter direkt mit dem Gehäuse verbindet. Dies ist aber, wie im Abschnitt 55 gezeigt wird, gefährlich und daher unzulässig (vgl. V.E.S. 1 § 3). In der Schnur muß daher neben dem Nulleiter noch ein Schutzleiter liegen, der am festverlegten Nulleiter angeschlossen

¹ Zusammenfassende Bezeichnung für: Erdungs-, Nullungs- oder Schutzschaltungsleitung.

² Das ist ein unmittelbar unter dem Mantel angeordneter und mit diesem leitend verbundener blanker Draht.

³ Die kabelähnlichen Leitungen zerfallen in zwei Klassen: die umhüllten Rohrdrähte und die Bleimantelleitungen. Die umhüllten Rohrdrähte haben eine chemisch und elektrisch widerstandsfähige Umhüllung und werden auch manchmal kabelähnliche Leitungen in Rohrdrahtausführung genannt.

⁴ Der Beidraht ist hier aus fabrikatorischen Gründen schwächer.

wird. Ein zweipoliges ortsveränderliches Gerät erfordert also sowohl bei Erdung, als auch bei Nullung, als auch bei Schutzschaltung eine dreidradige Leitung. Oder allgemein: In einer beweglichen Zuleitungsschnur zu einem durch Erdung, Nullung oder Schutzschaltung zu schützenden ortsveränderlichen Stromverbraucher muß eine (an der Stromzuführung nicht beteiligte) Schutzleitung vorhanden sein.

Die geschilderte (unzulässige) Verwendung des Nulleiters in der Schnur als Schutzleiter würde übrigens polunverwechselbare Wandsteckvorrichtungen voraussetzen, die in den K.P.I. nicht mehr enthalten sind, da sie überflüssig und dazu unbequem sind. Die Polverwechselbarkeit hat überdies den Vorteil, daß ein Körperschluß mit dem Nulleiter, der bei Erdung und Nullung und meist auch bei Schutzschaltung nicht zur Abschaltung führt, durch gelegentliches Vertauschen der Pole durch Ansprechen der Sicherung oder des Schalters zutage tritt.

Von den verschiedenen Arten von Schutzkontaktsteckvorrichtungen, die also für Erdung, für Nullung und für Schutzschaltung verwendet werden können, beschreiben wir nur die Wandsteckvorrichtungen.

Für die zweipoligen 10 A-Schutzkontaktsteckvorrichtungen bestehen VDE-Leitsätze¹. Diese fordern, daß die Schutzkontakt-dose so eingerichtet ist, daß die genormten gewöhnlichen zweipoligen 6 oder 10 A-Stecker ohne Schutzkontakt nicht eingeführt werden können

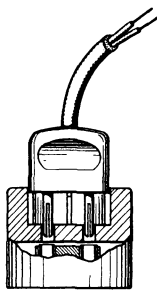


Abb. 9. Gewöhnlicher Stecker paßt nicht in Schutzkontakt-dose.

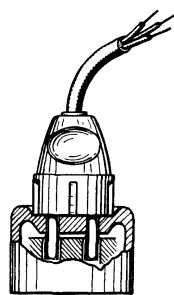


Abb. 10. Schutzkontaktstecker paßt in gewöhnliche Dose.

(Abb. 9). Es wird von den Leitsätzen nicht verlangt, ist aber sehr zweckmäßig, daß umgekehrt Schutzstecker nicht nur in Schutzdosen, sondern auch in gewöhnliche Dosen passen (Abb. 10). Dies hat den Zweck, Geräte mit Dreileiterschnur und angeschlossenem Schutzkontaktstecker sowohl in gefährlichen, als auch in ungefährlichen Räumen verwenden zu können, beispielsweise einen Heizofen sowohl in der Küche (geschützt) als auch im Wohnzimmer (ungeschützt).

Diese beiden Forderungen erfüllt das sogenannte „Schuko“- , d. h. Schutzkontakt-System², das von einer großen Anzahl von Firmen nach gemeinsamen Normen und Lehren hergestellt und vertrieben wird. Es

¹ Für Schutzkontaktsteckvorrichtungen für größere Stromstärken und mehrere Pole bestehen noch keine Normen.

² Neben den Schuko-Steckvorrichtungen bestehen auch noch andere Systeme, beispielsweise solche mit drittem Stift am Stecker und dritter Hülse in der Dose. Derartige Steckvorrichtungen sind polunverwechselbar, ihre Stecker passen aber nicht zugleich in gewöhnliche Dosen.

ist in Abb. 11 schematisch dargestellt. Die Dose besitzt einen hohen Schutzkragen mit zwei Schutzkontakt-Federzungen, der Stecker hat seitlich zwei tief eingelassene schmale Schutzkontaktbahnen, die durch ihre tiefe Einbettung gegen zufällige Berührung schützen. Die doppelte An-

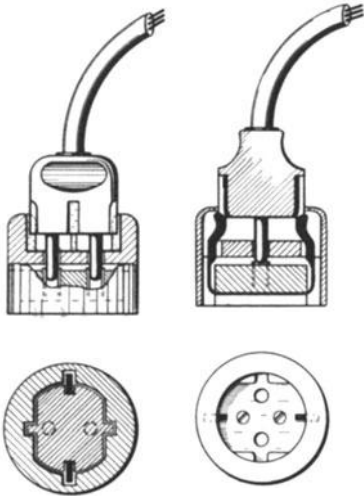


Abb. 11. „Schuko“-Steckvorrichtung.

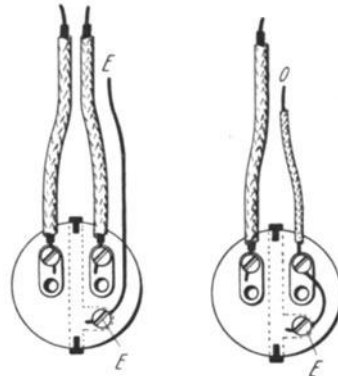


Abb. 12. Anschluß einer Schukodose bei Erdung und Schutzschaltung (links) und bei Nullung (rechts).

zahl von Schutzkontakten ist zwar nicht vorgeschrieben, hat sich aber als durchaus notwendig erwiesen, um sicheren Kontakt zu geben.

Die Körper der Stecker und die Kappen oder Deckplatten der Dosen werden nicht mehr aus Metall, sondern aus Isolierstoff hergestellt.

Abb. 12 zeigt links den Anschluß einer Schuko-Dose bei Erdung und Schutzschaltung, rechts bei Nullung. Abb. 13 stellt einen angeschlossenen Schuko-Stecker im Querschnitt dar.

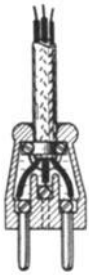


Abb. 13. „Schuko“-Stecker im Schnitt.

In Werkstätten ist oft die Anordnung vieler Steckdosen in einer Reihe zweckmäßig, insbesondere an der Werkbankleiste.

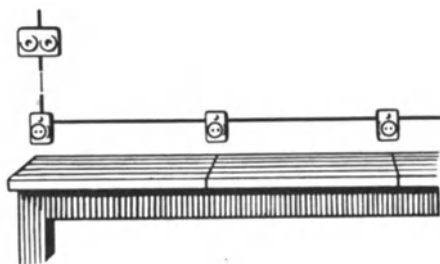


Abb. 14. Reihen-Schutzkontakt Dosen für Werkstätten.

Diese Anordnung (Abb. 14) erfordert Steckdosen für durchgehende Leitungen.

Im allgemeinen wird allerdings vom VDE empfohlen, Steckdosen ohne Sicherung zu verwenden; bei Reihensteckdosen ist es jedoch zweckmäßig, Sicherungen vorzusehen, da durch die Dosensicherung verhindert wird, daß bei Störung an einem Stromverbraucher sämt-

liche Steckdosen spannungslos werden. Die Sicherung in der Reihensteckdose, die mit gleicher Berechtigung wie eine gemeinsame Sicherung einpolig sein kann, hat noch zwei weitere Vorteile; nämlich erstens: daß die gemeinsame Sicherung stärker gewählt werden kann (etwa 10 oder 15 A statt 6 A); und zweitens: daß umgekehrt die Sicherung in der Dose schwächer gehalten werden kann, es genügt eine Sicherung von 4, oft sogar von 2 A Nennstrom. Je schwächer aber die Sicherung ist, um so schneller werden sie bei Kurzschluß bzw. im Falle von Erdung und Nullung bei einem Körperschluß abschalten.

VI. Abschaltzeit und Abschaltstromstärke von Sicherungen.

Erdung und Nullung wirken im allgemeinen dadurch, daß die Fehlerstelle durch Ansprechen einer Stromsicherung abgeschaltet wird. Eine solche Abschaltung muß mit einer gewissen Geschwindigkeit vor sich gehen. Wir besprechen daher zunächst die Abschaltzeiten von Schmelzsicherungen. Es kommen zwei Arten von Schmelzsicherungen¹ in Betracht:

1. gewöhnliche Schmelzsicherungen,
2. träge Schmelzsicherungen.

16. Gewöhnliche Schmelzsicherungen. Die Charakteristiken dieser Sicherungen, d. h. die Abhängigkeit der Abschaltzeit von der Stromstärke, sind sehr verschieden. Sie variieren

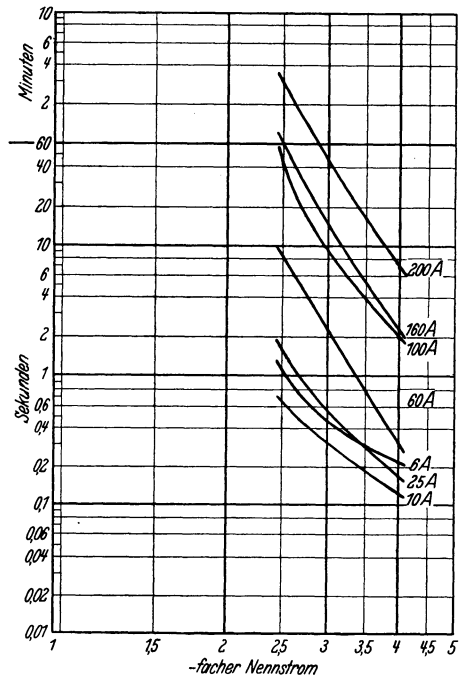


Abb. 15. Abschaltzeiten gewöhnlicher Schmelzsicherungen bei verschiedenen Belastungen.

¹ Leiterquerschnitt und Nennstrom der zugehörigen Abschmelzsicherungen:

Querschnitt mm ²	Nennstrom der Abschmelzsicherungen A	Querschnitt mm ²	Nennstrom der Abschmelzsicherungen A
0,75	6	16	60
1	6	25	80
1,5	10	35	100
2,5	15	50	125
4	20	70	160
6	25	95	200
10	35		

nicht nur mit der Nennstromstärke der Sicherungen, sondern auch mit dem Fabrikat. Die Abb. 15 gibt für mehrere Nennstromstärken Mittelwerte der Charakteristiken verschiedener Fabrikate. Zur leichteren Ablesung sind die Koordinaten in logarithmischem Maßstabe aufgetragen, und zwar der Strom als Abszisse und die Zeit als Ordinate. Zum bequemeren Vergleich ist die Stromstärke in Vielfachem des

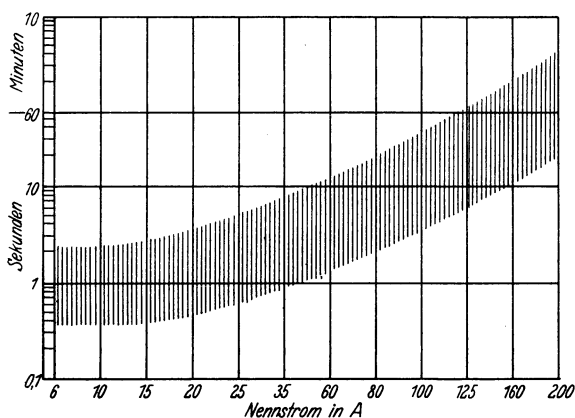


Abb. 16. Abschaltzeiten gewöhnlicher Schmelzsicherungen beim 2,5fachen Nennstrom.

Nennstroms angegeben. Unter Abschaltstromstärke wollen wir nun eine Stromstärke verstehen, bei der die Sicherung in einer gewissen kurzen Zeit abschmilzt. Für die verschiedenen Nennstromstärken und für die verschiedenen Fabrikate müßte man dann den Rechnungen die verschiedensten Vielfachen der Nennstromstärke zugrunde legen.

Bei einer Abschaltzeit von z. B. 10 Sekunden würde die Abschaltstromstärke (vgl. Abb. 15) etwa von der doppelten Nennstromstärke bis zur 4-fachen Nennstromstärke variieren. Um sich davon frei zu machen, ist man übereingekommen (L.E.S. 1 § 8), unter Abschaltstromstärke das 2,5 fache der Nennstrom-

Zahlentafel 5.
Abschaltzeiten bei 2,5-fachem
Nennstrom für gewöhnliche Sicherungen.

I_n A	t_{\min} sek	t_{\max} sek	t_{mittel} sek
6	0,47	2,5	1,11
10	0,48	2,3	1,25
15	0,36	0,7	0,55
20	0,35	3,3	1,65
25	0,38	2,1	1,53
35	0,7	8	4,8
60	3,4	11	8,1
80	3,5	120	46,2
100	4	90	41
125	9	17	13
160	5,8	120	59
200	28	270	170

Bei einer Abschaltzeit von z. B. 10 Sekunden würde die Abschaltstromstärke (vgl. Abb. 15) etwa von der doppelten Nennstromstärke bis zur 4-fachen Nennstromstärke variieren. Um sich davon frei zu machen, ist man übereingekommen (L.E.S. 1 § 8), unter Abschaltstromstärke das 2,5 fache der Nennstromstärke zu verstehen¹. Die Abschmelzzeiten beim 2,5-fachen Nennstrom sind dann natürlich sehr verschieden. In welchem großen Grenzen sie schwanken, geht aus Zahlentafel 5 hervor, in der für verschiedene Nennstromstärken die kürzeste und längste Abschmelzzeit bei verschiedenen Fabrikaten (einschließlich verschiedenen Exemplaren desselben Fa-

¹ Die Abschaltstromstärke darf nicht mit der Abschmelzstromstärke (K.P.I. § 52) verwechselt werden.

brikats) angegeben sind¹. Abb. 16 gibt die Zahlentafel 5 graphisch wieder und zeigt noch einmal den großen Spielraum der Abschmelzzeiten. Als mittlere Abschmelzzeit bei der Abschaltstromstärke kann man etwa 1/2 Minute ansehen.

17. Träge Schmelzsicherungen. Die trägen Sicherungen haben längere Abschmelzzeiten als die gewöhnlichen Sicherungen. Der Abb. 15 für gewöhnliche Sicherungen entspricht Abb. 17 für träge Sicherungen. Da die Charakteristiken der trägen Sicherungen sich bei verschiedenen Nennstromstärken jedoch vielfach überschneiden, sind in Abb. 17 nur die Grenzen angegeben, zwischen denen sich die Abschmelzzeiten bewegen². Beim 2,5-fachen

Nennstrom ergeben sich die Abschaltzeiten der Zahlentafel 6. Da die Abschmelzzeiten erheblich länger sind, würde bei diesem Fabrikat als Abschaltstromstärke nicht der 2,5-fache, sondern erst etwa der 3-fache Nennstrom genügen.

Zahlentafel 6.
Abschaltzeiten bei 2,5-fachem Nennstrom für träge Sicherungen.

I_n	t	I_n	t
A	sek	A	sek
2	20	80	25
4	30	100	90
6	30	125	170
10	90	160	180
15	30	200	75
20	15	225	90
25	25	260	200
35	40	300	110
50	30	350	90
60	45		

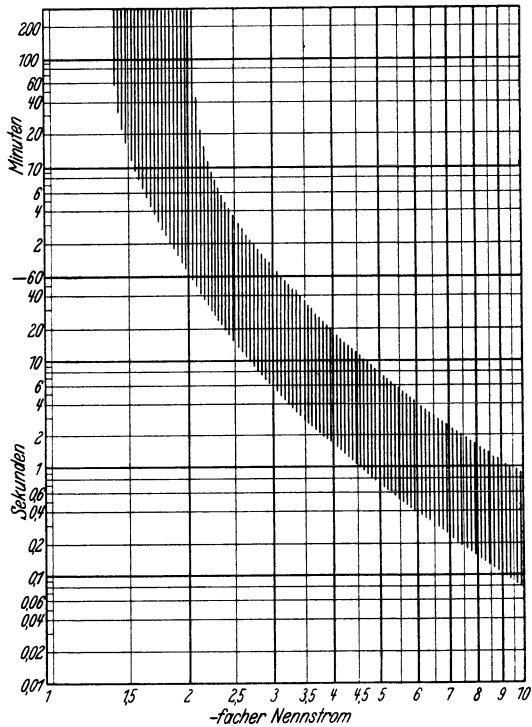


Abb. 17. Abschaltzeiten träger Schmelzsicherungen bei verschiedenen Belastungen.

VII. Erder.

18. Spezifischer Widerstand des Erdreichs. Der Erdboden ist ein Halbleiter. Sein spezifischer Widerstand ist je nach Zusammensetzung und

¹ Diese Messungen hat auf meinen Wunsch Herr Obering. Wilhelm Klement der SSW freundlichst ausgeführt.

² Die Angaben sind nicht Mittelwerte verschiedener Fabrikate, sondern beziehen sich nur auf ein bestimmtes Fabrikat.

Feuchtigkeitsgehalt außerordentlich verschieden. Relativ gut leitet Ackerboden, erheblich schlechter trockener Sandboden, während trockener Kies fast ein Isolator ist. Einen ganz ungefähren Anhalt über den spezifischen Widerstand verschiedener Bodenarten gibt die Zahlentafel 7.

Zahlentafel 7.

Bodenart	ϱ Ohm-Meter
Moorboden	50
Ackerboden, Lehmboden .	100
feuchter Sandboden . . .	500
feuchte Steinfliesen . . .	700
trockener Sandboden . . .	1000
Kies	2000
steiniger Boden	4000

tafel 7.

Der spezifische Widerstand ist hier und überhaupt in diesem Buche nicht wie üblich in Ohm-Quadratmillimeter/Meter oder in Ohm-Zentimeter, sondern in Ohm-Meter angegeben. Dies empfiehlt sich, da die Hauptabmessungen der Erde auch in Metern ausgedrückt sind.

Um eine Vorstellung von der schlechten elektrischen Leitfähigkeit des Erdreichs zu bekommen, sei diese mit der Leitfähigkeit von Kupfer verglichen. Der spezifische Widerstand von kaltem Kupfer ist

$$0,0175 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} = 1,75 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm} = 1,75 \cdot 10^{-8} \Omega \text{ m} .$$

Ackerboden leitet also

$$\frac{100}{1,75 \cdot 10^{-8}} = 5,7 \cdot 10^9,$$

also mehr als fünfmilliardenmal so schlecht als Kupfer.

19. Erdungswiderstand¹ einiger Erder. Exakte Formeln. Die Berechnung des Erdungswiderstandes der wichtigsten Anordnungen findet sich schon in der Literatur². Wir beschränken uns daher darauf, einige

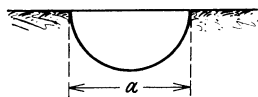


Abb. 18. Halbkugelerder.

Ergebnisse hier abzdrukken:

Halbkugel³ (Abb. 18):

$$\frac{\varrho}{\pi a},$$

Kreisplatte auf der Erde (Abb. 19):

$$\frac{\varrho}{2 a},$$

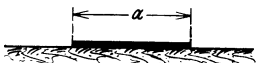


Abb. 19. Kreisplattenerder
(auf der Erde).

Kreisplatte tief in der Erde:

$$\frac{\varrho}{4 a},$$

¹ Es sind auch die Bezeichnungen Ausbreitungswiderstand und Übergangswiderstand gebräuchlich.

² Vgl. Rüdtenberg: Sternpunktserdung bei Hochspannungsleitungen; einige grundsätzliche Betrachtungen, Elektrotechn. Z. 1926 S. 324, 359. Pohlhausen: VDE-Fachberichte. 1927 S. 39. Ollendorf: Erdströme S. 14. Berlin: Julius Springer 1928.

³ Die „Hauptabmessung“ wird im nachstehenden mit a bezeichnet.

Rohr (Abb. 20):

$$\frac{\rho}{2\pi a} \ln \frac{4a}{d},$$

Draht (Abb. 21):

$$\frac{\rho}{2\pi a} \ln \frac{a^2}{dh},$$

Band (Breite b , sonst Abb. 21):

$$\frac{\rho}{2\pi a} \ln \frac{a^2}{hb/2}.$$

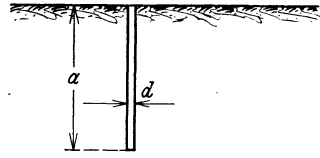


Abb. 20. Rohrerder.

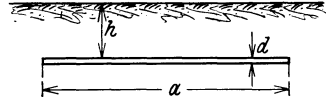


Abb. 21. Draht- oder Bänderder.

20. Die gebräuchlichsten Erder. Praktische Formeln. Außer der Wasserleitung kommen folgende Erder in Betracht:

1. Platten,
2. Rohre,
3. Bänder oder Drähte.

Wir bringen zunächst die im vorigen Abschnitt aufgeführten Formeln der Erdungswiderstände in eine einfachere Form, die aber den praktischen Bedürfnissen vollauf genügt.

Platten. Platten werden hochkant eingegraben. Würde man die Platten waagrecht legen, so könnte das Erdreich unter der Platte leicht absacken, so daß eine innige Berührung zwischen Erdreich und Platte auf der unteren Seite fehlen würde.

Der Ausbreitungswiderstand einer tief in der Erde liegenden Kreisplatte ist (vgl. Abschnitt 19) $R = \rho/4 a'$, wenn a' der Durchmesser ist. Liegt sie nur auf der Erdoberfläche auf, so vermittelt nur die eine Seite den Strom, der Widerstand ist also doppelt so groß: $R = \rho/2 a'$. In der stehenden Anordnung kann die Platte den Strom ziemlich unbehindert und nach beiden Seiten in das Erdreich leiten. Der Ausbreitungswiderstand nähert sich also mehr der ersten der beiden eben genannten Formeln; wir schreiben etwa

$$R = \frac{\rho}{3,5 a'}.$$

Gewöhnlich werden quadratische Platten benutzt. Die Kantenlänge sei a . Der gleichwertige Kreisdurchmesser ergibt sich aus $a'^2 \pi/4 = a^2$ zu $a' = 1,13a$. Wir finden also

$$R = 0,25 \cdot \frac{\rho}{a}. \quad (7)$$

Viel verwendet werden Platten von 1 m^2 einseitiger Oberfläche. Mit der Kantenlänge $a = 1 \text{ m}$ errechnet sich also der Ausbreitungswiderstand in Ackerboden zu

$$0,25 \cdot \frac{100}{1} = 25 \Omega.$$

Rohre. Der Ausbreitungswiderstand eines Rohres von der Länge a und dem Durchmesser d ist (Abschnitt 19)

$$R = \frac{\rho}{2\pi a} \cdot \ln \frac{4a}{d}.$$

Meist werden 1- bis 2-zöllige Rohre von einigen Metern Länge benutzt. Beschränkt man sich auf solche Rohre, so liegt der Wert des Logarithmus in der Gegend von 5,8. Damit vereinfacht sich obige Formel auf

$$R = 0,9 \cdot \frac{\rho}{a}. \quad (8)$$

Ein 3 m langes Rohr hat also in Ackerboden einen Erdungswiderstand von

$$0,9 \cdot \frac{100}{3} = 30 \Omega.$$

Drähte. Der Ausbreitungswiderstand eines a m langen Drahtes vom Durchmesser d m, der h m unter der Erde liegt, ist (Abschnitt 19)

$$R = \frac{\rho}{2\pi a} \cdot \ln \frac{a^2}{dh}.$$

Diese Formel gilt, wenn h groß gegen d , aber klein gegen a ist; dies ist praktisch immer der Fall. Um diese Formel zu vereinfachen, bestimmen wir den Logarithmus für technisch vorkommende Fälle. Gewöhnlich werden Drähte von 25 bis 100 m Länge in einer Tiefe von $\frac{1}{2}$ m verlegt¹, der Durchmesser ist meist 8 mm entsprechend einem Querschnitt von 50 mm^2 . Der Logarithmus bewegt sich dann zwischen 11,9 für 25 m; 13,3 für 50 m; 14,7 für 100 m Drahtlänge, hat also im Mittel den Wert 13,3, der zugleich der vielverlegten Drahtlänge von 50 m entspricht. Mit diesem Mittelwert für den Logarithmus wird der Erdungswiderstand

$$R = 2,1 \cdot \frac{\rho}{a}. \quad (9)$$

Ein in Ackerboden verlegter Draht von 50 m Länge hat also einen Ausbreitungswiderstand von

$$2,1 \cdot \frac{100}{50} = 4,2 \Omega.$$

Bänder. Für Bänder von der Breite b gilt die Formel für Drähte, wenn $d = b/2$ gesetzt wird. Häufig werden Bänder von $3 \times 16 \text{ mm} = 50 \text{ mm}^2$ verlegt. Der äquivalente Durchmesser ist $d = 16/2 = 8 \text{ mm}$. Der Logarithmus ist also ebenso groß wie bei Drähten, so daß für den Erdungswiderstand dieselbe Gleichung gilt

$$R = 2,1 \frac{\rho}{a}. \quad (10)$$

¹ Dampfpflüge haben einen Tiefgang von 50 cm. Kommt Beackern mit Dampfpflügen nicht in Frage, so genügt meist 30 cm.

Zusammenstellung der vereinfachten Formeln. Wir stellen die gefundenen Formeln zusammen; sie geben natürlich nur angenäherte Resultate, genauere Werte haben jedoch in Betracht des nur unsicher bekannten und auch schwankenden Widerstandes des Erdreiches für unsere Zwecke keinen praktischen Wert.

In Zahlentafel 8 ist der spezifische Widerstand ρ in Ω m und die Länge a in m einzusetzen.

Die Erdungswiderstände von Halbkugel, Platte, Rohr, Band und Draht befolgen also dieselbe Gleichung

$$R = C \cdot \frac{\rho}{a}, \quad (11)$$

worin C nur von der Form bzw.

Art des Erders abhängt und a die „Hauptabmessung“ bedeutet (s. Zahlentafel 9).

Mit Benutzung der Zahlentafel 7 für ρ ergibt sich nachstehende Zahlentafel 10 für den Erdungswiderstand einiger Erder.

Zahlentafel 8.

Erder	Erdungswiderstand
Quadratische Platte hochkant in der Erde	$0,25 \frac{\rho}{a}$
Rohr	$0,9 \frac{\rho}{a}$
Band oder Draht	$2,1 \frac{\rho}{a}$

Zahlentafel 9.

Erder	C
Halbkugel	0,32
Kreisplatte auf der Erde	0,5
Quadratische Platte senkrecht in der Erde	0,25
Rohr	0,9
Band oder Draht	2,1

Zahlentafel 10.

	ρ	Platte mit einseitig. Oberfl. von		Rohr				Band oder Draht		
		Ω m	1 m ²	2 m ²	1 m	2 m	3 m	4 m	25 m	50 m
Ackerboden	100	25	17,7	90	45	30	22	8,4	4,2	2,1
feuchter Sandboden	500	125	88	450	225	150	110	42	21	10,5
trockener Sandboden	1000	250	177	900	450	300	220	84	42	21

Es sei besonders der weit verbreitete Irrtum richtiggestellt, als könne man einen niedrigeren Erdungswiderstand dadurch erreichen, daß man den Erdern eine große „Erdberührungsfläche“ gibt. Der Widerstand einer Platte fällt bei Verdoppelung der Fläche nicht um 50 %, sondern nur um 30 %. Benötigt man den halben Widerstand, so muß die Platte die vierfache Fläche haben. Denn der Erdungswiderstand ist, wie die Formel zeigt, umgekehrt proportional der Kantenlänge, also der Wurzel aus der Fläche. In ähnlicher Weise kommt es bei Rohren fast nicht auf den Durchmesser an, sondern in erster Linie auf die Länge der Rohre. Verdoppelt man den Durchmesser, wodurch die

Erdberührungsfläche um 100 % steigt, so geht der Erdungswiderstand nur um 11% zurück. In Verkennung dieser Sachlage sind, um eine große Oberfläche gegen Erde zu erzielen, schon große Brunnen gegraben worden, natürlich ohne Erfolg.

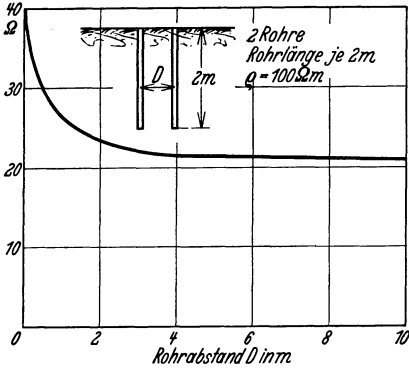


Abb. 22. Kombinationswiderstand zweier Rohre.

21. Mehrfacherder. Verlegt man, um den Erdungswiderstand herabzusetzen, mehrere Erder nebeneinander, so stören sie sich gegenseitig, d. h. der Strom kann sich nicht unbehindert ausbreiten. Das heißt, der Erdungswiderstand zweier paralleler Erder ist größer als die Hälfte eines einzelnen Erders. Man muß deswegen den Abstand der Erder voneinander genügend groß wählen: bei Bändern mindestens 1,5 m, bei Platten mindestens 3 m. Die Platten verlegt man daher zweckmäßig nicht so, daß die Flächen sich gegenüberstehen, sondern derart, daß die Platten in einer Ebene liegen.

Die gegenseitige Beeinflussung zweier Rohre von je 2 m Länge geht aus Abb. 22¹ hervor. Der Kombinationsabstand fällt bei Vergrößerung

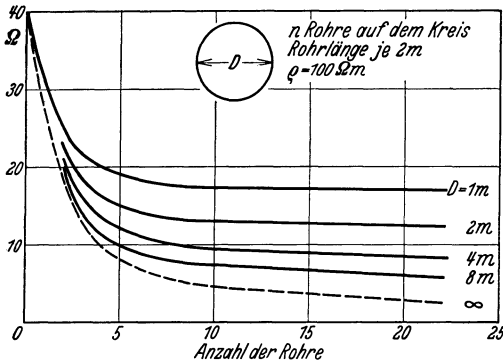


Abb. 23. Kombinationswiderstand in Abhängigkeit von der Anzahl der Rohre.

des Rohrabstandes zunächst rasch, dann aber nicht mehr wesentlich. Es genügt daher ein Rohrabstand von 2 m. Der Kombinationswiderstand ist dann 23 Ω, also nur wenig größer als der Grenzwert $40:2 = 20 \Omega$, der bei sehr großem Abstand der Rohre erzielbar ist.

Verteilt man n Rohre von 2 m Länge gleichmäßig im Kreis (Kreisdurchmesser D), so ist der Kombinationswiderstand natürlich um so kleiner, je größer n ist (Abb. 23). Man erkennt aber, daß es nicht viel Zweck hat, viel mehr als 6 Rohre im Kreis anzuordnen. Wählt man 6 Rohre, so ändert sich der Gesamtwiderstand mit dem Durchmesser des Kreises gemäß Abb. 24. Ein Durchmesser über 5 m ist praktisch zwecklos.

¹ Die Abb. 22 und 23 sind einem Vortrag von Dr. Pohlhausen entnommen: Grundlagen der Bemessung von Starkstromerdern. VDE-Fachberichte 1927.

Ist man im Gelände nicht beschränkt, so sind Bänder und Drähte wegen ihres niedrigen Ausbreitungswiderstandes vorzuziehen. Bei Platzmangel jedoch empfiehlt es sich, mehrere Rohre nebeneinander anzuordnen.

22. Messung des Erdungswiderstandes. Den Erdungswiderstand kann man auf zwei Arten messen:

Erstens: mit Hilfe einer Strom- und Spannungsmessung (Abb. 25). Der Erder wird vom Stromverbraucher abgeklemmt und an den Außenleiter hinter der Sicherung unter Zwischenschaltung eines Amperemeters und eines regelbaren Widerstandes gelegt.

Der Widerstand wird so eingeregelt, daß der Strom die Nennstärke der Sicherung nicht übersteigt, damit bei dem Versuch die Sicherung nicht abschmilzt. Am Amperemeter wird der Erdstrom abgelesen. Ferner wird mittels eines Voltmeters die Spannung zwischen dem Anschluß des Erders und einer Sonde bestimmt; diese muß außerhalb des Spannungstrichters liegen, also etwa 20 m vom Erder entfernt sein (vgl. Abschnitt 26). Aus Stromstärke und Spannung ergibt sich der gesuchte Erdungswiderstand des Erders. Der Widerstand des Voltmeters

muß gegenüber dem Erdungswiderstand der Sonde¹ hinreichend groß sein, da sonst die Messung zu ungenau wird. Läßt man einen Meßfehler von 10% zu, so darf bei einem inneren Widerstand des Instrumentes R_i der Sondenwiderstand höchstens $R_i/10$ betragen. Aber auch gegenüber dem Widerstand des zu messenden Erders muß der Voltmeterwiderstand genügend groß sein. — Bei der Messung fließt ein Strom, der sich über die Betriebserdung zurückschließt. Ist die Betriebserdung über eine Durchschlagsicherung geerdet, so muß man eine direkte Erdung des Nullpunktes oder eines Außenleiters herstellen.

¹ Bei trockenem Sandboden verbessert man den bzw. die Sondenwiderstände durch Übergießen von einigen Eimern Wasser.

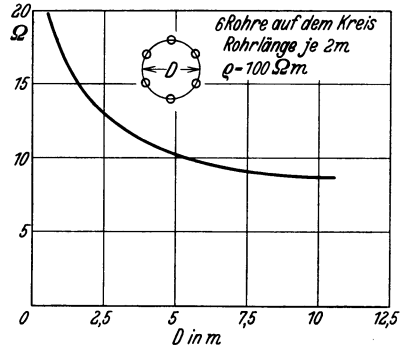


Abb. 24. Kombinationswiderstand von sechs Rohren.

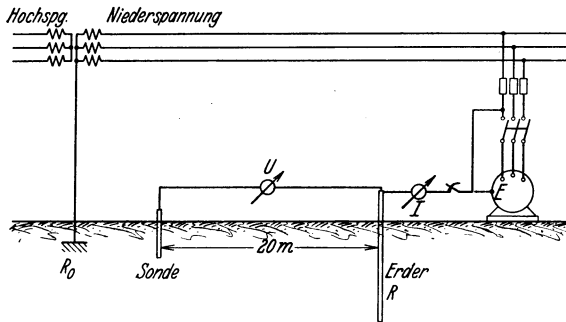


Abb. 25. Messung des Erdungswiderstandes.

Nr.	Erder	Datum und Witterung						
		10. 10. 27 trocken	12. 10. 27 trocken	25. 10. 27 regnerisch	13. 4. 28	23. 3. 29	5. 8. 29 trocken	16. 4. 31
1	25 m Flachband 3,5 × 15 mm lose aufgeschüttet	16,0	16,5	16,5	11,5	14,5	11,9	11,5
2	25 m Flachband 3,5 × 15 mm fest eingestampft	12,0	11,8	9,8	11,2	15,5	14,7	12,7
3	25 m Kupferseil 50 mm ² fest eingestampft	13,8	13,8	13,1	12,2	16,3	22,0(?)	15,0
4	25 m Flachband 3,5 × 15 mm eingeschlämmt	8,0	7,2	8,2	9,5	6,0(?)	10,0	11,3
5	25 m Flachband 3,5 × 15 mm mit Salz eingeschlämmt . . .	4,9	3,7	4,8	7,6	13,6	10,8	14,5

Zweitens: mit Hilfe einer Meßbrücke. Es gibt fabrikmäßig hergestellte Meßbrücken, die eine direkte Ablesung des Erdungswiderstandes gestatten (z. B. die von Siemens & Halske). Dieses Meßverfahren ist das übliche. Auch hier muß die Sonde einen genügend kleinen Erdungswiderstand haben, sonst bekommt man unsichere Angaben.

23. Messung des spezifischen Widerstandes des Erdreichs. Die Formeln des Abschnittes 20 erlauben, den spezifischen Widerstand des Erdreichs zu messen. Man gräbt z. B. eine Platte hochkant (Kantenlänge a) ein und mißt den Erdungswiderstand R . Der spezifische Widerstand des Erdreiches errechnet sich dann nach Gl. (7) zu

$$\rho = 4 a \cdot R . \quad (12)$$

So ergab z. B. eine Messung mit einer Meßbrücke, bei Verwendung einer quadratischen Platte von 1 m² einseitiger Oberfläche, einen Erdungswiderstand von 30 Ω . Der spezifische Widerstand war also

$$4 \cdot 1 \cdot 30 = 120 \Omega \text{ m} .$$

24. Veränderung des Erdungswiderstandes mit der Zeit. Der Erdungswiderstand ist keine konstante Größe. Er hängt in erster Linie von der Feuchtigkeit des Erdbodens ab, die dauernd schwankt. Um die Veränderung des Erdungswiderstandes in einem praktischen Fall festzustellen, wurde dieser in größeren Zeitabständen nachgemessen¹. Die Beobachtungen sind in der Zahlentafel 11 zusammengestellt. Es handelte sich um 4 Stück 25 m lange Band- bzw. Drahterder von 50 mm², die 50 cm tief eingegraben waren.

¹ Für die Messungen danke ich den Herren Dipl.-Ing. Pees und Dipl.-Ing. Werner in Wesel.

tafel 11.

Datum und Witterung											
19.5. 31	22.6. 31	23.7. 31	17.8. 31	17.9. 31	15.10. 31	7.12. 31	28.12. 31	2.2. 32	22.3. 32	16.4. 32	14.5. 32 *
9,8	9	9,8	9,2	9,8	10,7	11,6	13	11,3	13	14,2	11
11,2	10,5	11	10	11,3	11,6	13	14	14,5	16,3	15,2	11,8
13,1	14	16,3	14,2	15,8	18	17,2	18	17,4	18,7	18,0	13,0
10,3	10	11,2	10,3	11,8	12	13	14,1	14,0	13,8	16,5	11,2
12	11,5	11,9	10,7	11,4	12,5	13,1	14,2	13,5	16,6	14,0	13,2

* nach längerer Regenperiode.

Zu 1. Lose Aufschüttung des Erdreiches. Der Erdungswiderstand hat sich langsam verringert. Vermutlich, weil der Erdboden im Laufe der Zeit fester wurde.

Zu 4 und 5. Einschlämmung und Einsalzung. Der Widerstand hat zugenommen. Die Feuchtigkeit und die Salze sind in die Umgebung diffundiert.

25. Spannungsverlauf um Platten- und Rohrerder. Wir untersuchen jetzt die Spannungsverteilung in der Umgebung der Erder. Wir betrachten zunächst konzentrierte Erder (Platten- und Rohrerder). Durch einen solchen Erder fließe Strom in die Erde. Wir messen nun die Spannung von der Zuleitung (Punkt *A* der Abb. 26) nach Punkten *B* in der Umgebung des Erders. Die Punkte gleicher Spannungen liegen auf Kreisen um den Erder (Abb. 26 unten). Tragen wir die gemessene Spannung in Abhängigkeit vom Abstand vom Punkte *A* in einem rechtwinkligen Koordinatensystem auf, so erhalten wir die Abb. 27. Die Kurve steigt zunächst rasch an, der Anstieg wird dann immer schwächer und allmählich zu Null. Die Kurve erreicht damit ihre Asymptote. Wegen der Form dieser Kurve (man denke sie sich rotationsymmetrisch um die Abszissenachse) wird die nähere Umgebung eines Erders auch kurz Spannungstrichter genannt.

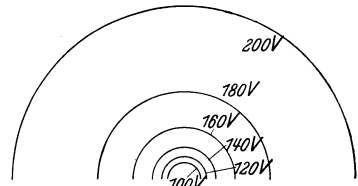
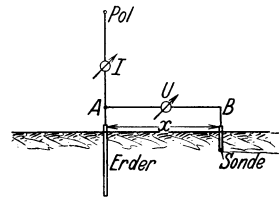


Abb. 26. Spannungsverlauf um einen konzentrierten Erder, dargestellt durch Niveau-Linien.

Der Spannungsverlauf um eine Halbkugel (Abb. 28 Kurve *a*) herum ist von Rüdénberg¹ berechnet worden:

$$U = I \cdot \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x} \right). \quad (13)$$

Hierin ist I der Erdstrom, ρ der spezifische Widerstand des Erdreiches, x der Abstand des Meßpunktes vom Mittelpunkt der Halbkugel, r deren Radius. Zur Vereinfachung verschieben wir die Kurve um das kleine Stück r nach dem Koordinatenanfang (Kurve *b*); wir schreiben also im

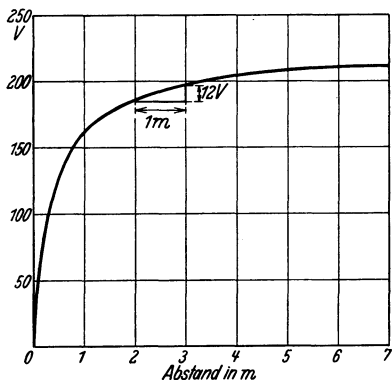


Abb. 27. Spannungsverlauf um einen konzentrierten Erder, dargestellt in einem rechtwinkligen Koordinatensystem.

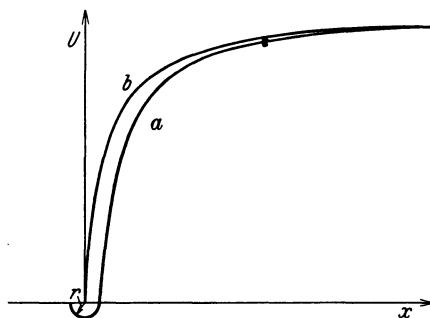


Abb. 28. Spannungsverlauf um einen Halbkugelerder. Kurve *a* nach Gl. (13), Kurve *b* nach Gl. (14).

Nenner des zweiten Bruches in der Klammer $r + x$ statt x . Die Gleichung ändert sich dann in

$$U = I \cdot \frac{\rho}{2\pi r} \cdot \frac{x}{r + x}. \quad (14)$$

Für sehr große x erhält man zunächst den gesamten Erdungswiderstand für die Halbkugel

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (15)$$

in Übereinstimmung mit Abschnitt 19. In der weiteren Umgebung um den Erder wird es für die Spannungsverteilung nicht viel Unterschied machen, ob der Strom von einer Halbkugel, von einer Platte oder von einem Rohr ausgeht. Wir verwenden also die Gl. (14) auch für den Spannungsverlauf um Rohr- und Plattenerder². r ist dann der „gleichwertige“ Radius. Er findet sich durch Vergleich der Erdungswiderstände:

Halbkugel $\rho/2\pi r$,

Platte und Rohr $C\rho/a$.

¹ Rüdénberg: Elektrische Schaltvorgänge, 1923, S. 155.

² Bei diesen beginnt der Spannungstrichter auch in Wirklichkeit bei $x = 0$.

Durch Gleichsetzung wird

$$r = \frac{a}{2\pi C}. \quad (16)$$

Der Spannungsverlauf um Halbkugeln, Platten und Rohre unterscheidet sich nur durch die Größe von r . Die Konstante C ist (von dem Faktor 2π abgesehen) der Umrechnungsfaktor der Hauptabmessung a eines konzentrierten Erders auf den Radius einer in bezug auf Erdung „gleichwertigen“ Halbkugel.

Beispiel: Es ist der Spannungsverlauf um ein Rohr von 2 m Einschlagtiefe bei einem Erdstrom von 5 A und einem spezifischen Widerstand des Erdbodens von 100 Ωm zu bestimmen.

Der gleichwertige Radius ist

$$r = \frac{a}{2\pi C} = \frac{2}{2\pi \cdot 0,9} = 0,35 \text{ m.}$$

Der Spannungsverlauf folgt laut Gl. (14) der Beziehung

$$U = 5 \cdot \frac{100}{2\pi \cdot 0,35} \cdot \frac{x}{0,35 + x} = 227 \frac{x}{0,35 + x}.$$

Abb. 29 gibt den nach dieser Gleichung gerechneten und außerdem einen gemessenen¹ Spannungsverlauf wieder.

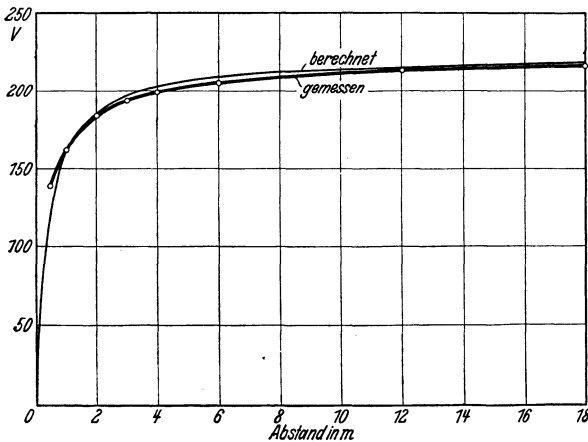


Abb. 29. Spannungsverlauf um einen Rohrerder. Vergleich zwischen Messung und Rechnung.

26. Grenze des Spannungstrichters. Bei vielen Messungen muß die Sonde außerhalb des Spannungstrichters liegen. Es soll deshalb festgestellt werden, wie weit der Spannungstrichter reicht. Als Grenze des Trichters, der sich genau genommen bis ins Unendliche erstreckt, wollen wir jene Linie (oder Fläche) festsetzen, innerhalb der 95% der Gesamt-

¹ Auf $\rho = 100 \Omega\text{m}$ umgerechnet.

spannung liegt. Ist jetzt x die Entfernung jener Grenze von einem konzentrierten Erder, so soll also sein [Gl. (14) und (15)]

$$\frac{\rho}{2\pi r} \cdot \frac{x}{r+x} = 0,95 \cdot \frac{\rho}{2\pi r},$$

das heißt

$$x = 20 r. \quad (17)$$

Die Grenze liegt 20 mal so weit als der gleichwertige Radius beträgt. Unter Benutzung der Gleichung (16) für diesen Radius reicht der Spannungstrichter

für eine Platte von	1	2	4 m ² einseitiger Oberfläche		
vom Erder	12,8	18	26 m	weit	
für ein Rohr von	1	2	3	4	5 m Länge
vom Erder	3,6	7,2	10,8	14,4	18,0 m weit

Man kann daher damit rechnen, daß der Spannungstrichter in einem Abstand von

$$20 \text{ m}$$

vom Erder praktisch zu Ende ist. Für Messungen an Rohrerdern kleiner Länge ist es jedoch gut, zu wissen, daß man oft mit viel kleineren Abständen auskommt.

27. Schrittspannung. Begibt sich ein Mensch in den Bereich eines Spannungstrichters, so durchfließt seinen Körper ein Strom nach Maßgabe der von seinen beiden Füßen während des Schreitens überbrückten Spannung. Diese Spannung wollen wir seine Schrittspannung nennen.

In Abb. 27 ist der Spannungsverlauf um einen Rohrerder gezeichnet. Bei 1 m Schrittweite z. B. beträgt die Schrittspannung zwischen dem 2. und 3. Meter Abstand 12 V. Die Schrittspannung ist von der Schrittrichtung abhängig: in Richtung des Spannungsgefälles ist sie am größten, auf einer Niveaulinie dagegen Null. Gibt die Spannungsgleichung den Spannungsverlauf auf dem Wege x wieder, so erhält man die Schrittspannung durch Differentiation nach x und Multiplikation mit der Schrittweite s . Im Falle eines konzentrierten Erders wird gemäß Gl. (14):

$$U_s = s \cdot \frac{dU}{dx} = \frac{\rho I s}{2\pi(r+x)^2}. \quad (18)$$

Genau genommen müßte man den Differenzenquotienten bilden. Diese Feinheit kompliziert bloß die Gleichungen, ohne ihren praktischen Wert wesentlich zu erhöhen.

Die größte Schrittspannung ist unmittelbar am Erder ($x = 0$):

$$U_{S \max} = \frac{\rho I s}{2 \pi r^2}.$$

Da die Gesamtspannung eines konzentrierten Erders nach Gl. (15)

$$U_E = \frac{\rho I}{2 \pi r}$$

ist, so kann die Schrittspannung auch ausgedrückt werden durch

$$U_S = U_E \cdot \frac{r s}{(r + x)^2} \quad (19)$$

und die maximale Schrittspannung ($x = 0$) durch

$$U_{S \max} = U_E \cdot \frac{s}{r}.$$

Gleichviel, ob die Gesamtspannung U_E gegen Erde oder der Erdstrom (z. B. beim Erdschluß im Hochspannungsnetz) die konstante Größe ist: mit Vergrößerung des Erders wird die Schrittspannung kleiner; bei konstantem Erdstrom ist der Einfluß quadratisch.

Bei gegebenem Strom nimmt die Schrittspannung mit größerem spezifischen Widerstand des Erdreiches zu, während der Trichterbereich in dem oben definierten Sinne davon unabhängig ist. Natürlich sind auch außerhalb des Trichters die Schrittspannungen entsprechend gestiegen.

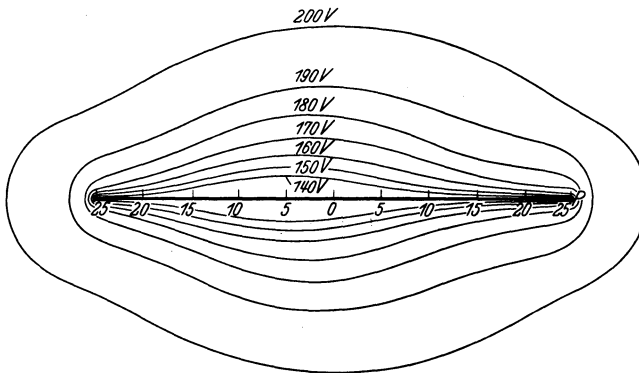


Abb. 30. Spannungsverlauf um einen Banderder (Niveaulinien).

Wir errechnen beispielsweise die maximale Schrittspannung für eine 1 m^2 -Platte, die in Ackerboden ($\rho = 100 \Omega\text{m}$) liegt und einen Strom von 3 A in die Erde leitet. Es ist nach Gl. (16)

$$r = \frac{1}{2 \pi \cdot 0,25} = 0,64 \text{ m}$$

und mit $s = 0,8 \text{ m}$

$$U_{S \max} = \frac{100 \cdot 3 \cdot 0,8}{2 \pi \cdot 0,64^2} = 94 \text{ Volt.}$$

28. Spannungsverlauf um ausgedehnte Erder. Um Band- und Draht-erder ist der Spannungsverlauf nicht nach allen Richtungen derselbe. Die spannungsgleichen Linien sind nicht mehr Kreise, sondern angenähert Ellipsen (Abb. 30), die erst in größeren Entfernungen allmählich in Kreise übergehen¹. Die Abb. 31 zeigt zwei Schnittkurven durch den „Spannungstrichter“.

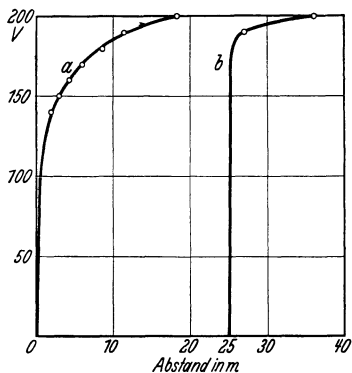


Abb. 31. Spannungsverlauf um einen Bänderer in den beiden Hauptrichtungen (im rechtwinkligen Koordinatensystem).

Die Abb. 31 zeigt zwei Schnittkurven durch den „Spannungstrichter“. Die Kurve *a* gibt den Spannungsverlauf senkrecht zur Drahtachse: die Spannung steigt allmählich und sanft an. Die Kurve *b* zeigt den Spannungsverlauf in Richtung der Drahtachse, beginnend von der Drahtmitte *O*; von *O* bis *P* ist die Spannung Null, um dann um so rascher zu steigen. Die räumlich geometrische Form des Spannungstrichters ist die einer sehr breiten Düse mit schmalen Schlitz.

Das Begehen des Spannungstrichters von *P* in Richtung der Drahtachse (vom Draht fort) ist am gefährlichsten.

VIII. Der Erdschlußstrom des Hochspannungsnetzes.

29. Der kapazitive Erdschlußstrom. Zur Berechnung der Hochspannungs-Schutzerdung und der Niederspannungs-Betriebserdung (vgl. Abschnitt 36) benötigt man die Kenntnis des Erdschlußstromes. Wir setzen zunächst voraus, daß der Sternpunkt des Hochspannungsnetzes weder direkt noch über eine Löschspule geerdet sei. Bekommt dann ein Leiter des Hochspannungsnetzes Erdschluß, so ergibt sich an der Erdschlußstelle ein Strom in die Erde, der sich über die Kapazitäten der beiden anderen Leiter zurückschließt. Ist der Widerstand der Erdschlußstelle nicht übermäßig groß, so berechnet sich der Erdschlußstrom wie folgt. Die Teilkapazität jedes der beiden gesunden Leiter gegen Erde ist

$$ks,$$

wenn *k* die Erdkapazität je Längeneinheit und *s* die Netzlänge ist. Jeder gesunde Leiter hat infolge des Erdschlusses die verkettete Spannung *U* gegen Erde, also fließt durch jede der beiden Erdkapazitäten der Strom

$$Uks\omega,$$

wobei $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz ist. Die beiden Kapazitätsströme setzen sich unter 120° Phasenverschiebung zusammen, so daß der gesamte Erdschlußstrom, der über die Fehlerstelle fließt, die Größe hat

$$I_e = U\sqrt{3}ks\omega.$$

¹ Die Kurven geben eine Messung wieder. Die Kurven sind unsymmetrisch.

In Hochspannungsnetzen ist k in erster Annäherung unabhängig von Höhe, Abstand, Durchmesser und Anordnung der Leiter. Es ist ungefähr

$$k = 4,5 \cdot 10^{-9} \text{ Farad/km,}$$

also mit $\omega = 2\pi \cdot 50 = 314/\text{sek}$

$$I_e = \frac{Us}{400}, \quad (20)$$

wobei U die verkettete Spannung in kV, s die Netzlänge in Kilometern und I_e der Erdschlußstrom in Ampere ist. Diese Formel gilt für Einfachleitungen. Für Doppelleitungen ist die Netzlänge doppelt einzusetzen.

Diese Faustformeln geben natürlich nur angenäherte Werte. Auch ist kein Unterschied gemacht, ob Erdseile vorhanden sind oder nicht.

Netze mäßiger Hochspannung (und entsprechend kleinen Ausdehnungen) haben Erdschlußströme von einigen Dutzend Ampere. In Netzen von 100 kV und entsprechend großen Netzlängen erreicht der Erdschlußstrom jedoch Beträge von mehreren hundert Ampere.

Kabel haben erheblich höhere Kapazitäten, und die Erdkapazität ist auch nicht annähernd mehr konstant. Je nach Spannung und Leiterquerschnitt bewegt sich k etwa zwischen 60 und $250 \cdot 10^{-9}$ Farad je km. Der Erdschlußstrom von Drehstromkabeln liegt also bei 50 Perioden pro Sekunde zwischen

$$\frac{Us}{30} \quad \text{und} \quad \frac{Us}{7}.$$

Als ganz rohen Mittelwert kann man etwa annehmen

$$I_e = \frac{Us}{20}. \quad (21)$$

Der Erdschlußstrom in Kabeln ist also etwa 20 mal so groß als bei Freileitungen. Nachstehende Zahlentafel macht etwas genauere Angaben.

Zahlentafel 12.

Querschnitt	Erdschlußstrom in Ampere je 100 km					
	5 kV	10 kV	15 kV	20 kV	25 kV	30 kV
$3 \times 25 \text{ mm}^2$	33	49	63			
$3 \times 50 \text{ mm}^2$	43	63	82	99	113	119
$3 \times 95 \text{ mm}^2$	53	79	102	124	142	157
$3 \times 150 \text{ mm}^2$	60	93	120	144	163	180

30. Der Reststrom. Durch Herabsetzung des Erdschlußstromes kann man, wie im Abschnitt 31 dargelegt wird, auch mit schlechteren Erdungen auskommen. Deswegen sind Einrichtungen, die den Erdschlußstrom verkleinern — Löserspulen (Erdschlußlöschvorrichtungen) — auch vom Erdungsstandpunkt sehr zu empfehlen. Die bekannteste Lösch-

vorrichtung — die Petersen-Spule — ist eine Drosselspule, die zwischen Sternpunkt des Transformators und Erde geschaltet ist. Die Wirkungsweise besteht darin, daß die beiden Kapazitätsströme der gesunden Leiter jetzt nicht mehr über die Erdschlußstelle ins Netz zurückfließen, sondern über die Löschdrossel. Über die Fehlerstelle fließt nur noch ein unkompensierter Rest, herrührend von der Wirkkomponente des Erdschlußstromes und von den Oberwellen. Dieser Reststrom hat etwa die Größenordnung von

$$10\%$$

des (unkompensierten) kapazitiven Erdschlußstromes.

Zahlenbeispiel. Für ein 25 kV-Netz von 900 km Länge soll der Erdschlußstrom ermittelt werden. Es handele sich um Einfachleitungen, so daß der Erdschlußstrom gemäß Gleichung (20) die Größe

$$\frac{25 \cdot 900}{400} = 56 \text{ A}$$

hat.

Eine Löschspule würde den Erdschlußstrom auf etwa 10%, also auf 5,6 A herabsetzen.

31. Bemessung der Schutzerdung in Hochspannungsanlagen. Beim Auftreten von Erdschlüssen in Hochspannungsanlagen können der Berührung zugängliche Anlageteile (Gehäuse von Maschinen, Kessel von Transformatoren, Handräder von Ölschaltern, eiserne Gerüste von Schaltanlagen usw.) eine unzulässig hohe Berührungsspannung annehmen. In Anlagen mit Betriebsspannungen von 1000 V und darüber werden höhere Berührungsspannungen als in Anlagen unter 1000 V zugelassen, und zwar

$$125 \text{ V.}$$

Diese Grenze ist jedoch nicht streng vorgeschrieben, sondern nach § 4 der V.E.S. 2 „anzustreben“. Der Erdungswiderstand soll also möglichst den Wert

$$\frac{125 \text{ V}}{\text{Erdschlußstrom}} \quad (22)$$

nicht überschreiten. In diese Formel ist der wirklich auftretende Erdschlußstrom einzusetzen; bei Vorhandensein von Erdschlußlöschvorrichtungen also der Reststrom.

Durch die Kompensierung des Erdschlußstromes kann also der Widerstand der Hochspannungsschutzerdung etwa zehnmal so groß (die Erdung somit zehnmal so billig) sein als ohne Kompensation.

Wegen der Unsicherheit in der Abstimmung der Löschinduktivität (z. B. bei Abschaltung von Leitungsabschnitten) gestatten übrigens die Schweizer Vorschriften — im Gegensatz zu den deutschen — nicht, die Erdschlußkompensation bei Bemessung der Erdung zu berücksichtigen.

Spannung über 65 V erhält, die er auf alle genullten Anlageteile übertragen würde (vgl. Abschnitt 53).

Die Nullpunktserdung hat also stets unmittelbar zu erfolgen.

35. Betriebserdung am Außenleiter (Außenleitererdung). Ist kein Nullpunkt vorhanden, so ist ein Außenleiter unmittelbar oder über eine Durchschlagssicherung zu erden. Die direkte Erdung ist vorzuziehen, da dann klarere Netzverhältnisse vorliegen. Erdschlüsse z. B. werden schneller erkannt bzw. abgeschaltet.

36. Bemessung der Betriebserdung. Hierfür sind zwei Gesichtspunkte maßgebend:

a) Rücksicht auf einen Übertritt der Hochspannung auf die Niederspannungsseite,

b) Rücksicht auf einen Erdschluß auf der Niederspannungsseite.

a) Bei einem Übertritt der Hochspannung auf die Niederspannungsseite (bei einem Überschlag oder Durchschlag) fließt der Erdschlußstrom I_e des Hochspannungsnetzes über die Fehlerstelle in das Niederspannungsnetz und von dort über die Betriebserdung zur Erde. Ist eine Durchschlagssicherung vorhanden, so wird diese hierbei durchgeschlagen. Der Erdschlußstrom I_e erzeugt an der Betriebserdung R_0 eine Spannungsstauung von der Größe $I_e R_0$. Wenn wir nun verlangen, daß bei einem solchen Übertritt der Hochspannung die Betriebserdung keine höhere Spannung als 125 V gegen Erde annimmt¹, so darf die Betriebserdung keinen größeren Widerstand haben als

$$R_0 = \frac{125 \text{ V}}{I_e}. \quad (23)$$

Besteht die Betriebserdung aus mehreren parallelen Erdungen, so braucht natürlich nur der Kombinationswiderstand diesen Wert zu haben.

Meist wird der Erdschlußstrom die Hochspannungssicherung der Netzstation durchfließen. Ist nun deren Abschaltstromstärke I'_a kleiner als der Erdschlußstrom I_e , so wird die Sicherung hinreichend schnell ansprechen. Der Bemessung der Betriebserdung kann man statt I_e dann I'_a zugrunde legen:

$$R_0 = \frac{125 \text{ V}}{I'_a}. \quad (24)$$

¹ Diese 125 V überlagern sich der Spannung des Niederspannungsnetzes, deren Isolation dieser Spannungserhöhung im allgemeinen auch gewachsen ist. Nur falls ein Leiter (gewöhnlich also der Nulleiter) zur Nullung verwendet wird, tritt eine Berührungsspannung von 125 V auf. Diese Spannung wird wegen der Seltenheit solcher Spannungsübertritte zugelassen (vgl. Abschnitt 31 über 125 V als zulässige Berührungsspannung in Hochspannungsanlagen).

Hierbei wird also vorausgesetzt, daß der Erdschlußstrom beim Übertritt auf die Niederspannungsseite die Hochspannungssicherung durchfließen muß. Ist dies nicht sicher, so muß die Gl. (23) benutzt werden.

Beispiel. Der kapazitive (unkompensierte) Erdschlußstrom eines 25 kV-Netzes sei 56 A (vgl. Abschnitt 30). Die Abschaltstromstärke der Hochspannungssicherung sei $2,5 \times 5 = 12,5$ A. Eine Erdschlußlöschvorrichtung sei nicht vorhanden. Es bestehe die Möglichkeit, daß beim Übertritt der Hochspannung die Hochspannungssicherung nicht durchflossen werde. Die Betriebserdung muß dann die Größe haben:

$$R_0 = \frac{125 \text{ V}}{I_e} = \frac{125 \text{ V}}{56 \text{ A}} = 2,2 \Omega .$$

Ist man jedoch sicher, daß der Erdschlußstrom die Sicherung passieren muß, dann genügt ein Widerstand von

$$R_0 = \frac{125 \text{ V}}{I'_a} = \frac{125 \text{ V}}{12,5 \text{ A}} = 10 \Omega .$$

Kompensiert man das Netz mit einer Löschspule, z. B. einer Petersen-Spule, und bleibt ein (unkompensierter) Reststrom von 5 A, so genügt, da jetzt $I_e < I'_a$ ist, eine Betriebserdung von

$$R_0 = \frac{125 \text{ V}}{I_e} = \frac{125 \text{ V}}{5 \text{ A}} = 25 \Omega .$$

Die Erdschlußkompensation liefert hier also die billigste Erdung.

b) Rücksicht auf einen Erdschluß auf der Niederspannungsseite. α) Wir betrachten zunächst ein Netz mit unmittelbarer Nullpunktserdung. Bei einem Erdschluß eines Außenleiters steigt die Spannung der gesunden Außenleiter. Von dieser Spannung hängt der Umfang der Schutzmaßnahmen ab. Um diesen nicht unnötig zu vergrößern, ist die Betriebserdung so zu bemessen, daß die Spannung der Außenleiter gegen Erde nicht über die Grenzspannung 150 bzw. 250 V steigt (vgl. Abschnitt 12).

Damit in einem 220/127 V-Netz die Spannung eines Außenleiters 150 V nicht überschreitet, darf der Nullpunkt sich nur um 38,5 V verschieben. Denn es ist in Abb. 32

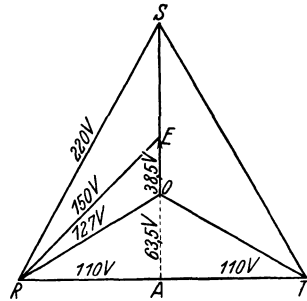


Abb. 32. Nullpunktverschiebung in einem 220/127 V-Netz bei Erdschluß.

$$AE = \sqrt{150^2 - 110^2} = 102 \text{ V}$$

und

$$OE = 102 - 63,5 = 38,5 \text{ V}.$$

Damit in einem 380/220 V-Netz die Spannung eines Außenleiters gegen Erde 250 V nicht überschreitet, darf der Nullpunkt sich nur um 52,5 V verschieben. Denn es ist in Abb. 33

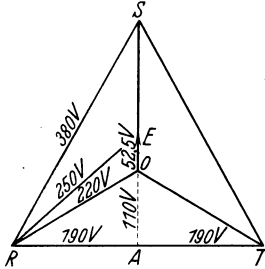


Abb. 33. Nullpunktverschiebung in einem 380/220 V-Netz bei Erdschluß.

$$AE = \sqrt{250^2 - 190^2} = 162,5 \text{ V}$$

und

$$OE = 162,5 - 110 = 52,5 \text{ V.}$$

Zur Bestimmung des Widerstandes der Betriebserdung besprechen wir die Schutzmaßnahmen einzeln.

Schutzerdung. Hier muß man damit rechnen, daß ein Erdschluß dadurch entsteht, daß ein geerdeter Stromverbraucher Körperschluß bekommt. Der größte im Netz vorkommende oder zu erwartende Stromverbraucher sei mit einer Sicherung von der Abschaltstromstärke $I_{a \max}$ abgesichert (Abb. 34). Dies ist der größte Strom, der „kurze Zeit“ (d. h. etwa eine halbe Minute) bestehen bleiben kann. Dieser Strom schließt sich über die Betriebserdung zurück. Diese darf also, damit die Spannungsverlagerung nicht größer als U_0 ist, höchstens einen Widerstand von

$$R_0 = \frac{U_0}{I_{a \max}}$$

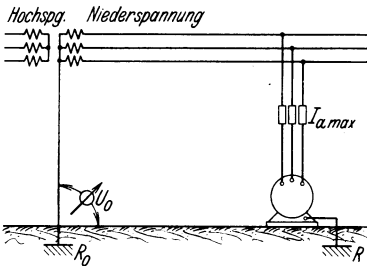


Abb. 34. Zur Bemessung der Betriebserdung. Schutzerdung in den Anschlußanlagen.

haben. Um außer mit der Spannungsgrenze von 65 V nicht noch mit den Grenzen 38,5 und 52,5 V rechnen zu müssen, lassen wir in den beiden Fällen eine Nullpunktverschiebung von 65 V zu. Dann wird allerdings die Außenleiterspannung bei Erdschluß etwas über 150 bzw. 250 V steigen. Die Differenz ist aber im ersten Falle nur etwa 20 V und im zweiten etwa 10 V.

Wir legen also fest: damit die Spannungen gegen Erde nicht wesentlich über 150 bzw. 250 V steigen können, dürfen sich die Nullpunkte höchstens um 65 V verschieben. Mit dieser Verschiebung um 65 V wollen wir jedoch nur bei der Schutzerdung rechnen; bei den anderen Schutzmaßnahmen legen wir die genaueren Werte zugrunde.

Die Betriebserdung ist also nach der Gleichung zu bemessen:

$$R_0 = \frac{65 \text{ V}}{I_{a \max}}. \quad (25)$$

Nullung. Da Schutzerdungen ohne Verbindung mit dem Nulleiter nicht zulässig sind (vgl. Abschnitt 60), werden sattere Erdschlüsse als

etwa über 5Ω kaum vorkommen. Also darf die Betriebserdung keinen größeren Widerstand haben als (Abb. 35)

$$R_0 = \frac{U_0}{U_{ph} - U_0} \cdot R,$$

worin U_{ph} die Phasenspannung bedeutet.

In einem 220/127 V-Netz ist also

$$R_0 = \frac{38,5 \cdot 5}{127 - 38,5} \approx 2 \Omega$$

und in einem 380/220 V-Netz ebenfalls

$$R_0 = \frac{52,5 \cdot 5}{220 - 52,5} \approx 2 \Omega.$$

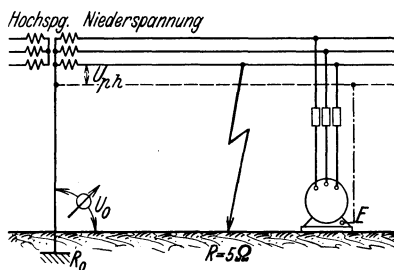


Abb. 35. Zur Bemessung der Betriebserdung. Nullung in den Anschlußanlagen.

Bei Anwendung der Nullung darf außerdem der Nulleiter keine höhere Spannung als 65 V annehmen, da diese Spannung auf alle genullten Anlagenteile übertragen wird. Macht man den Widerstand der Betriebserdung wie eben angegeben nicht größer als 2Ω , so bleibt die Nulleiterspannung stets unter 65 V (nämlich in dem einen Falle 38,5 und in dem anderen 52,5 V).

β) Ist ein Außenleiter unmittelbar geerdet, so ist die Güte dieser Betriebserdung ohne Einfluß auf die größtmögliche Spannung gegen Erde; diese ist immer gleich der verketteten Spannung. Wir besprechen die verschiedenen Schutzmaßnahmen wieder einzeln.

Schutzerdung. Mit Rücksicht auf einen Körperschluß kann also die Betriebserdung beliebig gut oder schlecht sein. Da aber, wie wir im Abschnitt 46 sehen werden, der Widerstand $R + R_0$ im Fehlerstromkreis so klein gehalten werden muß, daß eine Abschaltung erfolgt, so werden die Schutzerdungen um so billiger, je besser die Betriebserdung ist. Da die Betriebserdung nur einmal, die Schutzerdungen vielfach vorkommen, ist der Gesamtaufwand am niedrigsten, wenn die Betriebserdung möglichst gut gemacht wird. Da an sich die Güte der Betriebserdung beliebig ist, schreiben wir für sie der Einfachheit halber (aber willkürlich) denselben Wert vor wie in Gl. (25):

$$R_0 = \frac{65 \text{ V}}{I_{a \max}} \quad (26)$$

Nullung. Beim Erdschluß eines Außenleiters darf die Spannung des geerdeten Außenleiters, an dem genullt wird, nicht über 65 V steigen. Es kommen hier hauptsächlich Drehstromnetze von $3 \times 220 \text{ V}$ in Betracht. Setzt man wieder keine satteren Erdschlüsse als über 5Ω

voraus, so darf die Betriebserdung nicht schlechter sein als

$$R_0 = \frac{65}{220 - 65} \cdot 5 = 2 \Omega,$$

also genau so groß wie bei unmittelbarer Nullpunktserdung (vgl. unter α).

Schutzschaltung. Bei Anwendung der Schutzschaltung kommt es im Falle α und im Falle β darauf an, ob neben ihr die Schutzerdung oder die Nullung angewendet wird. Diese bestimmen R_0 .

γ) Ist schließlich ein Außenleiter über eine Durchschlagssicherung angeschlossen, so ist mit Rücksicht auf einen Erdschluß auf der Niederspannungsseite die Güte der Betriebserdung wie unter β gleichgültig, da die größtmögliche Spannung gegen Erde stets gleich der verketteten Spannung ist. Eine Rücksichtnahme auf Schutzerdungen in den Anschlußanlagen ist (im Gegensatz zu β) nicht erforderlich, da diese Erdungen nach einem anderen Gesichtspunkt bemessen werden (vgl. Abschnitt 44). Eine Rücksicht auf Nullungen kommt nicht in Frage, da diese Schutzmaßnahme nur in Netzen mit unmittelbarer Betriebserdung zulässig ist.

Zweiter Teil.

Schutzmaßnahmen.

Wir wenden uns nun den Schutzmaßnahmen selbst zu, die wir in zwei große Gruppen einteilen. Die erste umfaßt die Isolierung und die Kleinspannung; zur zweiten gehören die Erdung, die Nullung und die Schutzschaltung. Obwohl diese Schrift nur der zweiten Gruppe gewidmet ist, werden wir die erste wenigstens kurz erwähnen.

37. Benennungen. Wir wollen zunächst einige Benennungen festlegen (Abb. 41):

Die Leiter R , S , T heißen Außenleiter;

der Verkettungspunkt der drei Wicklungen, die zu einer Sternschaltung zusammengeschaltet sind, heißt Nullpunkt oder Sternpunkt;

der vom Nullpunkt ausgehende Leiter: Nulleiter;

die Spannung zwischen den Außenleitern heißt verkettete Spannung oder Betriebsspannung;

die Spannung eines Drehstromnetzes dividiert durch $\sqrt{3}$ heißt Sternspannung;

die Spannung einer der Phasenwicklungen eines Drehstromtransformators (oder Drehstrommaschine) heißt Phasenspannung¹.

¹ In Elektrizitätswerkskreisen wird vielfach unter Phasenspannung die Spannung zwischen den Phasen (Außenleitern) verstanden.

X. Isolierung.

38. Grundgedanke. Diese nächstliegende Schutzmaßnahme besteht darin, daß außer der normalen Isolierung der stromführenden Teile eine weitere Isolierung vorhanden ist, die verhindert, daß bei Beschädigung der ersteren (Körperschluß) die Außenteile der Maschinen, Geräte, Apparate u. dgl. unter Spannung kommen. Der Schutz durch Isolierung kann auf drei verschiedene Arten erreicht werden:

1. Metallteile, die Spannung annehmen können, werden durch Isolierstoff ersetzt, z. B. Stehleuchter aus Isolierstoff.

2. Metallteile werden mit Isolierstoff umpreßt, z. B. Schaltergriffe und Handräder.

3. Fußboden, Wände werden mit Isolierstoff belegt, z. B. mit Gummimatten.

Geräte mit einem Schutz gemäß 1 oder 2 sind, falls der Schutz mechanisch und elektrisch genügend fest ist, Geräten vorzuziehen, die erst mit einer der anderen Schutzmaßnahmen geschützt werden müssen. Leider können noch lange nicht alle Arten von Stromverbrauchern, elektrischen Maschinen, Apparaten, Geräten u. dgl. durch Isolierung geschützt werden.

XI. Kleinspannung.

39. Grundgedanke. Diese Schutzmaßnahme benützt nur Spannungen von ungefährlicher Höhe. Sie besteht darin, daß zwischen dem Netz und der Verbraucheranlage ein Transformator (der Schutztransformator) oder ein Umformer geschaltet wird, um die Netzspannung auf eine Spannung von höchstens 42 V herabzusetzen. Solche Spannungen heißen Kleinspannungen und sind genormt mit

24 V und 42 V.

40. Bedingungen. Für die Konstruktion und Prüfung von Schutztransformatoren mit Kleinspannungen gelten besondere Regeln¹. Die Ober- und Unterspannungswicklung der Schutztransformatoren und Umformer müssen elektrisch voneinander getrennt sein; es darf also z. B. bei Transformatoren keine Sparschaltung verwendet werden. Auf zuverlässige Isolierung der beiden Wicklungen muß besondere Sorgfalt gelegt werden, da natürlich sonst der ganze Schutz illusorisch ist. Besteht das Gehäuse des Schutztransformators, wie üblich, aus Metall, so muß

1. der Schutzwandler entweder in einem Raum untergebracht werden, in dem Schutzmaßnahmen nicht erforderlich sind (vgl. Abschnitt 12),

¹ Regeln für die Konstruktion und Prüfung von Schutztransformatoren mit Kleinspannungen, R.E.T.K.

2. oder der Schutzwandler muß außer Handbereich liegen,
3. oder sein Metallgehäuse muß durch eine andere Schutzmaßnahme gegen unzulässige Berührungsspannung geschützt werden (isolierender Fußbodenbelag, Wandbelag, Erdung, Nullung, Schutzschaltung).

Nach § 13 der V.E.S. 1 dürfen Stecker für Kleinspannungen nicht in Dosen für höhere Spannungen passen.

Es sind nur Installationsmaterial (Schalter, Steckvorrichtungen, Leitungen usw.) und Geräte für mindestens 250 V zu verwenden.

41. Anwendungsgrenzen. Infolge der niedrigen Spannung kann die Kleinspannung nur für räumlich beschränkte Anlageteile Verwendung finden.

42. Anwendungsgebiet. Kleinspannung wird hauptsächlich angewendet für Handlampen, die in Kesseln verwendet werden sollen, für FaBausleuchter und für Kinderspielzeuge¹. Für diese drei Zwecke ist nur die Schutzmaßnahme der Kleinspannung zugelassen, und zwar für Handlampen und andere Geräte in Kesseln Spannungen bis 42 V, für Kinderspielzeuge bis 24 V.

XII. Die Schutzerdung.

43. Grundgedanke. Im Kapitel II und III wurde gezeigt, daß bei Körperschluß eines Stromverbrauchers und bei leitfähigem Fußboden stets mit dem Auftreten von Berührungsspannungen gerechnet werden muß. Um diese Spannung zu beseitigen, wird sie „kurzgeschlossen“, indem der Metallteil, der Spannung bekommen kann, mit der Erde verbunden wird.

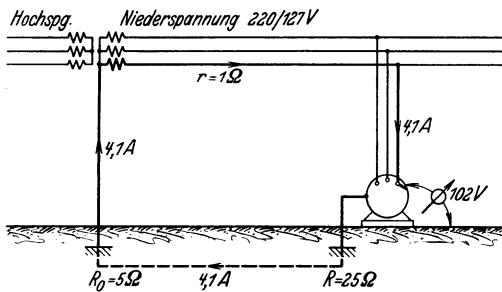


Abb. 36. Eine Schutzerdung beliebiger Abmessung genügt nicht, um eine unzulässig hohe Berührungsspannung zu beseitigen.

Diese Erdung wird zur Unterscheidung von der Betriebserdung Schutz-

erdung genannt: die Betriebserdung liegt am Netz, die Schutzerdung am Stromverbraucher.

Die Schutzerdung muß so bemessen werden, daß bei Körperschluß entweder die Berührungsspannung auf 65 V heruntergeht, oder daß, falls dies nicht möglich ist, die vorgeschaltete Sicherung abschmilzt.

Wir zeigen zunächst an einem Beispiel, daß nicht eine Erdung belie-

¹ Elektrisch beheizte Spielzeuge dürfen mit Spannungen über 24 V betrieben werden. Vgl. die ab 1. Januar 1933 geltenden Vorschriften für Elektrowärme-geräte für Spannungen bis 250 V gegen Erde, V.W.G.

biger Abmessung genügt. Wir wählen ein Netz von 220/127 V ohne Nulleiter (Abb. 36). Die Betriebserdung liege am Nullpunkt der Sekundärwicklung des Stationstransformators; der Stromverbraucher, der geschützt werden soll, sei ein Motor. Die Erdung bestehe in einer Platte von 1 m² einseitiger Oberfläche¹. Der Boden sei Lehmboden mit einem spezifischen Widerstand von 100 Ωm. Nach Zahlentafel 8 ist der Erdungswiderstand einer solchen Platte

$$0,25 \cdot \frac{100}{1} = 25 \Omega .$$

Der Widerstand des betroffenen Außenleiters sei 1 Ω und der Widerstand der Betriebserdung 5 Ω, die Induktivität des Stromkreises sei zunächst vernachlässigt. Dann fließt ein Erdstrom von

$$\frac{127}{25 + 1 + 5} = 4,1 \text{ A} .$$

Die Spannung gegen Erde geht also von 127 V auf

$$4,1 \cdot 25 = 102 \text{ V}$$

zurück. Die Berührungsspannung, auf die es allein ankommt, ist zwar kleiner als 102 V; da es sich aber um einen feuchten Raum handelt², ist der Unterschied zwischen der Spannung gegen Erde und der Berührungsspannung gering. Bei der Berechnung der Erdung (aber nicht bei der Messung der Berührungsspannung) werden künftig die beiden Spannungen gleichgesetzt. Wir sind also noch weit von den angestrebten 65 V entfernt und erkennen, daß die obige Erdung mit der 1 m²-Platte keinesfalls genügt. Hierbei ist Ackerboden vorausgesetzt, der noch verhältnismäßig gut leitet.

Welchen Widerstand muß also die Erdung haben? Die Bemessung der Schutzerdung ist verschieden, je nach der Art der Betriebserdung. Wir unterscheiden folgende Fälle:

1. unmittelbare Nullpunkterdung;
2. unmittelbare Außenleitererdung;
3. Außenleitererdung über eine Durchschlagssicherung.

Wir besprechen zunächst den 3. Fall.

44. Bemessung der Schutzerdung in Netzen, in denen ein Außenleiter über eine Durchschlagssicherung geerdet ist. In diesem Fall schließt sich der Erdstrom (wenn die Durchschlagssicherung intakt ist³) über Isolations-

¹ Nach den Schweizer Vorschriften soll eine solche Platte für die Schutzerdung ausreichen.

² In trockenen Räumen sind andererseits keine Schutzmaßnahmen erforderlich (Genauerer siehe Abschnitt 12).

³ Die Ausführungen dieses Abschnittes gelten allgemein, ganz gleich, ob die Durchschlagssicherung durchgeschlagen ist oder nicht.

fehler mit unbekanntem Widerständen zurück. Der Fehlerstromkreis läßt sich daher nicht auf Abschaltung berechnen. Früher glaubte man daher allgemein, daß in einem solchen Fall die Vorausberechnung einer Schutzerdung unmöglich sei. Dies ist jedoch nicht der Fall. Wir wollen zeigen, daß eine Bemessung nach der Formel

$$R = \frac{65 \text{ V}}{I_a} \quad (\text{Hauptformel für die Schutzerdung}) \quad (27)$$

stets zum Ziel führt. Der Erdschlußstrom ist unbekannt, seine Größe I kann sein

1. $I < I_a$,
2. $I = I_a$,
3. $I > I_a$.

Da die Berührungsspannung stets $U_B = IR$ ist, wird in den drei Fällen:

1. $U_B < I_a \cdot R$,
2. $U_B = I_a \cdot R$,
3. $U_B > I_a \cdot R$

und in Verbindung mit der Bemessungsformel $R = 65 \text{ V}/I_a$:

1. $U_B < 65 \text{ V}$,
2. $U_B = 65 \text{ V}$,
3. $U_B > 65 \text{ V}$.

Nur im 3. Fall überschreitet die Berührungsspannung die zulässige Grenze. In diesem Fall ist aber der Fehlerstrom größer als die Abschaltstromstärke ($I > I_a$); das hat zur Folge, daß die unzulässige Berührungsspannung nach kurzer Zeit abgeschaltet wird, also nur kurze Zeit bestehen bleibt.

Damit ist bewiesen, daß die Bemessung nach der Formel (27) stets vorschriftsmäßige Schutzerdungen liefert. Diese Formel kann auch bei unmittelbarer Betriebserdung angewendet werden, liefert aber hier gelegentlich etwas teurere Erdungen. Wir nennen diese Bemessungsformel die „Hauptformel“ für die Schutzerdung.

45. Bemessung der Schutzerdung bei unmittelbarer Nullpunktserdung¹. Es kommen in erster Linie Netze von 380/220 V und 220/127 V in Frage. Sieht man vom Widerstand des Außenleiters ab, der im allgemeinen klein gegen die Erdungswiderstände ist, so verteilt sich die Phasenspannung von 220 V bzw. 127 V auf die beiden Erdungen R_0 und R (vgl. Abb. 36). Bei Gleichheit dieser beiden entfällt auf jede die halbe

¹ Nach Abschnitt 34 hat die Nullpunktserdung stets unmittelbar zu erfolgen.

Phasenspannung, also 110 V bzw. 63,5 V; bei Ungleichheit ist eine der beiden Spannungen größer. Fast immer ist es so, daß die Betriebserdung mit geringerem Widerstand ausgeführt ist als die Schutzerdung. Wir können also sagen: Die Berührungsspannung an dem geerdeten Anlageteil wird die zulässige Grenze praktisch immer überschreiten. Die Erdung erfüllt somit nur dann ihren Zweck, wenn die Sicherung des Stromverbrauchers zum Ansprechen gebracht und auf diese Weise die Fehlerstelle abgeschaltet wird. Soll die Abschaltung auch noch in hinreichend kurzer Zeit erfolgen, so muß hierbei die Abschaltstromstärke I_a zum Fließen kommen; es muß also der Fehlerstrom

$$\frac{U}{R_0 + R}$$

gleich oder größer als der Abschaltstrom I_a sein. Außenleiterwiderstand und Induktivität des Stromkreises sind wieder vernachlässigt. U ist die den Fehlerstrom „treibende Spannung“, also hier die Phasenspannung.

Der Widerstand der Schutzerdung darf also höchstens sein:

$$R = \frac{U}{I_a} - R_0. \quad (28)$$

Je größer also der Widerstand der Betriebserdung ist, um so kleiner muß der der Schutzerdung sein. Der Widerstand der Betriebserdung ist nach Gl. (25)

$$R_0 = \frac{65 \text{ V}}{I_{a \max}},$$

worin $I_{a \max}$ die Abschaltstromstärke der größten Sicherung ist, hinter der geerdet ist.

Wir betrachten die beiden hier in Betracht kommenden wichtigsten Netze getrennt:

a) 380/220 V-Netze. Die Schutzerdung darf also keinen höheren Widerstand haben als

$$R = \frac{220 \text{ V}}{I_a} - \frac{65 \text{ V}}{I_{a \max}}.$$

Wir nehmen den ungünstigsten Fall, nämlich $I_{a \max} = I_a$. Dann ist:

$$R = \frac{155 \text{ V}}{I_a}.$$

Bei der Ableitung dieser Formel haben wir den Widerstand des Außenleiters und die Induktivität des Stromkreises vernachlässigt; der Erdungswiderstand muß also noch wesentlich geringer als eben er-

rechnet sein. Wir berücksichtigen diese beiden Vernachlässigungen, indem wir den Widerstand um 30% kleiner bemessen:

$$R = \frac{110 \text{ V}}{I_a}. \quad (29)$$

Sollte die Bemessung der Betriebserdung mit Rücksicht auf einen Übertritt der Hochspannung zu einem kleineren R_0 als Gl. (25) geführt haben, so würde der Erdstrom (Fehlerstrom) größer, die Abschaltung also schneller erfolgen.

b) 220/127 V-Netze. Die Bemessung der Schutzterdung geschieht wieder nach der Formel:

$$R = \frac{U}{I_a} - R_0 = \frac{127 \text{ V}}{I_a} - \frac{65 \text{ V}}{I_{a \max}}.$$

Wiederum $I_a = I_{a \max}$ gesetzt (ungünstigster Fall):

$$R = \frac{62 \text{ V}}{I_a}.$$

Nach der Hauptformel genügt aber stets

$$R = \frac{65 \text{ V}}{I_a}, \quad (30)$$

so daß wir natürlich diese Gleichung zugrunde legen.

Bei der Herleitung der Gl. (29) und (30) haben wir vorausgesetzt, daß die drei Außenleiter vollkommen isoliert sind. Hat aber der Außenleiter R einen mehr oder weniger satten Erdschluß, so steigt die Spannung der Leiter S und T gegen Erde. Ein angeschlossener Stromverbraucher, der in der Phase S oder T Körperschluß hat, führt dann durch seine Erdung einen größeren Fehlerstrom, und die Abschaltung

der Sicherung wird schneller erfolgen. Die Erdschlußfreiheit der Außenleiter ist also der ungünstigere Fall; wir haben ihn deswegen der Ableitung zugrunde gelegt. (Bei der Messung der Berührungsspannung liegt der ungünstigere Fall dann vor, wenn ein Außenleiter Erdschluß hat; vgl. Abschnitt 10).

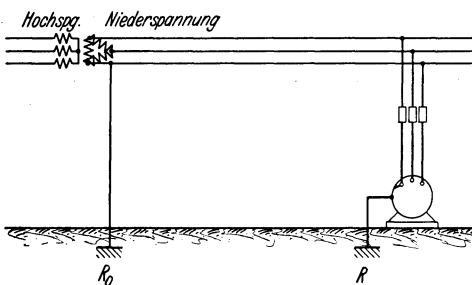


Abb. 37. Zur Bemessung der Schutzterdung bei unmittelbarer Außenleiterterdung.

46. Bemessung der Schutzterdung bei unmittelbarer Außenleiterterdung. Wir betrachten jetzt den Fall, daß die Betriebserdung nicht an den Nullpunkt des Netzes, sondern an einen Außenleiter angeschlossen ist (Abb. 37). Dieser Fall wird nur in Netzen vorkommen, in denen die Sekundärwicklung des Transformators keinen Nullpunkt hat (Dreieck-

schaltung). Es kommen also nur Netzspannungen in Frage bis höchstens 220 V. Wir wiederholen unsere Rechnung von vorhin. Sie unterscheidet sich von dieser nur darin, daß die treibende Spannung U nicht die Phasenspannung, sondern die verkettete Spannung (Spannung zwischen den Außenleitern) ist. Es sei wiederum $I_{a\max}$ die Abschaltstromstärke der Sicherung des größten im Netz vorkommenden oder zu erwartenden geerdeten Stromverbrauchers.

Um eine Abschaltung zu erreichen, muß der Widerstand der Schutzerdung sein:

$$R = \frac{U}{I_a} - R_0.$$

Die Betriebserdung habe gemäß Gl. (26) wieder den Widerstand

$$R_0 = \frac{65 \text{ V}}{I_{a\max}},$$

also

$$R = \frac{U}{I_a} - \frac{65 \text{ V}}{I_{a\max}}.$$

Der ungünstigste Fall ist wieder $I_a = I_{a\max}$; es wird also

$$R = \frac{U - 65 \text{ V}}{I_a}.$$

Wir betrachten die beiden wichtigsten Netze wieder einzeln:

a) $3 \times 220 \text{ V}$ -Netze:

$$R = \frac{220 - 65}{I_a} = \frac{155 \text{ V}}{I_a}.$$

Um den Spannungsabfall im Außenleiter und den induktiven zu berücksichtigen, machen wir wieder einen Abzug von 30%. Es ist also

$$R = \frac{110 \text{ V}}{I_a}. \quad (31)$$

b) $3 \times 110 \text{ V}$ -Netze:

$$R = \frac{110 - 65}{I_a} = \frac{45 \text{ V}}{I_a}.$$

Nach der Hauptformel genügt aber stets der Widerstand

$$R = \frac{65 \text{ V}}{I_a}, \quad (32)$$

den wir also zugrunde legen.

Die vier Gleichungen (29) bis (32) können wir zusammenfassen. Im Zähler steht bis auf kleine Differenzen im Falle (30) und (32) die halbe den Fehlerstrom treibende Spannung. Wir können also sagen: Bei Vorhandensein einer unmittelbaren Betriebserdung ist eine Schutzerdung

zu bemessen nach der Formel¹

$$\frac{\text{halbe treibende Spannung}}{\text{Abschaltstrom}} \quad (33)$$

Die Gleichung wollen wir, da sie nur einen beschränkten Anwendungsbereich hat (gültig nur bei unmittelbarer Betriebserdung), die „Nebenformel für die Schutzerdung“ nennen.

47. Vergleich zwischen Haupt- und Nebenformel. Wie aus der Ableitung hervorgeht, ist die Hauptformel stets anwendbar, gleichgültig, ob die Betriebserdung direkt oder über eine Durchschlagssicherung an das Netz angeschlossen ist. Sie liefert jedoch in einigen Fällen eine etwas teurere Erdung. Andererseits bietet sie in diesen Fällen höheren Schutz als die Nebenformel. So z. B. wenn ein Körperschluß nicht, wie bisher angenommen, satt, sondern über Isolationswiderstände stattfindet oder wenn sich die Erdungen im Laufe der Zeit verschlechtern.

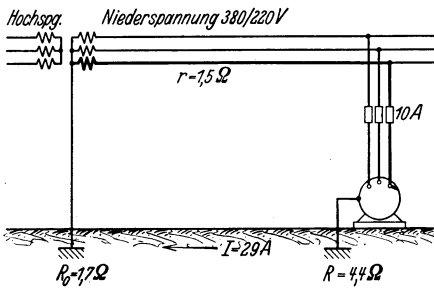


Abb. 38. Zum Vergleich zwischen der Haupt- und der Nebenformel der Schutzerdung.

Wir wollen letzteres an einem Beispiel zeigen. An einem Drehstromnetz mit 380/220 V Spannung liege ein Gerät, das gerdet und mit 10 A abgesichert ist (Abb. 38). Die Betriebserdung sei ($I_{\max} = 15$ A)

$$R_0 = \frac{65}{2,5 \cdot 15} = 1,7 \Omega .$$

Die Schutzerdung darf nach der Nebenformel höchstens einen Widerstand haben von

$$R = \frac{110}{2,5 \cdot 10} = 4,4 \Omega .$$

Bei Körperschluß des Motors fließt, wenn der Widerstand des Außenleiters $1,5 \Omega$ beträgt, ein Fehlerstrom von

$$I = \frac{220}{1,7 + 4,4 + 1,5} = 29 \text{ A} .$$

Die Induktivität ist der Einfachheit halber vernachlässigt. Da die Abschaltstromstärke von 25 A überschritten ist, so wird eine Abschaltung sicher erfolgen.

Die beiden Leitfähigkeiten mögen sich nun infolge Austrocknung um 50% verschlechtern, dann sind die beiden Erdungswiderstände

$$R_0 = 1,5 \cdot 1,7 = 2,6 \Omega ,$$

$$R = 1,5 \cdot 4,4 = 6,6 \Omega ,$$

¹ Eine etwas andere, aber weniger klare Formulierung siehe L.E.S. 1 § 9. Vgl. die Erläuterung zu diesem Paragraphen S. 102.

und es wird ein Strom fließen von

$$I = \frac{220}{2,6 + 6,6 + 1,5} = 20,5 \text{ A.}$$

Die fehlerhafte Anlagestelle wird jetzt nicht mehr in „kurzer Zeit“ abgeschaltet, und am geerdeten Gerät bleibt eine Spannung von

$$20,5 \cdot 6,6 = 135 \text{ V}$$

stehen, was viel zu hoch ist.

Hätten wir aber die Schutzerdung auf Grund der Hauptformel bemessen, nämlich

$$R = \frac{65}{2,5 \cdot 10} = 2,6 \Omega,$$

so wäre bei der Verschlechterung der Erdungsverhältnisse um 50% dieser Widerstand auf $3,9 \Omega$ gestiegen und im Falle eines Körperchlusses würde der Erdstrom

$$\frac{220 \text{ V}}{2,6 + 3,9 + 1,5} = 27,5 \text{ A}$$

betragen. Die Sicherung hätte angesprochen, da die Abschaltstromstärke 25 A ist. Und auch bis zum Moment der Abschaltung wäre die Spannung erheblich niedriger gewesen, nämlich

$$27,5 \cdot 3,9 = 107 \text{ V,}$$

also 28 V weniger als bei der Bemessung auf Grund der Nebenformel.

Man ist jedoch übereingekommen, daß diese Bedenken gegen die Nebenformel nicht gelten sollen.

48. Anwendungsgebiet der Schutzerdung. Aus den Bemessungsformeln folgt, daß ein um so kleinerer Erdungswiderstand erforderlich ist, je größer die Nennstromstärke der vorgeschalteten Sicherung ist. Bei Ackerboden benötigt man schon Bänder von 5 bis 10 Meter Länge je Ampere Nennstromstärke der Sicherung¹. Die Erdung ist also eine recht kostspielige Schutzmaßnahme. Man kann sagen, daß im allgemeinen ein Stromverbraucher, der höher als mit 10 A abgesichert ist, kaum mehr auf wirtschaftliche Weise durch Erdung geschützt werden

¹ Es ist für Bänder und Ackerboden ($\rho = 100 \Omega \text{ m}$)

$$R = \frac{2,1 \cdot 100}{a}$$

In Verbindung mit den Bemessungsformeln

$$R = \frac{65 \text{ oder } 110 \text{ V}}{2,5 \cdot I_n}$$

folgt für $I_n = 1 \text{ A}$ eine Bandlänge von

$$a = 4,8 \text{ oder } 8,1 \text{ m.}$$

kann. Die Erdung hat also ein ziemlich beschränktes Anwendungsgebiet; es sei denn, daß eine städtische Wasserleitung mit ihrem meist geringen Erdungswiderstand zur Verfügung steht.

Deswegen sind die Städte mit ihrem Wasserleitungsnetz das gegebene Anwendungsgebiet für die Erdung. Es muß aber sichergestellt sein, daß die Wasserleitung auch wirklich einen geringen Erdungswiderstand hat. Der Anschluß des Stromverbrauchers an die Wasserleitung kann vor oder hinter der Wasseruhr vorgenommen werden. In letzterem Falle muß der Wassermesser gut leitend überbrückt werden, damit die Erdung bei Entfernung oder Reparatur des Wassermessers nicht unterbrochen ist. In den einzelnen Stockwerken darf die Erdungsleitung nur dann an die Wasserleitung angeschlossen werden, wenn die Wasserrohre im Gebäude verlötet sind, wie es bei Bleirohren der Fall ist. Bei Verbindung der Rohre mit Mennige und Verhanfung, wie es bei eisernen Wasserrohren gewöhnlich geschieht, ist die Verbindung nicht zuverlässig leitend. Das richtigste ist, wenn der Anschluß

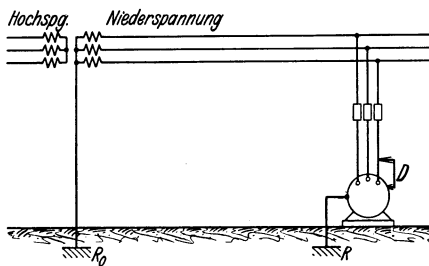


Abb. 39. Prüfung einer Schutzerdung bei unmittelbarer Betriebserdung.

des zu schützenden Stromverbrauchers vor der Wasseruhr, also straßenseitig erfolgt. Es ist dann allerdings notwendig, daß eine Erdungsleitung vom Hauptrohr der Wasserleitung angefangen durch das ganze Gebäude verlegt und an Schutzkontakt-dosen angeschlossen wird.

49. Prüfung der Schutzerdung auf Vorschriftsmäßigkeit. Eine

Erdung sei verlegt. Wir untersuchen die Frage, auf welche Weise nachgeprüft werden kann, ob sie vorschriftsmäßig ist.

a) In Netzen, in denen die Betriebserdung über eine Durchschlag-sicherung angeschlossen ist, ist der Erdungswiderstand nach einem der beiden in Abschnitt 22 geschilderten Verfahren zu messen und nach der Hauptformel zu berechnen. Der gemessene Wert darf nicht größer sein als der gerechnete.

b) In Netzen mit unmittelbarer Betriebserdung wird auf den Stromverbraucher, dessen Erdung nachgeprüft werden soll, Spannung gesetzt, indem, wie Abb. 39 zeigt, hinter einer Sicherung mit Hilfe eines (sonst isolierten) Drahtes *D* eine leitende Verbindung zwischen einem Außenleiter und dem Gehäuse des Stromverbrauchers hergestellt wird. Die Erdung ist vorschriftsmäßig, wenn hierbei die Sicherung abschaltet. Bei negativem Ausfall der Prüfung ist jedoch festzustellen, ob die Schuld nicht etwa an der Betriebserdung liegt, die einen zu hohen Widerstand hat.

50. Zusammenstellung. In Zahlentafel 13 sind die Formeln zusammengestellt, die bei Verwendung der Schutzerdung zu beachten sind.

Zahlentafel 13.

Netze	Art der Betriebserdung	R_0	R
380/220 V	Nullpunkt ist unmittelbar zu erden	$\frac{125 \text{ V}}{I_e \text{ bzw. } I'_a}$	$\frac{110 \text{ V}}{I_a}$
220/127 V	desgl.		$\frac{65 \text{ V}}{I_a}$
$3 \times 220 \text{ V}$	a) Nullpunkt vorhanden: Nullpunkt ist zu erden	höchstens aber $\frac{65 \text{ V}}{I_{a \text{ max}}}$	$\frac{65 \text{ V}}{I_a}$
	b) Kein Nullpunkt vorhanden: α) ein Außenleiter ist unmittelbar geerdet	$\frac{125 \text{ V}}{I_e \text{ bzw. } I'_a}$	$\frac{110 \text{ V}}{I_a}$
	β) ein Außenleiter ist über eine Durchschlagssicherung geerdet		$\frac{65 \text{ V}}{I_a}$
	$3 \times 110 \text{ V}$	a) Nullpunkt vorhanden: Nullpunkt ist zu erden	$\frac{125 \text{ V}}{I_e \text{ bzw. } I'_a}$
b) Kein Nullpunkt vorhanden: α) ein Außenleiter ist unmittelbar geerdet		$\frac{65 \text{ V}}{I_a}$	
β) ein Außenleiter ist über eine Durchschlagssicherung geerdet		$\frac{65 \text{ V}}{I_a}$	

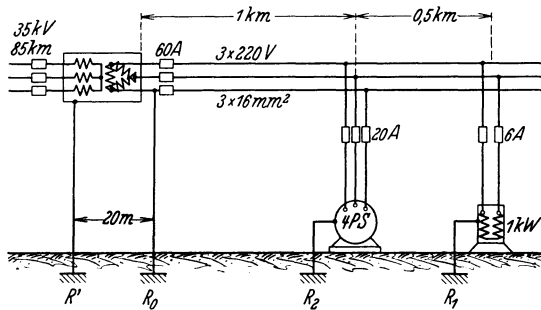


Abb. 40. Zum Zahlenbeispiel über Schutzerdung.

51. Beispiel (Abb. 40). 1. Hochspannungserdung in der Station.
Erdschlußstrom der 85 km langen 35 kV-Leitung

$$I_e = \frac{U \cdot s}{400} = \frac{35 \cdot 85}{400} = 7,5 \text{ A} .$$

Widerstand der Hochspannungserdung höchstens

$$R' = \frac{125 \text{ V}}{I_e} = \frac{125}{7,5} = 16,7 \Omega .$$

2. Betriebserdung.

a) Bemessung mit Rücksicht auf Übertritt der Hochspannung:

$$R_0 = \frac{125 \text{ V}}{I_s} = 16,7 \Omega$$

bzw.

$$R_0 = \frac{125 \text{ V}}{I_a} = \frac{125}{2,5 \cdot 5} = 10 \Omega .$$

Es genügt der größere der beiden Widerstände, also 16,7 Ω .

b) Bemessung mit Rücksicht auf einen Erdschluß im Niederspannungsnetz:

Nennstromstärke der stärksten in den Anschlußanlagen vorkommenden Sicherung, hinter der geerdet ist: $I_{n\max} = 25 \text{ A}$.

$$R_0 = \frac{65 \text{ V}}{I_{a\max}} = \frac{65 \text{ V}}{2,5 \cdot 25} = 1 \Omega .$$

Demnach kommt für R_0 nicht 16,7, sondern 1 Ω in Frage. Diese Erdung kann etwa in 10 parallele Erdungen mit je 10 Ω aufgelöst werden.Der Widerstand des Erdreichs sei 80 $\Omega \text{ m}$, dann benötigt man, falls Band verlegt wird, nach Gl. (11) eine Länge von je

$$a = \frac{2,1 \cdot 80}{10} = 16,8 \text{ m} .$$

3. Erdung eines einphasigen Stromverbrauchers von 1 kW Nennstrom der Sicherung $I_n = 6 \text{ A}$,Abschaltstrom $2,5 \cdot I_n = 2,5 \cdot 6 = 15 \text{ A}$,

Erdungswiderstand (da unmittelbare Außenleitererdung)

$$R_1 = \frac{110}{I_a} = \frac{110}{15} = 7,3 \Omega ,$$

Bandlänge nach Gl. (11)

$$a = \frac{C \cdot \varrho}{R_1} = \frac{2,1 \cdot 80}{7,3} = 23 \text{ m} .$$

4. Schutzerdung eines Motors von 4 PS.

Es handle sich um einen Käfigmotor von 1500 U/min, Wirkungsgrad 85%, Leistungsfaktor 0,83. Der Vollaststrom ist also

$$I = \frac{\text{Leistung}}{\sqrt{3} U \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{4 \cdot 0,736}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,85 \cdot 0,83} = 11 \text{ A} .$$

Der Anlaßstrom ist $2,4 \cdot 11 = 26,4 \text{ A}$ (vgl. die Normalbedingungen für den Anschluß von Motoren an öffentliche Elektrizitätswerke). Da gemäß den K.P.I. § 52 eine 20 A-Sicherung den 1,4 fachen Nennstrom 1 Stunde lang aushalten muß, ohne zu schmelzen, genügt eine Absicherung mit 20 A.

Erdungswiderstand des Motors (da unmittelbare Außenleitererdung)

$$R_2 = \frac{110}{I_a} = \frac{110}{2,5 \cdot 20} = 2,2 \Omega .$$

Bei einem spezifischen Widerstand des Erdreiches von $80 \Omega \text{ m}$ ist nach Gl. (11) ein Band erforderlich von der Länge

$$a_2 = \frac{C \cdot \varrho}{R_2} = \frac{2,1 \cdot 80}{2,2} = 76 \text{ m}.$$

Anmerkung 1. Obwohl die Rechnung damit erledigt ist, wollen wir doch sehen, welche Berührungsspannung im Falle eines Körperschlusses des Motors auftritt. Der Widerstand bis zur Fehlerstelle beträgt

$$r + R_2 + R_0 = 1,1 + 2,2 + 1 = 4,3 \Omega,$$

die Induktivität

$$0,8 \Omega.$$

Die Impedanz ist also

$$\sqrt{4,3^2 + 0,8^2} = 4,4 \Omega.$$

Der Fehlerstrom ist also

$$I = \frac{220}{4,4} = 50 \text{ A}.$$

Bei dieser Stromstärke schmilzt die 20 A-Sicherung in hinreichend kurzer Zeit ab.

Anmerkung 2. Band aus Kupfer von 76 m Länge und 50 mm^2 Querschnitt wiegt etwa $8,9 \cdot 76 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 34 \text{ kg}$. Das Kilogramm zu 1,— M. gerechnet macht 34,— M. Dazu kommt die Verlegung des Bandes, die schätzungsweise 25,— M. kostet. Gesamtkosten also 60,— M.

Wir haben Ackerboden vorausgesetzt. Die Kosten steigen mit dem spezifischen Widerstand des Bodens, da das Band entsprechend länger und der Arbeitslohn höher ist. Die Erdung ist also, falls keine Wasserleitung zur Verfügung steht, keine billige Schutzmaßnahme, die noch den Nachteil hat, daß der Preis schwer vor auszukalkulieren ist, da der spezifische Widerstand gewöhnlich vorher nicht bekannt ist.

Anmerkung 3. Bei Verwendung eines Motorschutzschalters statt Sicherungen ist der Schalter auf 11 A (statt 20 A wie bei Schmelzsicherungen) einzustellen, damit er den Motor sicher schützt. Rechnen wir hier als Abschaltstromstärke ebenfalls die 2,5 fache Nennstromstärke, so genügt jetzt eine Erdung von

$$R_2 = \frac{110}{2,5 \cdot 11} = 4 \Omega$$

gegenüber $2,2 \Omega$ bei Schmelzsicherungen.

Da für die Betriebserdung die Abschaltstromstärke der größten Sicherung in den Anschlußanlagen in Betracht kommt, so kommt man bei Verwendung von Motorschutzschaltern unter Umständen auch mit billigeren Betriebserdungen aus.

XIII. Nullung.

52. Grundgedanke. Diese Schutzmaßnahme kommt für Niederspannungsnetze mit Nulleiter in Betracht. Unter Nullung versteht man die Verbindung der zu schützenden Anlageteile (z. B. des metallenen Gehäuses eines Stromverbrauchers) mit dem Nulleiter¹.

Als einfaches Beispiel betrachten wir ein zweipoliges Gerät, das an zwei Außenleitern angeschlossen ist. Um ihn durch Nullung zu schützen, wird das Gehäuse mit dem Nulleiter verbunden (Abb. 41). Die Verbindungsleitung heißt wieder Schutzleitung oder speziell Nullungsleitung.

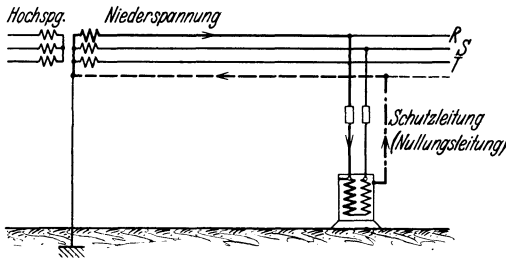


Abb. 41. Grundgedanke der Nullung.

Tritt Körperschluß auf, etwa an der Phase R, dann fließt über die Fehlerstelle zum Nulleiter ein Fehlerstrom, der die Sicherung des Geräts zum Abschalten bringt, da im Fehlerstromkreis praktisch keine Widerstände liegen. Die Berührungsspannung ist damit zum Verschwinden gebracht, und das war der Zweck der Nullung.

Bei der Nullung genügt also eine einfache Verbindung mit dem Nulleiter, um einen Schutz herbeizuführen. Die Nullung ist also erheblich bequemer und billiger auszuführen als eine vorschriftsmäßige Erdung.

Die genauere Betrachtung wird uns aber zeigen, daß die Nullung zwar die durch einen Körperschluß hervorgerufenen Berührungsspannungen beseitigt, auf der anderen Seite aber bei gewissen anderen Störungen neue Berührungsspannungen erzeugt, die ohne Nullung nicht vorhanden sein würden. Diese Störungen und ihre Berührungsspannungen wollen wir jetzt besprechen.

53. Erdschluß. 1. Nullungsbedingung. Wir betrachten also ein Niederspannungsnetz, in dem die Schutzmaßnahme der Nullung verwendet wird. In einem solchen Netz bekomme ein Außenleiter Erdschluß. Dann steigt, wenn keine Betriebserdung vorhanden oder diese über eine Durchschlagsicherung angeschlossen ist, die Spannung des Nulleiters auf Phasenspannung, also in einem 380/220 V-Netz auf 220 V und in einem 220/127 V-Netz auf 127 V. Diese Spannung überträgt sich auf alle genullten Anlageteile und ruft, auch wenn diese nicht den geringsten Isolationsfehler haben, eine unmittelbare Gefahr hervor

¹ Es ist vielleicht nicht überflüssig zu sagen, daß nicht etwa der Sternpunkt der Motorwicklung genullt werden darf, sondern nur das Gehäuse.

(vgl. Stromverlauf Abb. 42). Da ihre Größe die zulässige Grenze der Berührungsspannung überschreitet, so darf bei Nullung

1. die Betriebserdung niemals über Durchschlagssicherungen abgeschlossen werden,

2. ihr Widerstand einen gewissen Maximalwert nicht überschreiten.

Diese beiden Forderungen hatten wir schon im Abschnitt 36 mit Rücksicht auf die beiden Grenzspannungen 150 und 250 V aufgestellt und gefunden, daß der Betriebs-

erdungswiderstand 2Ω nicht überschreiten darf. Dann bleibt die Nulleiterspannung immer unter 65 V (nämlich 38,5 und 52,5 V).

Wir schreiben daher als 1. Nullungsbedingung vor: Der Nulleiter ist mit höchstens 2Ω unmittelbar zu erden. Als Teilergebnis der beiden nächsten Abschnitte fügen wir gleich hinzu: Der Nulleiter ist außer an seinem Anfang mindestens noch an seinem Ende bzw. den Enden der Netzausläufer zu erden¹.

Damit die Voraussetzung, daß sehr gute Erdschlüsse z. B. über eine Wasserleitung nicht auftreten können, erfüllt ist, sind Wasserleitungsrohre mit dem Nulleiter zu verbinden.

54. Einpoliger Kurzschluß.

2. Nullungsbedingung. Wir betrachten ein Drehstromnetz mit Nulleiter von 380/220 V und nehmen an, daß ein angeschlossener Stromverbraucher, etwa ein Motor, genullt ist. Jetzt entstehe im Netz ein einpoliger Kurzschluß, d. h. ein Kurzschluß zwischen dem Nulleiter und einem Außenleiter (Kurzschlußstelle *K* in Abb. 43).

Der Nulleiter nimmt dann, obwohl er geerdet ist, Spannung gegen Erde an und überträgt diese auf alle genullten Stromverbraucher, an denen also eine Berührungsspannung auftritt. Die Größe dieser Berührungsspannung ist verschieden und ist gleich der Spannung des Nulleiters

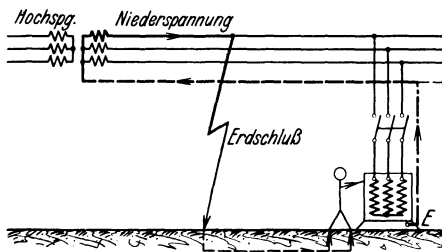


Abb. 42. Erdschluß erzeugt Berührungsspannungen an den genullten Geräten.

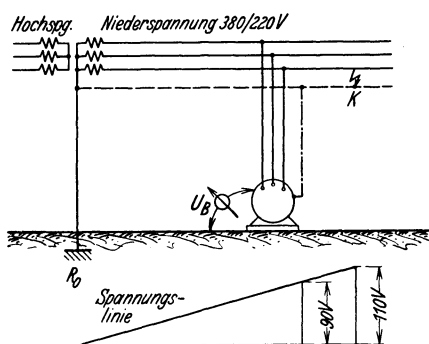


Abb. 43. Einpoliger Kurzschluß erzeugt Berührungsspannungen an den genullten Geräten.

¹ Ist der Nulleiter an fünf Stellen geerdet, so braucht jede Erdung nur 10Ω Widerstand zu haben.

an der genullten Stelle. Es ist also nur notwendig, die Spannungsverteilung längs des Nulleiters zu ermitteln, was wir jetzt tun wollen.

a) Einfachster Fall. Wir betrachten zunächst einen ganz einfachen Fall, indem wir folgende Voraussetzungen machen: Der Nulleiter sei nur in der Transformatorenstation geerdet. Der Nulleiter bestehe aus dem gleichen Werkstoff (Kupfer) wie der Außenleiter und sei eben so stark wie dieser. Spannungsabfall im Transformator und Selbstinduktion der Leitung sei vernachlässigt. Dann ist der Spannungsabfall im Nulleiter die Hälfte der Phasenspannung, also

$$110 \text{ V.}$$

Da der Nulleiter nur an der Station geerdet angenommen ist, ist die Spannung des Nulleiters am Sternpunkt Null und steigt linear bis zur Kurzschlußstelle K an (Abb. 43 unten). Jenseits K herrscht überall die Spannung 110 V. Alle genullten Geräte erhalten also, ohne daß in ihnen der geringste Isolationsfehler (Körperschluß) vorhanden ist, eine Berührungsspannung, die zwischen Null und 110 V liegt. Der in Abb. 43 eingezeichnete Stromverbraucher hat eine Berührungsspannung¹ von $U_B = 90 \text{ V}$.

Der Nulleiter, der im störungsfreien Betrieb fast keine Spannung gegen Erde hat, hat also bei einem einpoligen Kurzschluß an vielen Stellen Spannungen über 100 V. Der Name Nulleiter darf also (was wir schon beim Erdschluß gesehen haben) nicht zur Meinung verführen, daß seine Spannung gegen Erde stets Null ist. („Der Nulleiter ist der fälschlich so genannte“.)

Daß die Stationssicherung abschmilzt, ist nicht sichergestellt, da der einpolige Kurzschlußstrom erheblich kleiner ist als der zweipolige Kurzschlußstrom²; denn auf diesen arbeitet die verkettete Spannung, auf jene nur die Phasenspannung³. Die Berührungsspannung überschreitet also die zulässige Grenze. Um die Berührungsspannung herabzusetzen, erden wir den Nulleiter auch an seinem Ende (Abb. 44). Dann wird, falls die beiden Erdungswiderstände einander gleich sind, die Berührungsspannung halbiert, also auf 55 V herabgesetzt.

Die Abb. 44 zeigt die Lage der Spannungslinie: die eine Spannung ist positiv, die andere negativ; in der Mitte der Strecke herrscht keine Spannung gegen Erde, so daß dort angeschlossene (genullte) Stromverbraucher keine Berührungsspannung erhalten. Tritt der Kurzschluß

¹ Dies ist die größtmögliche Berührungsspannung, die wirklich auftretende hängt noch von der Leitfähigkeit des Fußbodens ab. Vgl. Abschnitte 8 und 9.

² Kurzschluß zwischen zwei Außenleitern.

³ Meist ist auch der Widerstand beim einpoligen Kurzschluß größer, da der Nulleiter einen kleineren Querschnitt hat als die Außenleiter.

nicht am Ende auf, so besteht die Spannungslinie aus einem schrägen und einem geraden Teil.

In diesem einfachsten und zugleich günstigsten Falle (Gleichheit der Leiterquerschnitte und Gleichheit der beiden Erdungen) wird die zulässige Grenze der Berührungsspannung von 65 V schon fast erreicht.

In Wirklichkeit treffen aber die gemachten günstigen Voraussetzungen fast nie zu. Sogar bei Gleichheit der Betriebserdungen wird die Halbierung der Spannung unmöglich gemacht, wenn mehrere Abzweige vorhanden sind. Besitzt nämlich jeder solcher Abzweig an seinem Ende eine Erdung, so sind im Falle eines einpoligen Kurzschlusses an einem der Abzweige alle übrigen Betriebserdungen parallel geschaltet.

So erhält man im Falle der Abb. 45 bei Gleichheit der 4 Querschnitte und der Gleichheit aller 5 Betriebserdungen (4 an den Enden und 1 in der Station) an der Kurzschlußstelle eine Berührungsspannung

$$U_B = 110 \cdot \frac{4}{5} = 88 \text{ V.}$$

Da der Kurzschluß aber an jedem Abzweig auftreten kann, ist es grundsätzlich unmöglich, den Erdungen eine solche Größe zu geben, daß der günstigste Fall von 55 V nicht überschritten wird. Dazu kommt noch, wie gesagt, daß in Wirklichkeit die Erdungen unter sich nicht gleich sind und gewöhnlich auch nicht die 4 Leitungsquerschnitte, so daß in

allen praktischen Fällen die Berührungsspannung die Grenze von 65 V weit übersteigt. Somit bleibt als einziger Ausweg die Abschaltung. Da die Abschaltung in „hinreichend kurzer“ Zeit erfolgen muß, so können wir die Abschaltbedingung wie folgt formulieren (2. Nullungsbedingung):

„In einem 380/220 V-Netz muß bei einem einpoligen Kurzschluß mindestens der Abschaltstrom einer vorgeschalteten Sicherung zum Fließen kommen.“

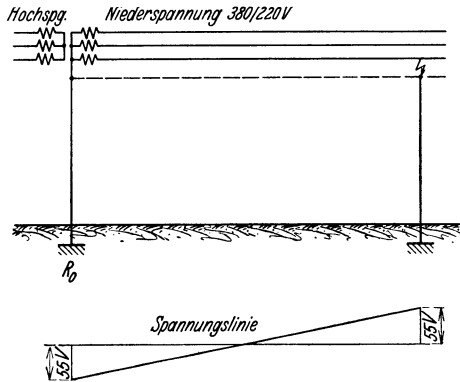


Abb. 44. Erdung des Nulleiters am Anfang und Ende setzt die Spannungen des Nulleiters gegen Erde herab.

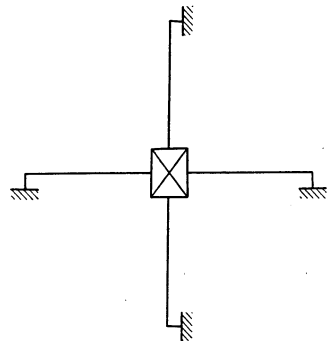


Abb. 45. Gehen vom Transformator mehrere Nulleiter aus, so ist eine Halbierung der maximalen Berührungsspannungen auch bei Gleichheit der Anfangs- und Enderdung unmöglich.

In einem 220/127 V-Netz treten nur $\frac{1}{\sqrt{3}} = 0,58$ -mal so große Berührungsspannungen auf. Überschreitet der Widerstand des Nulleiters nicht das 1,6fache des Widerstandes des Außenleiters (über den Einfluß der Leiterwiderstände vgl. S. 69), so ist eine Abschaltung vom Standpunkt der Sicherheit nicht erforderlich. Denn dann ist die Berührungsspannung an der Kurzschlußstelle kleiner als 65 V:

$$U_B = U_{ph} \cdot \frac{r_0}{r + r_0} \cdot \frac{4}{5} = 127 \cdot \frac{1,6}{2,6} \cdot \frac{4}{5} = 63 \text{ V.}$$

(Bezeichnungen siehe nächsten Absatz.)

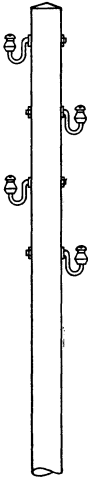


Abb. 46. Mastbild zur Berechnung des Spannungsabfalles einer Drehstromleitung mit Nulleiter.

Um zu sehen, ob die Abschaltbedingung überhaupt praktisch erfüllbar ist, berechnen wir, welcher Spannungsabfall im Niederspannungsnetz bei symmetrischer dreiphasiger Belastung mit dem Nennstrom höchstens vorhanden sein darf, damit bei einem einpoligen Kurzschluß der Abschaltstrom auftritt. Wir denken uns etwa eine Mastanordnung nach Abb. 46. Der Nulleiter sei der linke obere oder der rechte untere Draht (vergleiche Abschnitt 55). Der Widerstand des Außenleiters sei r , der des Nulleiters r_0 , die Reaktanz zwischen 2 beliebigen der 4 Drähte sei im Mittel x . Dann muß also der Kurzschlußstrom zwischen dem Nulleiter und einem Außenleiter gleich dem 2,5fachen Nennstrom der Sicherung sein (U_{ph} = Phasenspannung):

$$\frac{U_{ph}}{\sqrt{(r + r_0)^2 + x^2}} = 2,5 I_n. \quad (34)$$

Bei symmetrischer dreiphasiger Belastung kommt als Induktivität je Phase nur die Hälfte derjenigen zwischen zwei Außenleitern in Betracht. Der Spannungsabfall je Phase ist also, wenn die Belastung nur am Ende der Leitung liegt

$$\Delta U = I_n \left(r \cos \varphi + \frac{x}{2} \sin \varphi \right).$$

Also ist der relative Spannungsabfall (je Phase oder verkettet)

$$\varepsilon = \frac{I_n}{U_{ph}} \left(r \cos \varphi + \frac{x}{2} \sin \varphi \right).$$

Nehmen wir einen mittleren Leistungsfaktor von 0,7 an, so ist ange nähert $\cos \varphi = \sin \varphi = 0,7$, und es wird

$$\varepsilon = 0,7 \cdot \frac{I_n}{U_{ph}} \cdot \left(r + \frac{x}{2} \right). \quad (35)$$

Um bequem weiter rechnen zu können, setzen wir

$$r = \alpha x \quad \text{und} \quad r_0 = \alpha_0 x.$$

Aus Gl. (34) folgt:

$$\frac{U_{ph}}{I_n} = 2,5 x \sqrt{1 + (\alpha + \alpha_0)^2}$$

und aus Gl. (35)

$$\frac{U_{ph}}{I_n} = \frac{1,4 x (1 + 2 \alpha)}{4 \varepsilon}$$

Die Gleichsetzung der beiden rechten Seiten liefert

$$\varepsilon = \frac{0,14 (1 + 2 \alpha)}{\sqrt{1 + (\alpha + \alpha_0)^2}} \quad (36)$$

Nehmen wir zunächst den ungünstigsten Fall an, daß der Nulleiter halb so stark ist als der Außenleiter, dann ist $\alpha_0 = 2 \alpha$ und der relative Spannungsabfall ist

$$\varepsilon_1 = \frac{0,14 (1 + 2 \alpha)}{\sqrt{1 + 9 \alpha^2}} \quad (37)$$

Kleines α bedeutet dicke Drähte, großes α dünne Drähte. Abb. 47 zeigt, welche Grenze der relative Spannungsabfall nicht überschreiten darf, damit die Abschaltbedingung erfüllt ist.

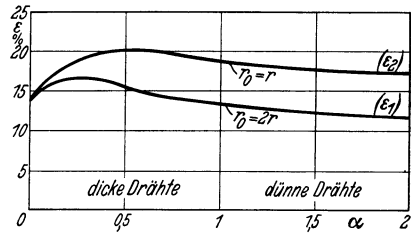


Abb. 47. Höchstzulässiger Spannungsabfall bei Erfüllung der Abschaltbedingung.

Bei langen Leitungen wird dieser Spannungsabfall oft überschritten. Es empfiehlt sich daher besonders bei schwächeren Querschnitten, den Nulleiter eben so stark zu machen wie die Außenleiter¹, dann ist $\alpha_0 = \alpha$ und es wird

$$\varepsilon_2 = \frac{0,14 (1 + 2 \alpha)}{\sqrt{1 + 4 \alpha^2}} \quad (38)$$

(vgl. Abb. 47). Der Spannungsabfall kann also rund 5% größer sein, ohne die Abschaltung in Frage zu stellen.

Bei Berechnung des Spannungsabfalles haben wir vorausgesetzt, daß die Gesamtbelastung am Ende der Leitung liegt. Ist sie, wie gewöhnlich, längs der Leitung verteilt, dann kann der Spannungsabfall (bei symmetrischer dreiphasiger Belastung) doppelt so groß sein, ohne die Abschaltbedingung zu gefährden. Unter normalen Verhältnissen ist also eine Abschaltung stets zu erreichen. Sollte dies einmal nicht der Fall sein, so kann man sich durch Einbau von Zwischensicherungen hinter Abzweigstellen helfen.

¹ Diese Maßnahme ist auch aus einem anderen Grunde ratsam. Bei einem Lichtbogen zwischen zwei Leitungen wird zuerst der schwächere Querschnitt durchbrennen. Macht man nun den Nulleiter schwächer als den Außenleiter, so wird zuerst der Nulleiter unterbrochen. Eine Unterbrechung des Nulleiters erzeugt jedoch, wie im Abschnitt 55 gezeigt wird, hohe Berührungsspannungen.

b) Einfluß der Vernachlässigungen. Der bisherigen Betrachtung des einpoligen Kurzschlusses haben wir besonders einfache Verhältnisse zugrunde gelegt und mehrere Vernachlässigungen gemacht. Wir stellen nunmehr die dadurch gemachten Fehler fest und untersuchen der Reihe nach folgende fünf Einflüsse auf die Höhe der Berührungsspannung:

1. Ungleichheit der Erdungen.
2. Ungleichheit der Querschnitte.
3. Erdströme.
4. Induktivität.
5. Mehrfache Erdungen.

Zuerst nehmen wir also an, daß die beiden Erdungswiderstände R_1 und R_2 ungleich seien. Das Netz sei wieder unverzweigt; die Erdströme und die Selbstinduktion der Leitungen seien zunächst noch verschwindend klein und die Querschnitte der Leiter gleich ($r = r_0$). Die Ungleichheit der beiden Erdungen hat zur Folge, daß die Berührungsspannungen an den beiden Enden verschieden sind. Die Summe der beiden Berührungsspannungen ist gleich

$$U_{B_1} + U_{B_2} = U_{ph}/2,$$

ferner verhalten sich die Berührungsspannungen wie die Erdungswiderstände

$$\frac{U_{B_1}}{U_{B_2}} = \frac{R_1}{R_2},$$

also wird die Berührungsspannung eines z. B. am Ende der Leitung angeschlossenen und genulften Stromverbrauchers sein

$$U_{B_2} = \frac{U_{ph}/2}{1 + \frac{R_1}{R_2}}. \quad (39)$$

Ist etwa $R_2 = 2 R_1$ und $U_{ph} = 220$ V, dann wird

$$U_{B_2} = 73 \text{ V} \quad \text{und} \quad U_{B_1} = 37 \text{ V}.$$

Für diesen Fall ist die Spannungsverteilung längs des Nulleiters in Abb. 48 dargestellt. Die Spannungslinie ist eine schräge Gerade mit den beiden Maximalspannungen U_{B_1} und U_{B_2} . Bei anderen Erdungswiderständen verschiebt sich die Spannungslinie parallel zu sich selbst (Abb. 48). Fällt z. B. die Erdung am Leitungsende fort, so ergibt sich die obere Gerade; fällt die am Leitungsanfang fort, die untere Gerade. Die Summe der beiden Berührungsspannungen bleibt hierbei immer dieselbe, welche Größe die Erdungen (innerhalb praktisch vorkommenden Grenzen) auch haben mögen. Der günstigste Fall ist der, daß beide

Erdungen einander gleich sind, dann liegt die Spannungslinie symmetrisch und beide Berührungsspannungen sind, wie wir schon wissen, 55 V. Um diesen günstigsten Fall zu erzwingen, ist vorgeschlagen worden, den Erdungswiderständen noch zwei große Widerstände vorzuschalten (z. B. etwa 100Ω), so daß die Gleichheit der beiden Erdungen leicht erreichbar ist. Dieser Gedanke widerspricht aber der 1. Nullungsbedingung (Abschnitt 53). Obendrein hatten wir gesehen, daß bei mehreren Abzweigen stets Unsymmetrie eintritt.

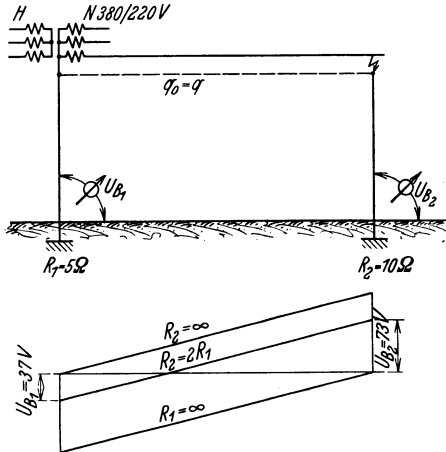


Abb. 48. Berührungsspannungen beim einpoligen Kurzschluß. Berücksichtigung der Ungleichheit der Erdungen.

Untersuchen wir zweitens den Einfluß der Querschnitte. Fast immer ist der Querschnitt des Nulleiters kleiner als der der Außenleiter. Dann ist die Summe der beiden Berührungsspannungen größer als die halbe Phasenspannung. Unter im übrigen denselben Voraussetzungen wie früher ist bei Gleichheit der Erdungen

$$U_{B1} = U_{B2} = \frac{U_{ph}/2}{1 + \frac{r}{r_0}}. \quad (40)$$

Die Spannungslinie hat jetzt eine andere Neigung (Abb. 49) und verschiebt sich je nach den Erdungswiderständen parallel zu sich selbst.

Ist der Nulleiter halb so stark als der Außenleiter, so beträgt jede Berührungsspannung 73 V. Manchmal findet man 25 mm^2 Kupfer und 16 mm^2 Eisen verlegt, dann sind die maximalen Berührungsspannungen bei Gleichheit der Erdungen (κ = Leitfähigkeit, q = Querschnitt):

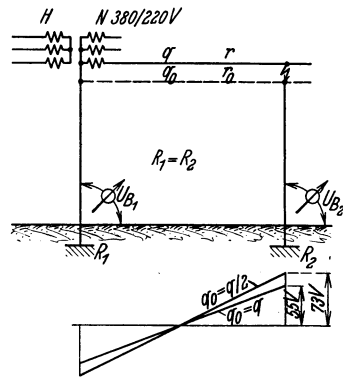
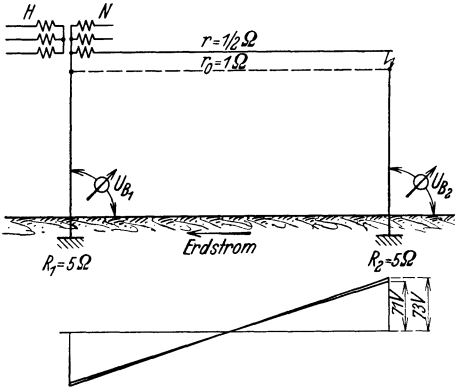


Abb. 49. Berührungsspannungen beim einpoligen Kurzschluß. Berücksichtigung der Ungleichheit der Leiterquerschnitte.

$$U_{B1} = U_{B2} = \frac{U_{ph}/2}{1 + \frac{\kappa_0 q_0}{\kappa q}} = \frac{110}{1 + \frac{7 \cdot 16}{50 \cdot 25}} = 101\text{ V}.$$

Berücksichtigen wir drittens die Erdströme. Diese entlasten den Nulleiter und verkleinern dadurch die Berührungsspannungen: die Neigung der Spannungslinie wird geringer; der Schnittpunkt mit der

Abszissenachse bleibt aber derselbe (Abb. 50). Bei Gleichheit der Erdungen haben beide Berührungsspannungen die Größe



$$U_{B1} = U_{B2} = \frac{U_{ph}/2}{1 + \frac{r}{r_0} + \frac{r}{2R_1}}$$

Mit $r_0 = 2r = 1 \Omega$ wird ohne Berücksichtigung der Erdströme ($R_1 = \infty$)

$$U_{B1} = U_{B2} = 73 \text{ V},$$

und bei ihrer Berücksichtigung mit $R_1 = R_2 = 5 \Omega$

$$U_{B1} = U_{B2} = 71 \text{ V}.$$

Abb. 50. Berührungsspannungen beim einpoligen Kurzschluß. Berücksichtigung der Erdströme.

Die Erdströme verbessern also die Berührungsspannung nur unwesentlich.

Eine Verbesserung von mehr als 10% wird praktisch selten zu erreichen sein¹. Für eine überschlägige Betrachtung wird man die Erdströme stets vernachlässigen können.

Ermitteln wir viertens den Einfluß der Induktivität der Leitungen. Gewöhnlich heißt es, die Induktivität vergrößere die Berührungsspannungen; da bei größeren Querschnitten der induktive Widerstand den Ohmschen erreicht oder gar überwiegt, so glaubt man, daß der Einfluß dann bedeutend sei. Das ist nun glücklicherweise durchaus nicht der Fall.

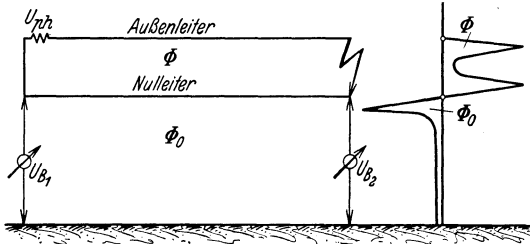


Abb. 51. Berührungsspannungen beim einpoligen Kurzschluß. Berücksichtigung der Induktivität.

Um das einzusehen, betrachten wir die Abb. 51, in der nur der in Betracht kommende

Außenleiter und der Nulleiter gezeichnet ist, die beide denselben Widerstand r haben sollen und den Kurzschlußstrom I führen. Die Erdströme seien nicht vorhanden oder vernachlässigt. Die Abb. 51 zeigt rechts den Feldverlauf in der Ebene der beiden (untereinander liegenden) Leiter. Die Summe der beiden Berührungsspannungen ist nach dem Induktionsgesetz

$$U_{B1} + U_{B2} = I r + j \cdot \omega \Phi_0,$$

¹ Auf die Entlastung des Nulleiters durch die Erdströme werden manchmal ganz unberechtigte Erwartungen gesetzt.

wobei $\omega = 2\pi f$ die Kreisfrequenz des Wechselstroms und Φ_0 der Fluß durch das Rechteck ist, das begrenzt wird vom Nulleiter, den beiden Voltmeterzuleitungen und einer geraden Verbindungslinie längs der Erdoberfläche. Dieser Fluß ist etwa halb so groß wie der Fluß Φ durch die Schleife, die vom Außenleiter und Nulleiter gebildet wird:

$$\Phi_0 = \frac{\Phi}{2}.$$

Da $\bar{\Phi} = IL$ ist (L die Induktivität der erwähnten Schleife), so erhält man

$$U_{B_1} + U_{B_2} = I r + \frac{j\omega IL}{2} = I \left(r + j \frac{\omega L}{2} \right).$$

Nun ist der Strom

$$I = \frac{U_{ph}}{2r + j\omega L},$$

also ist

$$U_{B_1} + U_{B_2} = \frac{U_{ph}}{2}. \quad (41)$$

Der Einfluß der Induktivität ist überraschenderweise ganz herausgefallen. Die Vergrößerung der Berührungsspannung durch den Fluß Φ_0 wird durch die Verminderung des Kurzschlußstromes durch Φ gerade ausgeglichen. Dieses Ergebnis rechtfertigt es also, daß bei Berechnung der Berührungsspannung die Induktivität vernachlässigt wird, also so gerechnet werden kann, als ob Gleichstrom fließt. Bei Berechnung des Kurzschlußstromes (Abschaltbedingung!) muß natürlich die Induktivität, besonders bei starken Querschnitten berücksichtigt werden.

Die nachstehende Gleichung, deren Ableitung wir fortlassen wollen, faßt die vier besprochenen Einflüsse zusammen:

$$U_{B_2} = \frac{U_{ph}}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \left(1 + \frac{r}{r_0} + a \frac{r}{R_1 + R_2}\right)}. \quad (42)$$

Hierbei berücksichtigt

$\frac{R_1}{R_2}$ die Ungleichheit der Erdungen,

$\frac{r}{r_0}$ die Ungleichheit der Querschnitte,

$a = \sqrt{1 + \left(\frac{\omega L}{2r}\right)^2}$ die Induktivität,

$\frac{r}{R_1 + R_2}$ die Erdströme.

Man erkennt übrigens, daß bei Berücksichtigung der Erdströme die Berührungsspannung durch die Induktivität (außer durch die Erdströme selbst) sogar noch um ein geringes verkleinert wird.

Der nachteilige Einfluß der Induktivität besteht darin, daß infolge des verminderten Kurzschlußstromes die Abschaltung verzögert wird, d. h. die Berührungsspannung länger bestehen bleibt.

Wir wollen nun fünftens den Einfluß von mehrfachen Betriebserdungen auf die Spannungsverteilung längs des Nulleiters untersuchen.

Diese Aufgabe führt bei n Erdungen auf n Gleichungen mit n Unbekannten. Eine solche Rechnung ist viel zu kompliziert, um praktisch brauchbar zu sein. Da wir gesehen haben, daß der Einfluß der Erdströme gering ist, wollen wir diese vernachlässigen. Das scheint zunächst nicht erlaubt zu sein, da man nur durch Multiplikation der Erdströme mit den Erdungswiderständen die gesuchten Berührungsspannungen finden kann. Jedoch gelingt die Rechnung durch einen Kunstgriff.

Es handele sich z. B. um einen Nulleiter mit 4 Erdungen (Abb. 52). Sollten Abzweigungen vorhanden sein, so denken wir uns jede Abzweigerdung an den Hauptnulleiter verlegt, indem wir den Widerstand des Nulleiters von der Abzweigstelle bis zur Abzweigerdung zum Widerstand der Abzweigerdung hinzuschlagen. Die Induktivität vernachlässigen wir, was wir bei Ermittlung der Berührungsspannung tun können, wie wir eben gesehen haben.

Wir betrachten also einen Kurzschluß zwischen Nulleiter und einem Außenleiter und suchen zunächst jenen Punkt des Nulleiters, der keine Spannung gegen Erde hat. Der Abstand dieses Punktes von der Station sei x . Die Leitwerte der Erdungen seien (Abb. 52)

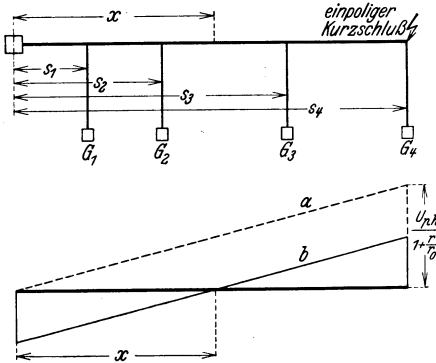


Abb. 52. Berührungsspannungen beim einpoligen Kurzschluß. Berücksichtigung mehrfacher Erdung des Nulleiters.

$$G_1 = \frac{1}{R_1},$$

$$G_2 = \frac{1}{R_2},$$

$$G_3 = \frac{1}{R_3} \text{ usw.}$$

In Analogie mit der Schwerpunktsberechnung findet man

$$G_1(x - s_1) + G_2(x - s_2) = G_3(s_3 - x) + G_4(s_4 - x),$$

daraus folgt:

$$x = \frac{G_1 s_1 + G_2 s_2 + G_3 s_3 + G_4 s_4}{G_1 + G_2 + G_3 + G_4}.$$

Keht man zu den Widerständen zurück, so findet man das Endergebnis:

$$x = \frac{\frac{s_1}{R_1} + \frac{s_2}{R_2} + \frac{s_3}{R_3} + \frac{s_4}{R_4}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}}. \quad (43)$$

Wäre nur eine Betriebserdung am Anfang des Nulleiters vorhanden, so hätte die Spannungslinie den Verlauf a der Abb. 52 mit der maximalen Berührungsspannung

$$\frac{U_{ph}}{1 + \frac{r}{r_0}}. \quad (44)$$

Zu dieser Geraden ziehen wir durch den Punkt x , der also keine Spannung gegen Erde hat, eine Parallele b . Dies ist die gesuchte Spannungsverteilung bei mehreren Betriebserdungen.

Beispiel: Die Spannungsverteilung am Nulleiter sei bei einem Kurzschluß zwischen dem Nulleiter und einem Außenleiter zu berechnen (Netzbild Abb. 53 oben).

Zunächst wird der Nulleiterwiderstand $r_0 = 1 \Omega$ des Abzweigs zum Widerstand $R'_2 = 6 \Omega$ der Abzweigerdung zugeschlagen und mit $R_2 = 7 \Omega$ weitergerechnet (Abb. 53 Mitte).

Der spannungslose Punkt des Nulleiters liegt von der Station im Abstand

$$x = \frac{\frac{100}{5} + \frac{500}{7} + \frac{1000}{2}}{\frac{1}{5} + \frac{1}{7} + \frac{1}{2}} = 695 \text{ m}.$$

Der Querschnitt des Nulleiters sei $\frac{2}{3}$ von dem des Außenleiters; dann ist die maximale Berührungsspannung bei nur 1 Betriebserdung am Anfang des Nulleiters nach Gl. (44)

$$\frac{220 \text{ V}}{1 + \frac{2}{3}} = 132 \text{ V}.$$

In diesem Falle hätte die Spannungslinie den Verlauf a in Abb. 53 unten. Zu a ist nun eine Parallele b zu ziehen, die die Abszisse im Abstand x schneidet.

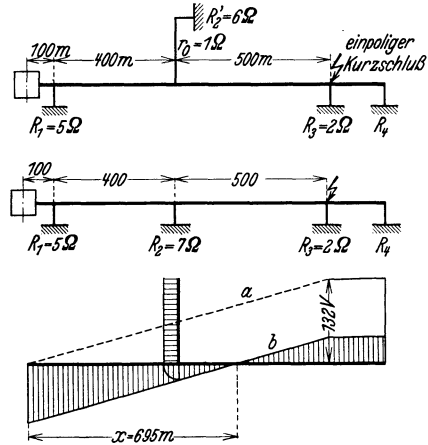


Abb. 53. Zum Zahlenbeispiel über mehrfache Erdung des Nulleiters.

Damit ist die Aufgabe gelöst. Bei Berücksichtigung der Erdströme würde die Spannungslinie ein schwach gebrochener Linienzug sein.

Für andere Kurzschlußstellen gilt natürlich eine andere Verteilung. Die Berechnung wird auf die gleiche Weise durchgeführt.

Zwei Folgerungen wollen wir noch ziehen: Erstens zeigt sich, daß die oft gehörte Behauptung nicht zutrifft, die Berührungsspannung sei nur an wenigen Stellen, z. B. den Kurzschlußstellen oder den Erdungsstellen, lokalisiert. Im Gegenteil wird in den Abzweigungen und jenseits der Kurzschlußstelle die Berührungsspannung in unveränderlicher Größe verschleppt. Zweitens erkennt man, daß Mehrfacherdungen gegenüber Zweifacherdungen im Hinblick auf den einpoligen Kurzschluß keinen Vorteil bieten. Die Berührungsspannungen

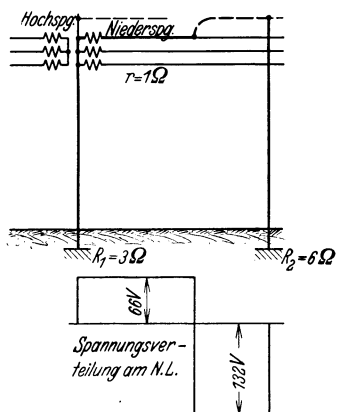


Abb. 54. Berührungsspannungen bei Unterbrechung des Nulleiters vor der letzten Betriebserdung. Nulleiter über den Außenleitern.

verteilen sich etwas anders; ihre Größe wird aber nicht herabgesetzt. Dies geschähe nur, wenn der Nulleiter durch die Erdströme beträchtlich entlastet würde; dazu tragen aber die in der Mitte liegenden Erdungen wenig bei, da an ihnen nur niedrige Spannungen liegen. Die Vorteile der Mehrfacherdungen liegen an anderer Stelle: Parallelschaltung der Betriebserdungen bei einem Erdschluß (vgl. Abschnitt 53) und Herabsetzung der Berührungsspannung bei einer Unterbrechung des Nulleiters (vgl. Abschnitt 55).

55. Unterbrechung des Nulleiters. 3. Nulleitungsbedingung. Wir wenden uns jetzt dem dritten Störfall zu (der mehr für

Ortsnetze und weniger für Kabelnetze von Bedeutung ist): der Unterbrechung des Nulleiters. Es macht dabei einen Unterschied, an welcher Stelle der Bruch erfolgt, und zwar, ob zwischen zwei Erdungen oder hinter der letzten Erdung.

a) Bruch des Nulleiters zwischen zwei Erdungen. Damit ist gemeint, daß auf beiden Seiten der Bruchstelle sich wenigstens noch eine Betriebserdung befindet. Bei der nachstehenden Betrachtung spielt es hierbei eine wesentliche Rolle, ob der Nulleiter auf dem Mast über den Außenleitern (wie gewöhnlich) oder unter ihnen liegt.

α) Liegt der Nulleiter oben und tritt eine Unterbrechung ein, so ist der ungünstigste Fall der, daß das (von der Station) abgetrennte Ende des Nulleiters auf einen Außenleiter fällt und auf diese Weise dessen Spannung annimmt (Abb. 54). Verfolgen wir den stark gezeichneten Stromkreis. Infolge der Zwischenschaltung der relativ hohen Erdungswiderstände, wird die Stationsicherung in der Regel nicht ansprechen.

Die Phasenspannung verteilt sich im wesentlichen auf die beiden jetzt in Reihe liegenden Erdungswiderstände, so daß in einem 380/220 V-Netz eine der beiden Nulleiterstücke mindestens 110 V Spannung gegen Erde erhält. Das Spannungsbild zeigt Abb. 54 unten. Die Spannungslinie ist jetzt keine schräge Gerade mehr, sondern besteht aus zwei Rechtecken. Die Nulleiterspannungen werden an die genullten Anlageteile getragen, was unbedingt gefährlich ist.

Um die Spannung des Nulleiters und damit die Berührungsspannung auf 65 V herabzusetzen, müßte etwa folgende Beziehung bestehen (treibende Spannung 220 V):

$$\frac{R_1 + R_2}{r} = \frac{2 \cdot 65}{(220 - 2 \cdot 65)} = 1,45$$

und bei Gleichheit der beiden Erdungen

$$R_1 = R_2 = 0,73 r.$$

Das ist praktisch unmöglich. Um andererseits eine Abschaltung zu erreichen, müßte $R_1 + R_2$ höchstens die Größe des Widerstandes des Nulleiters haben¹. Aber auch diese Bedingung ist praktisch nicht durchführbar. Mit anderen Worten: Dieser Störfall erzeugt stets gefährliche Berührungsspannungen.

β) Um eine gewisse Abhilfe zu schaffen, empfiehlt es sich, den Nulleiter nicht über den Außenleitern, sondern unter ihnen zu verlegen (Abb. 55). Bei dem Bruch des Nulleiters ist dann kaum eine Berührung mit einem Außenleiter zu befürchten. Zwischen Nulleiter und den Außenleitern liegen jetzt noch (einphasige) Stromverbraucher, durch deren Widerstand die Erdströme und damit die Berührungsspannungen herabgesetzt werden. Sind die eingeschalteten einphasigen Stromverbraucher hinter der Bruchstelle gleichmäßig auf die drei Phasen verteilt, so ist die Berührungsspannung Null, da kein Strom zur Erde fließt. Bei beliebiger Belastung der drei Phasen aber wird die Summe der beiden Berührungsspannungen²

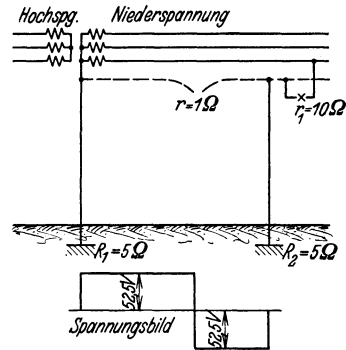


Abb. 55. Berührungsspannungen bei Unterbrechung des Nulleiters vor der letzten Betriebserdung. Nulleiter unter den Außenleitern.

$$U_{B1} + U_{B2} = \frac{U_{ph} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{a}{r_2} + \frac{a^2}{r_3} \right)}{\frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}}$$

¹ Da die Abschaltbedingung erfüllt sein muß, würde der Stromkreis dann angenähert den Widerstand des einpoligen Kurzschlußkreises haben.

² Die Rechnung wird auf ähnliche Weise durchgeführt wie die Untersuchung auf S. 10.

Bei Gleichheit der beiden Erdungen kommt auf jeden Nulleiter die halbe Spannung. Hierbei sind r_1, r_2, r_3 die Belastungswiderstände der drei Phasen (einschließlich Leitungswiderstand) und a bedeutet eine Phasendrehung um 120° , also¹ $a = e^{j120^\circ}$. Bei Belastungssymmetrie wird die Klammer im Zähler Null und damit, wie schon gesagt, die Berührungsspannungen Null. Der ungünstigste Fall ist, wie die Gleichung zeigt, daß nur eine oder daß zwei Phasen voll belastet sind, die übrigen aber leerlaufen. Für den ersten Fall ($r_2 = r_3 = \infty$) wird:

$$U_{B_1} + U_{B_2} = \frac{U_{ph}}{1 + \frac{r_1}{R_1 + R_2}}.$$

Nehmen wir beispielsweise eine einphasige Belastung von 5 kW an, also einen Belastungswiderstand von $220^2/5000 \approx 10 \Omega$. Wir erhalten dann unter Einrechnung eines Leitungswiderstandes von 1Ω mit $r_1 = 10 + 1 = 11 \Omega$ und $R_1 = R_2 = 5 \Omega$ eine Berührungsspannung von

$$U_{B_1} = U_{B_2} = \frac{110}{1 + \frac{11}{10}} = 52,5 \text{ V}.$$

Das Spannungsbild zeigt wieder zwei Rechtecke. Die Spannungslinie geht an der Bruchstelle durch Null (Abb. 55).

Dem steht eine Spannung von etwa 110 V gegenüber, wenn der Nulleiter oben liegt. In Wirklichkeit werden beide Spannungen noch größer sein, da die Spannungsaufteilung auf die beiden Nulleiterstücke selten gleichmäßig ist und bei Vorhandensein von Abzweigungserdungen nie gleichmäßig sein kann (vgl. S. 65).

Wäre hingegen die Erdung am Ende des Nulleiters nicht vorhanden, so würde sich sowohl im Falle der Abb. 54 als auch der Abb. 55 eine Berührungsspannung von über 200 V ergeben. Eine Erdung am Leitungsende ist daher nicht nur mit Rücksicht auf den einpoligen Kurzschluß von Vorteil. Eine Mehrfacherdung erhöht die Sicherheit.

Um also die Gefahr durch eine Unterbrechung des Nulleiters im Ortsnetz zwischen zwei Erdungen zu verhüten bzw. zu vermindern, sollen folgende Gesichtspunkte befolgt werden:

1. Nulleiter in Freileitungsnetzen unten verlegen.
2. Möglichst gleichmäßige Verteilung der Stromverbraucher auf die drei Phasen.
3. Erdung des Nulleiters außer am Anfang mindestens noch an seinem Ende.
4. Sorgfältige Verlegung des Nulleiters, so daß eine Unterbrechung nicht zu befürchten ist.

¹ e ist die Basis der natürlichen Logarithmen, $j = \sqrt{-1}$ die imaginäre Einheit. Die drei Summanden im Zähler addieren sich also vektoriell.

b) Bruch des Nulleiters hinter der letzten Erdung. Noch ungünstiger wirken sich Unterbrechungen an Stellen aus, die nicht zwischen zwei Betriebserdungen liegen. Betrachten wir z. B. den Fall der Abb. 56. Hier ist der Nulleiter hinter der letzten Betriebserdung z. B. in einer Anschlußleitung zu einem Haus gerissen. Die Berührungsspannung entsteht hier dadurch, daß Spannung über einphasige Stromverbraucher auf den Nulleiter übertragen wird. Es liegen ähnliche Verhältnisse vor wie in Abb. 55. Die Größe der Berührungsspannung hängt wieder von der Symmetrie der Phasenbelastungen ab. In Abb. 56 ist wieder der ungünstigste Fall angenommen, daß nur eine Phase belastet ist. Da aber jetzt der berührende Mensch mit seinem hohen Widerstand in Reihe liegt, entfällt auf ihn fast die gesamte Phasenspannung. Mit den in Abb. 56 eingeschriebenen Zahlenwerten z. B. findet sich eine Berührungsspannung von 213 V. Das Spannungsbild zeigt Abb. 56 unten.

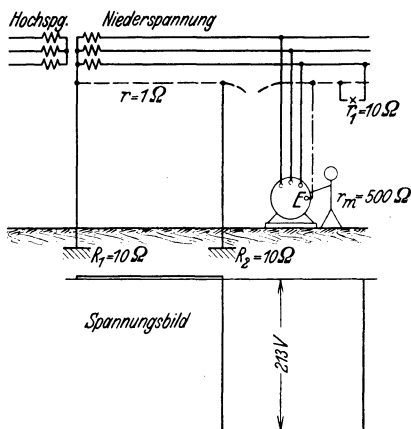


Abb. 56. Berührungsspannungen bei Unterbrechung des Nulleiters hinter der letzten Betriebserdung.

Der Fall der Abb. 57 unterscheidet sich von dem der Abb. 56 dadurch, daß der berührte Stromverbraucher zwischen einem Außenleiter und dem Nulleiter angeschlossen ist. Bei einer Unterbrechung des Nulleiters erhält das Gehäuse des Stromverbrauchers über den eigenen Heizdraht bzw. die eigene Wicklung Spannung.

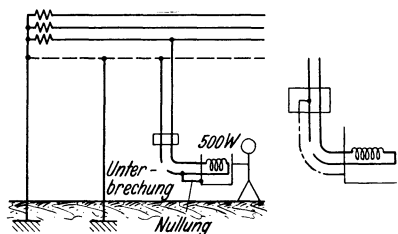


Abb. 57. Falsche und richtige Nullung eines ortsveränderlichen Stromverbrauchers, bei dem der Nulleiter Strom führt.

Auch in diesen Fällen muß durch sorgfältige Verlegung des Nulleiters die größtmögliche Sicherheit gegen eine Unterbrechung des Nulleiters geschaffen werden.

Diese Bedingung ist bei ortsveränderlichen einphasigen Stromverbrauchern schwer erfüllbar. Hier sind Unterbrechungen in oder an der beweglichen Zuführungsleitung (z. B. durch Lösung einer Verbindung in der Dose) leicht möglich. Um sich gegen die Gefahren einer solchen Unterbrechung zu schützen, wird die Nullung nicht am beweglichen Teil, sondern am festverlegten Teil des Nulleiters vorgenommen. Dazu benötigt man freilich (wie bei der Schutzerdung) eine dritte Lei-

tung (Schutzleitung, Nullungsleitung) in der Schnur (Abb. 57 rechts) und besondere Steckvorrichtungen mit Schutzkontakt (vgl. Abschnitt 15). Eine Unterbrechung des beweglichen Nulleiters führt dann zu keiner Gefährdung. Unterbricht andererseits die Schutzleitung, so ist nur der Schutz aufgehoben, aber noch keine Gefahr vorhanden.

Wegen der großen Gefahr, die eine Unterbrechung des Nulleiters hervorruft, muß die Pflicht sorgfältiger Nullleiterverlegung als eine (die dritte) Nullungsbedingung angesehen werden.

56. Zusammenstellung. Wir stellen die Bedingungen, unter denen genullt werden darf, zusammen¹.

1. Nullungsbedingung (Betriebserdung): Der Nulleiter ist am Anfang und in Ortsnetzen mindestens auch an seinem Ende direkt zu erden. Der Widerstand der Betriebserdung soll in 380/220 V-Netzen und in 220/127 V-Netzen höchstens 2Ω betragen, falls die Gefahr des Hochspannungsübertritts (Abschnitt 36) keine kleineren Widerstände erfordert.

2. Nullungsbedingung (Abschaltung): In 380/220 V-Netzen muß bei einem Kurzschluß zwischen dem Nulleiter und einem Außenleiter in kurzer Zeit die Abschaltung einer vorgeschalteten Sicherung erfolgen.

3. Nullungsbedingung (Verlegung): Der Nulleiter ist mit Sorgfalt zu verlegen. Bewegliche stromführende Nulleiter dürfen nicht zugleich Schutzleiter sein.

57. Vorzüge und Nachteile der Nullung. Die Vorzüge der Nullung sind wirtschaftlicher Art und kommen in erster Linie dem Ersteller der Installationsanlagen zugute. Die Nullung ist leicht auszuführen und die Kosten sind leicht zu kalkulieren, da ein vorschriftsmäßiger Nulleiter vom Werk zur Verfügung gestellt sein muß, wenn es die Nullung als Schutzmaßnahme zuläßt.

Die wirtschaftlichen Nachteile fallen dem Elektrizitätswerk zur Last: Sie bestehen in der Einhaltung der drei Nullungsbedingungen, die wir wegen ihrer Wichtigkeit noch einmal kurz hinschreiben:

1. Niedriger Widerstand der Betriebserdung.
2. Abschaltung bei einpoligem Kurzschluß.
3. Große Sicherheit gegen Unterbrechung.

Die 1. Bedingung muß jedoch auch bei der Schutzerdung und der Schutzschaltung befolgt werden.

Ein gewisser Nachteil ergibt sich daraus, daß eine vorschriftsmäßige Nullung zwar eine große, aber keine vollkommene Sicherheit zu bieten

¹ In den L.E.S. 1/1932 sind die ersten beiden Bedingungen umgestellt.

vermag. Liegt der Nulleiter über dem Außenleiter, so gibt es bei einer Unterbrechung des Nulleiters und Berührung des abgetrennten Nullleiterstückes mit dem Außenleiter stets zu hohe Berührungsspannungen, die bestehen bleiben. Aber auch wenn der Nulleiter unten liegt, können, falls die Erdungen nicht recht gut sind, unzulässige Berührungsspannungen auftreten, ohne daß eine Abschaltung erfolgt. Der Hauptnachteil der Nullung besteht aber darin, daß jede Berührungsspannung durch den Nulleiter an alle genullten Anlage-teile verschleppt wird, der Fehler also nicht lokalisiert bleibt.

58. Anwendungsgebiet der Nullung. Das gegebene Anwendungsgebiet der Nullung sind Kabelnetze in Städten und Fabriken, da hier die Nullungsbedingungen leicht erfüllbar sind. Eine Unterbrechung des Nulleiters im Kabel ist unwahrscheinlich. Eine gute Er-

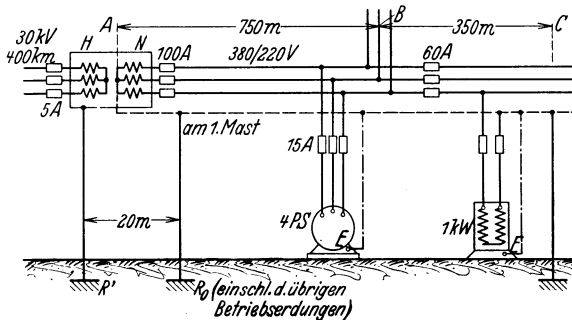


Abb. 58. Zum Zahlenbeispiel über Nullung.

dung des Nulleiters erreicht man, indem man jede Muffe mittels Erdplatte erdet und mit dem Nulleiter verbindet. Es empfiehlt sich jedoch nicht, die Erdung des Nulleiters dadurch vorzunehmen, daß man neben dem Kabel einen blanken Leiter (als Banderder) in die Erde verlegt und mit jeder Muffe und dem Nulleiter verbindet.

Weniger leicht sind die Nullungsbedingungen in Ortsnetzen (Freileitungen) zu erfüllen, besonders wenn es sich um lange Leitungen handelt. Jedoch kann man sich dann durch Verwendung eines Stationschalters helfen (vgl. Abschnitt 61).

59. Beispiel (Abb. 58). 1. Hochspannungserdung. Das 30 kV-Leitungsnetz bestehe aus 400 km zusammenhängenden Leitungen und sei durch eine Petersen-Spule kompensiert. Der unkompenzierte Kapazitätsstrom beträgt dann etwa

$$\frac{30 \cdot 400}{400} = 30 \text{ A.}$$

Der bei der Kompensation verbleibende Reststrom ist etwa 10% hiervon. Wir rechnen vorsichtshalber mit dem doppelten Wert:

$$6 \text{ A.}$$

Daraus rechnet sich der Widerstand der Hochspannungserdung zu

$$R' = \frac{125 \text{ V}}{6 \text{ A}} = 20 \ \Omega.$$

Der spezifische Widerstand des Erdreiches sei an der in Betracht kommenden Stelle $180 \ \Omega\text{m}$. Wir benötigen also, falls wir Band verlegen, nach Gl. (11) eine Bandlänge von

$$a = \frac{2,1 \cdot \rho}{R} = \frac{2,1 \cdot 180}{20} = 18,9 \text{ m,}$$

also rund 20 m.

2. Betriebserdung. a) Bemessung mit Rücksicht auf Übertritt der Hochspannung. Die Abschaltstromstärke der Hochspannungssicherung beträgt $2,5 \cdot 5 = 12,5 \text{ A}$. Da sie größer ist als der Erdschlußstrom von 6 A , so kommt dieser für die Rechnung in Betracht. Die Nulleitererdung soll also sein

$$R_0 = \frac{125}{6} = 20 \ \Omega.$$

Daran beteiligen sich alle Nulleitererdungen, so daß jede einzelne kleiner sein kann.

b) Bemessung mit Rücksicht auf einen Erdschluß eines Außenleiters.

Die Betriebserdung muß direkt (ohne Durchschlagssicherung) angeschlossen sein. Nach Abschnitt 36 darf der Betriebserdungswiderstand nicht größer sein als

$$R_0 = 2 \ \Omega.$$

Wir hatten hierbei keine bessere Erdschlußmöglichkeit als $5 \ \Omega$ angenommen. Besonders gute Erder (z. B. Wasserleitungsrohre) sind mit dem Nulleiter zu verbinden. Mit dieser Betriebserdung von $2 \ \Omega$ erreichen wir, daß bei einem Erdschluß

α) kein Außenleiter eine höhere Spannung als 250 V gegen Erde annehmen kann (dies ist notwendig, damit nicht überall Schutzmaßnahmen erforderlich werden),

β) die Spannung des Nulleiters unter 65 V bleibt.

3. Wahl der Sicherung mit Rücksicht auf Abschaltung. Wir setzen voraus, daß die Querschnitte schon festliegen bzw. mit Rücksicht auf den Spannungsabfall gewählt worden sind; der Nulleiter sei eben so stark wie die zugehörigen Außenleiter, Streckenabschnitt AB $s = 750 \text{ m}$, $q = 50 \text{ mm}^2$; Abschnitt BC $s = 350 \text{ m}$, $q = 25 \text{ mm}^2$.

Der Widerstand der 50 mm^2 -Leitung ist $0,37 \ \Omega/\text{km}$, der der 25 mm^2 -Leitung $0,74 \ \Omega/\text{km}$ (vgl. Zahlentafel 14 plus Zuschlag). Die Blind-

widerstände sind 0,68 und 0,72 Ω/km^* . Wir haben also von *A* nach *B*
 einen Widerstand von $2 \cdot 0,37 \cdot 0,75 = 0,555 \Omega$,
 einen induktiven Widerstand von $0,68 \cdot 0,75 = 0,51 \Omega$,
 von *B* nach *C*:

einen Widerstand von $2 \cdot 0,74 \cdot 0,35 = 0,518 \Omega$,
 einen induktiven Widerstand $0,72 \cdot 0,35 = 0,252 \Omega$,

Strom bei einem einpoligen Kurzschluß bei *B*:

$$\frac{220}{\sqrt{0,555^2 + 0,51^2}} = \frac{220}{0,753} = 292 \text{ A} ,$$

Strom bei einem einpoligen Kurzschluß bei *C*:

$$\frac{220}{\sqrt{(0,555 + 0,518)^2 + (0,51 + 0,252)^2}} = \frac{220}{1,315} = 167 \text{ A} .$$

Der Nennstrom der Sicherung darf im ersten Falle nicht größer sein als $292/2,5 = 117 \text{ A}$ und im zweiten Falle $167/2,5 = 67 \text{ A}$, d. h. also wegen der Normung der Schmelzsicherungen

100 A bzw. 60 A .

Für den thermischen Schutz andererseits darf die 50 mm²-Leitung und die 25 mm²-Leitung nicht höher abgesichert sein als (vgl. Fußnote S. 25)

125 A bzw. 80 A ,

so daß wir die Leitung wegen der Abschaltung untersichern müssen. Um nicht am Leitungsanfang mit 60 A absichern zu müssen, werden wir hinter der Abzweigstelle *B* eine Zwischensicherung in die Leitung *BC* einsetzen. Die Abschaltbedingung verhindert auch dann noch eine volle thermische Ausnutzung der Leitung. Allerdings würde bei einer solchen Ausnutzung der Spannungsabfall der Leitung kaum erträglich sein (vgl. Abschnitt 54). Wollte man die wenig beliebte Zwischensiche-

* Der Blindwiderstand ist vom Querschnitt der Leitungen ziemlich unabhängig und bewegt sich in Niederspannungsnetzen zwischen 0,65 und 0,75 Ω/km (vgl. nachstehende Zahlentafel).

Zahlentafel 14.

Querschnitt mm ²	Seil- Durch- messer mm	Ohmscher Widerstand eines Leiters Ω/km	Leiterabstand		
			0,8 m	1 m	1,2 m
			induktiver Widerstand einer Schleife aus 2 Leitern Ω/km		
25	6,3	0,698	0,726	0,754	0,778
35	7,5	0,499	0,704	0,732	0,756
50	9,0	0,349	0,682	0,710	0,732
70	10,5	0,250	0,662	0,690	0,706
95	12,5	0,184	0,640	0,668	0,692

rung vermeiden, so müßten die Leitungsquerschnitte erheblich größer gewählt werden, was natürlich eine unnötige Kupferverschwendung wäre.

Diesem Zwiespalt kann man, wie im Abschnitt 61 näher gezeigt wird, durch Einbau eines Stationsschalters entgehen und würde damit auch eine bessere Ausnutzung der Strecke AB erreichen.

4. Nullung des Motors. Die Nullung des Motors geschieht durch einfache Verbindung des Motors mit dem Nulleiter. Um den Querschnitt der Schutzleitung zu bestimmen, errechnen wir die Absicherung des Motors. Seine Leistung ist $4 \text{ PS} = 3 \text{ kW}$. Bei einem Leistungsfaktor von 0,86 und einem Wirkungsgrad von 85% ist der Vollaststrom

$$\frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,86 \cdot 0,85} = 6,25 \text{ A.}$$

Der Anlaufstrom¹ des Motors ist $2,4 \cdot 6,25 = 15 \text{ A}$. Der Motor wird mit 10 A abgesichert, da eine 10 A-Sicherung den 1,5-fachen Nennstrom eine Stunde lang aushalten muß, ohne zu schmelzen (K.P.I. § 52).

Da die Nullungsleitung von der Motorsicherung thermisch geschützt werden muß, muß ihr Querschnitt mindestens

$$1,5 \text{ mm}^2$$

sein². Jedoch genügt dieser Querschnitt mechanisch nicht, wenn die Leitung ungeschützt verlegt ist. Für diese Verlegungsart muß der Querschnitt mindestens

$$4 \text{ mm}^2$$

sein.

5. Einphasiger ortsveränderlicher Stromverbraucher. Stromaufnahme $1000/220 = 4,5 \text{ A}$. Sicherung 6 A. Leiterquerschnitt 1 mm^2 . Die Schutzleitung (Nullungsleitung) muß in der beweglichen Zuführungsleitung mit enthalten sein.

60. Erdung und Nullung schließen sich gegenseitig aus. Wir werfen die Frage auf, ob in ein und demselben Netz Schutzerdung und Nullung nach Belieben verwendet werden dürfen. Wir nehmen etwa an, in den Anschlußanlagen werde im allgemeinen genullt. An einer entfernt liegenden Stelle befinde sich ein Motor, der geschützt werden soll. Zum Betrieb des Motors ist der Nulleiter nicht erforderlich. Da günstige Erdungsverhältnisse vorliegen (z. B. eine Wasserleitung, Brunnen oder dgl.), entscheide sich der Anlagenbesitzer für die Schutzerdung, da er sich dann das Nachziehen des Nulleiters erspart. Je besser nun diese Erdung ist, um so höher wird bei Auftreten eines Körperschlusses die Spannung

¹ Vgl. die Normalbedingungen für den Anschluß von Motoren an öffentliche Elektrizitätswerke.

² Nach § 18 der L.E.S. 1/1932 ist thermisch der halbe Querschnitt zulässig.

des Nulleiters, die im ungünstigsten Falle Phasenspannung erreichen kann. Allerdings wird, wenn die Betriebserdung richtig bemessen und die Sicherung des Motors nicht überbrückt ist, diese in „hinreichend kurzer Zeit“ ansprechen. Nehmen wir aber den Fall an, daß die Sicherung überbrückt ist oder nach dem ersten Abschmelzen durch den Körperschluß überbrückt wird, damit der Motorbetrieb nicht unterbrochen wird, so wird nicht nur der Bedienende gefährdet, sondern alle im Netz ordnungsmäßig genullten Anlageteile unter eine gefährliche Spannung gesetzt. Um dies zu verhindern, dürfen in einem Netz, in dem genullt wird, keine Schutzerdungen ohne gleichzeitige Verbindung mit dem Nulleiter vorgenommen werden¹. Mit anderen Worten: in jedem Netz darf nur entweder geerdet oder genullt werden. Im allgemeinen wird die Entscheidung zwischen Schutzerdung oder Nullung bei dem Elektrizitätswerk liegen.

Man könnte allerdings auch für den vorliegenden Fall besonders gute Schutzerdungen verbieten. Es ist aber widersinnig, jemand zu zwingen, absichtlich eine schlechte Erdung herzustellen, möglicherweise gar eine schlechtere als zu seiner persönlichen Sicherheit erforderlich ist.

Dies ist einer der Gründe, warum manche Elektrizitätswerke sich bei der Frage „Erdung oder Nullung?“ für die Erdung (meist in Verbindung mit anderen Schutzmaßnahmen) und gegen die Nullung entschieden haben. Schon eine unbeabsichtigte gute Erdung kann den Nulleiter und die genullten Anlageteile auf eine gefährliche Spannung bringen. Ein zweiter Grund ist die Gefahr, die eine Unterbrechung des Nulleiters hervorruft.

Ungünstig für die Nullung ist ferner der Umstand, daß die Spannung durch den Nulleiter überallhin an alle „geschützten“ Anlageteile verschleppt wird. Bei dieser Schutzmaßnahme kann man sich nicht durch eine noch so gute Installation schützen, da eine unkontrollierbare Unvorschriftsmäßigkeit in einer anderen Anschlußanlage den Nulleiter in seinem ganzen Verlauf unter Spannung setzen kann.

Die Einhaltung der Nullungsbedingungen ist daher absolut erforderlich. Sie wird erleichtert durch die im nächsten Abschnitt beschriebenen Stationsschalter. Bemerkenswert ist, daß bei Verwendung eines solchen Schalters auch die Gefahr durch eine besonders gute Schutzerdung beseitigt wird, da man mit dem Schalter den Spannungszustand des Nulleiters überwachen kann.

61. Einhaltung der Nullungsbedingungen mit Stationsschutzschaltern.

Um den Nullungsbedingungen zu genügen, kann man in der Station einen besonderen Schalter verwenden, den sogenannten Stationsschalter.

¹ Vgl. Abschnitt 53, in dem schon die Verbindung des Nulleiters mit besonders guten Erdern, z. B. der Wasserleitung gefordert wurde.

Zur Erfüllung der Abschaltbedingung enthält der Schalter eine Überstromauslösung im Nulleiter. Da im Nulleiter nur ein kleiner Differenzstrom fließt, kann die Auslösung niedriger eingestellt werden, und zwar etwa $\frac{1}{3}$ des Nennstroms eines Außenleiters. Bei einpoligem Kurzschluß wird der auftretende Kurzschlußstrom den Nulleiterauslöser durchfließen und die Abschaltung der drei Außenleiter bewirken.

In dem Zahlenbeispiel des Abschnittes 59 sei der durch unsymmetrische Belastung hervorgerufene Differenzstrom („normaler Nulleiterstrom“) am Nulleiteranfang 35 A. Der Abschaltstrom, bei dem also eine Auslösung in etwa $\frac{1}{2}$ Minute erfolgt, ist etwa das Doppelte des Nennstroms, d. i. 70 A. Der kleinste einpolige Kurzschlußstrom beträgt

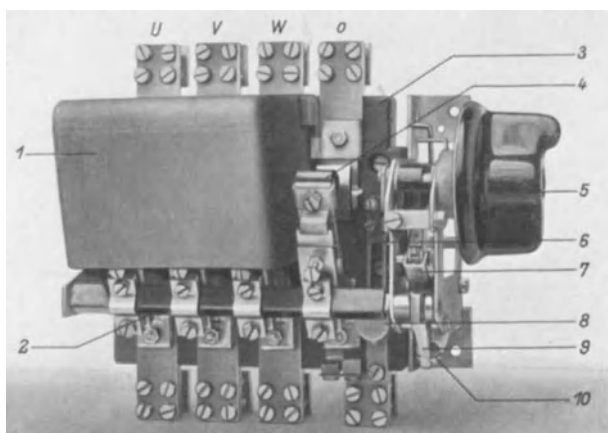


Abb. 59. Stationsschalter ohne Überstromauslösung in den Außenleitern und ohne Fehlerstromauslösung für 380 V, 200 A. Siemens-Schuckertwerke.

in dem betrachteten Beispiel 167 A. Also ist ein Nulleiterauslöser zu wählen, dessen Abschaltstrom zwischen 70 und 167 A liegt, z. B. 120 A.

Um ferner ein unzulässiges Ansteigen der Nulleiterspannung zu verhindern, werden die Stationsschalter auch mit einer Fehlerstromspule ausgeführt, die zwischen Nulleiter und Erde geschaltet wird. Der Fehlerstromauslöser wird so eingestellt, daß er bei einem Hilfserdungswiderstand von 200Ω bei einer Spannung von 50 V gegen Erde anspricht. Steigt bei einem Erdschluß eines Außenleiters die Nulleiterspannung über den eingestellten Wert, dann werden die drei Außenleiter abgeschaltet. Die Auslösung arbeitet verzögert: bei einer Spannung von 50 V dauert die Abschaltung etwa $\frac{1}{2}$ Minute, bei 200 V etwa 1 Sekunde.

Bei Unterbrechung des Nulleiters wird eine Abschaltung nur dann erfolgen, wenn das am Transformator verbleibende Nulleiter-

stück eine Spannung über den Einstellwert erhält. Das wird gewöhnlich, aber nicht immer der Fall sein.

Diese Stationsschalter, die also im einfachsten Fall aus einer Überstromauslösung im Nulleiter bestehen, werden gebaut:

- a) ohne Überstromauslösung in den Außenleitern,
- b) mit Überstromauslösung in den Außenleitern.

Im ersten Falle wird der Überstromschutz von den Sicherungen übernommen. — Die Überstromauslöser sind meist thermische Auslöser (Wärmeauslöser), die also verzögert auslösen. Häufig werden sie noch mit einer zusätzlichen Schnellauslösung für Kurzschluß versehen.

Beidegenannten Ausführungsarten können mit und ohne Fehlerstromspule ausgerüstet sein.

Im nachstehenden werden einige Stationsschalter beschrieben.

Stationsschalter ohne Überstromauslösung in den Außenleitern und ohne Fehlerstromauslösung. Ein solcher einfacher Stationsschalter ist in Abb. 59 wiedergegeben. Er ist 4-polig, mit abschaltbarem Nulleiter, für 380 V und 200 A. Die vier Pole *U*, *V*, *W* und *O* des Schalters sind auf einer Grundplatte 3 aus Isoliermaterial befestigt. Die beweglichen Kontakt-hämmer 4 sind auf einer isolierten

Vierkantwelle 2 festgeschraubt. Mit dem aus Isolierstoff bestehenden Handgriff 5 wird die Welle 2 über das Schaltschloß (Freilaufkupplung) 7 gedreht. Beim Einschalten wird eine Ausschaltfeder 10 gespannt, die an dem Hebelarm 9 der Welle 2 aufgehängt ist. Der Nulleiterstrom fließt über einen Bimetallstreifen 6, der sich infolge der Erwärmung durchbiegt und bei einer bestimmten Größe und Dauer des Nulleiterstromes die Freilaufkupplung löst, so daß die Feder 10 den Schalter ausschaltet. Mit der Kordelmutter 8 kann der Auslöseweg des Bimetallstreifens und damit der Auslösestrom verändert werden. Über den Schaltstücken der 3 Pole *U*, *V* und *W* befindet sich eine abnehmbare Lichtbogenkammer 1, die ein Überschlagen des Lichtbogens von Pol zu Pol oder von Pol nach Erde verhindern soll.

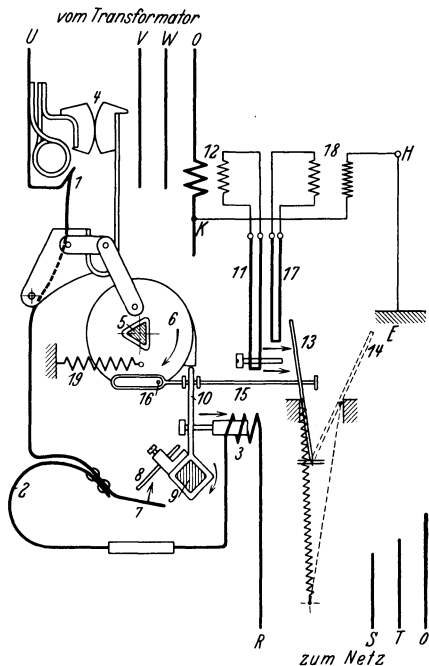


Abb. 60. Stationsschalter mit Überstromauslösung in den Außenleitern und mit Fehlerstromauslösung für 380 V, 200 A. Allgem. Elektrizitätsgesellschaft.

Stationsschalter mit Überstromauslösung in den Außenleitern und mit Fehlerstromauslösung. Einen solchen Stationsschalter zeigt die Abb. 60.

Wir verfolgen den Strom der Phase *U*. Er fließt über den Hauptkontakt *1*, den bimetallicischen Wärmeauslöser *2*, den elektromagnetischen Schnellauslöser *3* nach der Netzklemme *R*. Parallel zu den Hauptkontakten *1* liegen die Abreißkontakte *4* mit Blasspule. Die Hauptschaltwelle *5* ist über das (mit Freiauslösung versehene) Klinkenschloß *6*

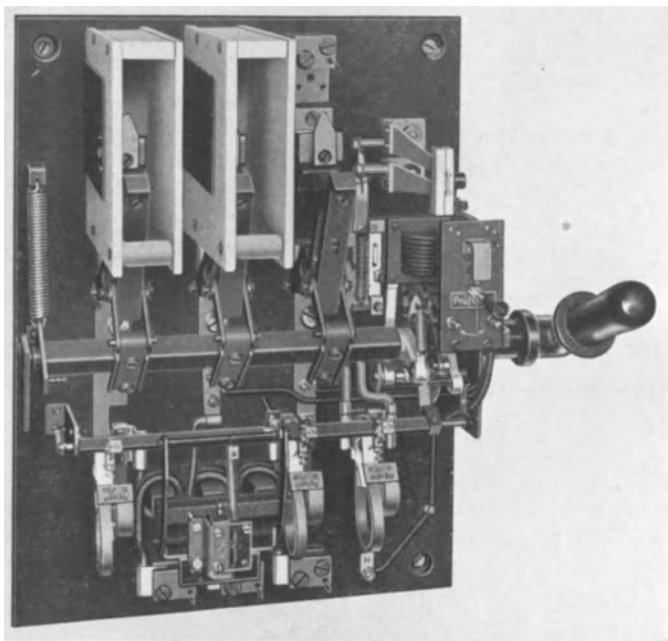


Abb. 61. Ansicht des Stationsschalters der Abb. 60.

schloß *6* mit dem Schaltgriff gekuppelt. Bei Überstrom in den Phasen bewegt sich das freie Ende *7* des Wärmeauslösers *2* nach oben, trifft auf den Auslösestift *8* und dreht die Auslösewelle *9*. Der Arm *10* gibt das Klinkenschloß *6* frei und die Hauptschaltwelle *5* wird durch eine Feder *19* in der Pfeilrichtung in die Ausschaltstellung gezogen.

Bei Kurzschluß dreht der Kern des Schnellauslösers *3* den Arm *10* und bringt den Schalter in derselben Weise zum Auslösen.

Der Nulleiterauslöser besteht aus einem Bimetallstreifen *11*, der vom Strom des Nulleiters über einen kleinen Stromwandler *12* erwärmt wird. Bei Überstrom bewegt er sich nach rechts und trifft mit einem Stift auf den als Kniehebel ausgebildeten Arbeitsspeicher *13*.

Dieser schnappt über den toten Punkt in die gestrichelte Stellung *14*, nimmt dabei mittels der Stange *15* den Arm *10* mit und öffnet dadurch das Schloß. Beim Auslösen bewegt sich das Schloß *6* in der Pfeilrichtung und führt mit dem Stift *16* den Arbeitsspeicher *13* wieder in seine frühere betriebsbereite Stellung zurück.

Der Fehlerstromauslöser *17* arbeitet verzögert und ist ebenfalls als Bimetallstreifen ausgebildet, der über den Spannungswandler *18* von der zu überwachenden Spannung des Nulleiters beheizt wird. Er wirkt beim Auslösen in derselben Weise wie der Nulleiterauslöser.

Durch die transformatorische Speisung des Nulleiterauslösers und des Fehlerstromauslösers ist man in der Wahl der Zeitkonstante der Bimetallstreifen freier. In Verbindung mit einer geeigneten Sättigung der Wandler ist man dann in der Lage, die Auslösecharakteristiken günstiger zu gestalten als bei direkt beheizten Wärmeauslösern.

Abb. 61 zeigt eine Ansicht des eben beschriebenen Stationsschalters.

XIV. Die Schutzschaltung¹.

62. Grundgedanke. Abb. 62 zeigt die Schutzschaltung eines zwei-poligen Gerätes. Eine Spannungsspule (gewöhnlich Fehlerstromspule

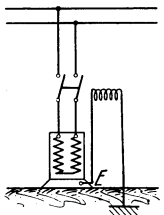


Abb. 62. Grundgedanke der Schutzschaltung.

genannt) wirkt auf einen Schalter und ist zwischen dem metallenen Gehäuse des zu schützenden Stromverbrauchers und Erde geschaltet. Tritt ein Körperschluß auf und überschreitet hierbei die Spannung zwischen dem Gehäuse und der Erde den eingestellten Wert, dann wird der Strom und damit die Berührungsspannung abgeschaltet.

Die Spannungsspule ist wie ein Voltmeter geschaltet (Abb. 63), mit dem man die Berührungsspannung messen will (vgl. Abschnitt 10 und 11).

Die Schutzschaltung besteht also im wesentlichen aus einem selbsttätigen Schalter, dem Schutzschalter, der eine Spannungsauslösung enthält, die beim Überschreiten einer eingestellten Spannung anspricht. Im störungsfreien Zustand führt die Spule weder Spannung noch Strom.

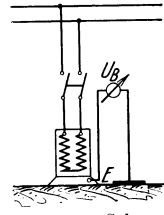


Abb. 63. Schema der Berührungsspannungsmessung zum Vergleich mit dem Schema der Schutzschaltung.

¹ In diesem Kapitel werden nur die Schutzschalter für Anschlußanlagen behandelt. Die Stationsschutzschalter dienen in erster Linie zur Erfüllung der Nullungsbedingungen und sind daher im XIII. Kapitel (Abschnitt 61) besprochen. Sie werden aber auch häufig zur Überwachung von Netzen verwendet, in denen nicht die Nullung, sondern eine andere Schutzmaßnahme angewendet wird.

Beide Schutzschalter wurden von O. Heinisch und A. Riedl (Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk) angegeben.

Das Prinzipbild eines Schutzschalters zeigt Abb. 64. Die Leitung, die von Klemme K zum Anlageteil führt, heißt Schutzleitung (Schutzschaltungsleitung); die Leitung, die die Klemme H mit dem Hilfserder verbindet, heißt Hilfserdungsleitung.

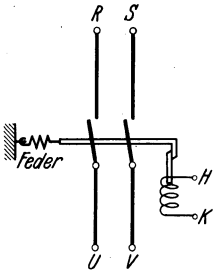


Abb. 64. Prinzipbild eines Schutzschalters.

63. Spannungsdiagramm. Einfluß des Hilfserdungs-widerstandes. Das Spannungsdiagramm der Schutzschaltung zeigt Abb. 65. R ist der Ohmsche Widerstand der Spannungsspule, X ihr induktiver Widerstand, H der Widerstand der Hilfserdung. Die Spannung an den Klemmen der Spule ist U , die Spannung zwischen Gehäuse und Erde U_E . Spricht die Spule bei einem Fehlerstrom I an, so ist beim Abschalten die Spannung an der Spule

$$U = I \sqrt{R^2 + X^2} \tag{45}$$

und die Spannung zwischen dem schutzgeschalteten Anlageteil und Erde

$$U_E = I \sqrt{(R + H)^2 + X^2}. \tag{46}$$

Wählt man die Widerstände R und X der Fehlerstromspule genügend groß, so kann man die Wirksamkeit des Schutzschalters in weitem Maße vom Widerstand H des Hilfserders unabhängig machen.

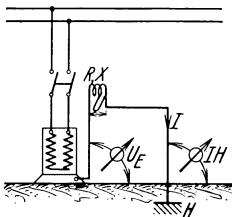
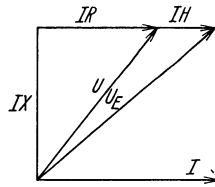


Abb. 65. Spannungsdiagramm der Schutzschaltung.



Die Fehlerstromspule zeige etwa folgende elektrischen Verhältnisse: Ansprechstrom etwa 50 mA, Widerstände $R = X = 200 \Omega$. Wir errechnen die Abhängigkeit der Spannung gegen Erde vom Widerstand der Hilfserdung. Aus Gl. (45) folgt

die Spannung an den Spulenklammern beim Ansprechstrom

$$U = 0,05 \cdot \sqrt{200^2 + 200^2} = 14,1 \text{ V.}$$

Gl. (46) liefert für verschiedene Widerstände H der Hilfserdung die nachstehenden Auslösespannungen:

$H = 0$	100	200	400	800	1000 Ω
$U_E = 14,1$	18	22,3	31,5	51	67 V

Eine Zunahme des Widerstandes der Hilfserdung um 100 Ω hat nur eine Zunahme der Auslösespannung um zunächst rund 4 V zur Folge. Erst bei einem Widerstand von 1000 Ω ist die Spannung gegen Erde größer als 65 V. Der Widerstand der Hilfserdung kann also ziemlich groß sein. Es genügt gewissermaßen eine „Spannungserdung“.

b) Die Rücksicht auf einen Erdschluß eines Außenleiters im Niederspannungsnetz verlangt nach Abschnitt 36 eine Unterscheidung, ob neben der Schutzschaltung die Erdung oder die Nullung zugelassen wird. Es sei auf diesen Abschnitt verwiesen. Bei der Aufstellung der Bemessungsregeln wurden jedoch jene Erdschlüsse nicht berücksichtigt, die über schutzgeschaltete Geräte auftreten können, die absichtlich oder zufällig gut geerdet sind. Wir beweisen nun, daß Spannungsverlagerungen durch solche Erdschlüsse bei unmittelbaren Betriebserdungen nur ganz kurzzeitig bestehen bleiben können, weil der Schutzschalter

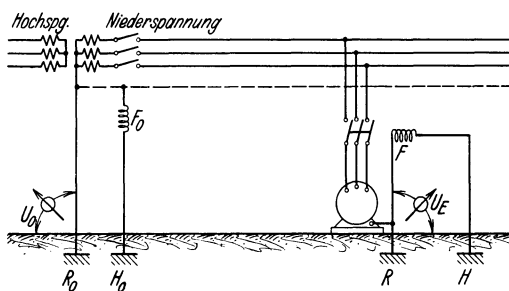


Abb. 67. Zur Schutzschaltung geerdeter Geräte.

stets mehr als 25 V Spannung bekommt¹. Es handelt sich etwa um einen Pumpenmotor (einer kleinen Wasserversorgungsanlage), der eine natürliche gute Erde von $R = 5 \Omega$ habe und schutzgeschaltet ist (Abb. 67, aber ohne Fehlerstromspule F_0). Die Spannung

des Netzes sei 380/220 V, die Betriebserdung $R_0 = 2 \Omega$. Dann erhält bei einem Körperschluß des Motors (am Phasenanfang) das Motorgehäuse eine Spannung von

$$U_{ph} \cdot \frac{R}{R + R_0} = 220 \cdot \frac{5}{7} = 157 \text{ V}$$

und die Nullpunktverschiebung beträgt

$$U_{ph} \cdot \frac{R_0}{R + R_0} = 220 \cdot \frac{2}{7} = 63 \text{ V},$$

so daß also auch die Außenleiterspannung nicht wesentlich über 250 V steigt. Trotzdem wird, da der Schutzschalter 157 V erhält, aber schon bei etwa 25 V anspricht, der Erdschluß sofort beseitigt werden.

Auch wenn die Erdung besser als 5Ω und die Betriebserdung

¹ Eine Spannung unter 25 V wäre zwar für den Benutzer des schutzgeschalteten Gerätes gefahrlos, aber ein längeres oder gar dauerndes Bestehenbleiben von größeren Spannungsverlagerungen ist bei unmittelbarer Nullpunktserdung stets, bei unmittelbarer Außenleitererdung bei Verwendung der Nullung unzulässig. Auch die Erdströme (über R und R_0) dürfen nicht bestehen bleiben. — Ist andererseits der Außenleiter über eine Durchschlagsicherung geerdet, so sind Spannungsverlagerungen bedeutungslos. Erdströme über R und R_0 treten nur auf, wenn die Sicherung durchgeschlagen ist. Dann schaltet aber, wie das obige Beispiel zeigt, der Schutzschalter nur dann nicht ab, wenn R_0 sehr groß ist. In diesem Falle sind jedoch die Erdströme klein. R_0 wird übrigens durch die Rücksicht auf einen Übertritt der Hochspannung begrenzt.

es braucht keine „Stromerdung“ zu sein. Man rechnet gewöhnlich mit einem Widerstand von 200Ω . Die Abschaltung erfolgt dann bei einer Spannung gegen Erde¹ unter 25 V .

Ist der zu schützende Stromverbraucher mit einem Pol an einem Nulleiter angeschlossen, so wird dieser zweckmäßig mit abgeschaltet, und zwar aus folgendem Grunde. Bekommt nämlich einmal der Nulleiter Körperschluß, so wird das betreffende Gerät im Betrieb bleiben, solange der Nulleiter nur geringe Spannung gegen Erde führt, was gewöhnlich der Fall ist. Erhält aber der Nulleiter durch eine Störung, z. B. Nulleiterbruch, eine größere Spannung gegen Erde, so wird zwar der Schutzschalter ausschalten, die Spannung aber am Gerät bestehen bleiben, wenn der Nulleiter nicht mit abgeschaltet wird.

Um bei einem Schluß mit einem metallenen Rohrmantel geschützt zu sein, empfiehlt es sich, die Rohrmäntel mit dem Schutzleiter zu ver-

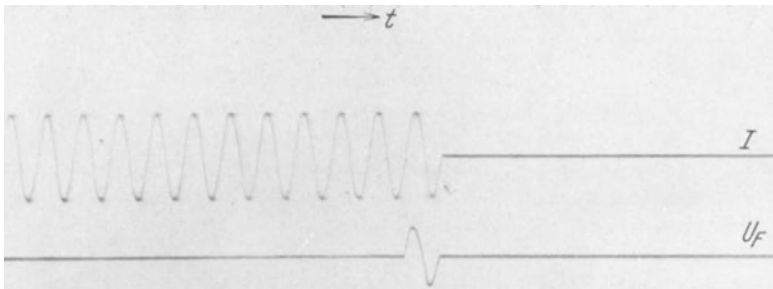


Abb. 66. Abschaltoszillogramm eines Schutzschalters.

binden. Über die Verwendung der Rohrmäntel als Schutzleiter vgl. Abschnitt 14.

Die Fehlerstromauslösung (in Anschlußanlagen) ist eine Schnellauslösung, also ohne jede Verzögerung. Abb. 66 zeigt ein Abschaltoszillogramm. I ist der Strom des Gerätes, U_F die Spannung an der Fehlerstromspule. Die Schaltzeit betrug 1 Periode = $0,02$ Sekunden. Die Abschaltung erfolgt also unvergleichlich schneller als bei einem Schutz durch Erdung oder Nullung, ein großer Vorzug der Schutzschaltung.

Bevor wir einzelne Konstruktionen beschreiben, wollen wir erst den Einfluß der Schutzschaltung auf die Größe der Betriebserdung behandeln.

64. Bemessung der Betriebserdung bei Schutzschaltung. a) Die Betriebserdung ist auch bei Schutzschaltung auf Übertritt der Hochspannung auf die Niederspannungsseite zu bemessen (vgl. Abschnitt 36).

¹ Die Berührungsspannung, auf die es eigentlich ankommt, ist noch kleiner als die Spannung gegen Erde; vgl. Abschnitt 9.

schlechter als 2Ω ist, wird der Schutzschalter noch abschalten. Das Verhältnis von $R_0 : R$ kann bis

$$\frac{220 - 25}{25} = 8$$

betragen. In einem 220/127 V-Netz liegen die Verhältnisse ähnlich.

Ist im Netz ein Stationsschalter mit Fehlerstromauslösung (F_0 in Abb. 67) eingebaut, so erhält im obigen Beispiel F_0 63 V und F 157 V. Die Fehlerstromauslösung im Stationsschalter ist gewöhnlich so ausgeführt, daß sie bei einer Spannung von 50 V in etwa $\frac{1}{2}$ Minute und bei einer Spannung von 200 V in etwa 1 Sekunde abschaltet. Hingegen schaltet die Fehlerstromspule in Anlagenschutzschaltern über 25 V in etwa 0,02 bis 0,05 Sekunden ab.

Es wird daher die Fehlerstromspule F und nicht F_0 ansprechen, so daß die Fehlerstelle vom Netz abgeschaltet wird, das Netz selbst aber eingeschaltet bleibt. Diese Selektivität wird bis zu einem Widerstandsverhältnis von $R_0 : R = 200 : 25 = 8$ sicher vorhanden sein.

Ist ein Stationsschalter mit Fehlerstromspule vorhanden, so empfiehlt es sich oft, die Betriebserdung in der Nähe der Station mit größerem

und die an den Leitungsenden mit kleinerem Widerstand auszuführen. Dann kann man bei einer Unterbrechung des Nulleiters damit rechnen, daß eine genügend hohe Spannung am nicht abgetrennten Nulleiterstück und damit an der Fehlerstromspule des Stationsschalters auftritt, so daß das Netz bei dieser Störung abgeschaltet wird.

65. Arten der Schutzschalter. Die Schutzschalter werden in verschiedenen Kombinationen gebaut. Wir unterscheiden:

1. Schutzschalter ohne Überstromauslösung,
 - a) ohne Steckdose: Trennschutzschalter,
 - b) mit Steckdose: Steckdosen-Schutzschalter.
2. Schutzschalter mit Überstromauslösung,
 - a) für Hausanschlüsse: Hausanschluß-Schutzschalter,

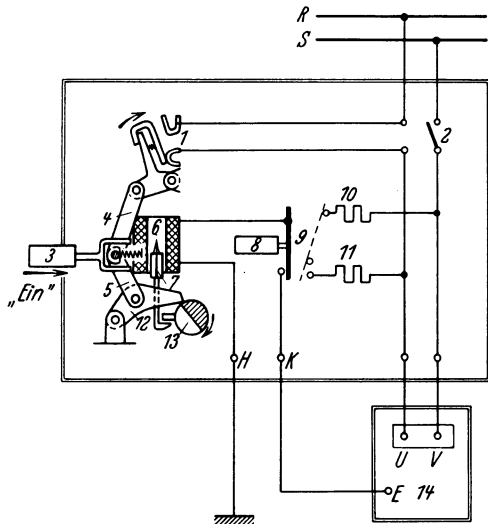


Abb. 68. Trennschutzschalter für 380 V, 15 A. Siemens-Schuckertwerke.

- b) für einzelne Stromkreise: Stromkreisschutzschalter,
 c) für Drehstrommotoren: „Motorschutzschalter mit Fehlerstromauslöser“¹.

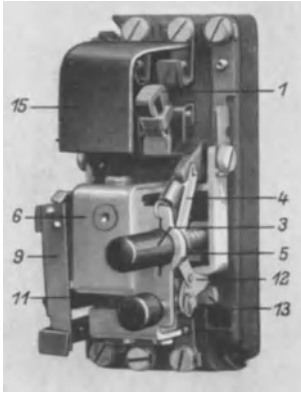


Abb. 69. Ansicht des Trennschutzschalters der Abb. 68.

Ein Knick und die Kontakte 1 und 2 geöffnet werden. Das Kniegelenk wirkt als Freilaufkupplung, d. h. der Schalter kann jederzeit, auch während



Abb. 70. Außenansicht eines Steckdosenschutzschalters. Schiele & Bruchsaler-Industriewerke, Baden-Baden.

des Einschaltens ausgelöst werden und die Ausschaltung kann durch Drücken des Druckknopfes nicht behindert werden. Die Prüftaste 8 dient zur Prüfung, ob die selbsttätige Auslösung und die Hilfserdung *H* in Ordnung ist. Beim Drücken der Prüftaste wird die Magnetspule 6 von der Erdungsklemme *E* des Geräts getrennt, dann zuerst über den Widerstand 11 an den einen und hierauf (beim Weiterdrücken) über den Widerstand 10 an den anderen Außenleiter gelegt. Die Auslösung erfolgt also auch dann, wenn einer der Außenleiter Erdschluß und dadurch

¹ Motorschutzschalter ohne Zusatz genügt nicht, da man darunter gewöhnlich einen Schalter zum Schutz gegen Überlastung, z. B. bei Einphasenlauf versteht.

keine Spannung gegen Erde hat. Abb. 69 gibt eine Ansicht dieses Trennschutzschalters wieder.

Steckdosenschutzschalter. Dieser Schutzschalter ist mit einer Steckdose kombiniert. Er ist hauptsächlich in Anschlußanlagen am Platz, in denen im allgemeinen keine Schutzmaßnahme erforderlich ist, sondern nur einzelne Geräte (z. B. in Waschküchen, Kellern usw.) geschützt werden sollen. Bei Verwendung eines Steckdosenschutzschalters fällt ein Nachziehen der Schutzleitung in den Rohren fort, die Schutzleitung liegt nur in der beweglichen Schnur. Vom Schutzschalter aus führt eine Erdungsleitung unmittelbar zum Hilfserder. Eine Ausführung zeigt die Abb. 70 in Außenansicht und Abb. 71 im Schnitt.

Die Zuleitungen werden durch die Stopfbuchse 1 des aus Isolierpreßstoff bestehenden Wandkastens 2 wasserdicht eingeführt. Sie werden bei zweipoligen Apparaten an die Klemmen *R* und *O*, bei dreipoligen an *R*, *S*, *T* angeschlossen. Die Hilfserdleitung wird innerhalb oder außerhalb des Wandkastens mit der Klemme *H* verbunden. Nach dem Anschluß wird das Einsatzgehäuse 3 eingeschraubt,

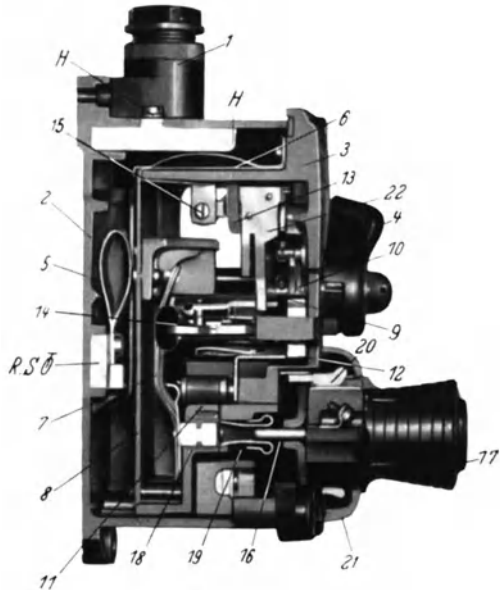


Abb. 71. Schnitt durch den Steckdosenschutzschalter der Abb. 70.

wobei sich sämtliche Verbindungen zwischen Einsatzgehäuse und Wandkasten mittels der Kontaktfedern 5/6 selbsttätig herstellen. Der Griff 4 dient zum Ein- bzw. Ausschalten des im Einsatzgehäuse befindlichen 2- bzw. 3 poligen Schalters 7. Die Isolierplatte 8 schließt den herausgenommenen Einsatz gegen Zugriffe und Verstaubung der Mechanik ab. Bei automatischer Auslösung springt der Griffhebel selbsttätig auf „Aus“ und zeigt die veränderte Schalterstellung an. Will man Fehlerstromspule, Mechanik und Hilfserdungsanlage des Schutzschalters prüfen, so führt man den Griff 4 langsam in Richtung „Aus“. Die Innenmechanik wird bei dieser Prüfbewegung nicht bewegt, dagegen wird von der Griffwelle 9 der Prüfschalter 10 mitgenommen, der einen künstlichen Fehlerstrom von der spannungsführenden Kontaktfeder 7 über induktionsfreie Widerstände 11, über die Schleiffedern 12 und über die

Fehlerstromspule 13 zur Hilfserdung leitet. Ist die Einrichtung in Ordnung, so löst der Anker 22 der Fehlerstromspule die Freiauslösung 14 aus und die Schalterkontakte 7 öffnen sich.

Um die Fehlerstromspule 13 gegen Beschädigung durch Überspannungen atmosphärischen Ursprungs zu schützen, liegt parallel zu ihr die Funkenstrecke 15.

Die Verbindung der Steckerstifte 16 des Schutzsteckers 17 mit den Schalterkontakten 7 geschieht über die wasserdicht eingepreßten Kontaktklötze 18 und die Kontaktfedern 19. Die Schutzleitung vom Metallmantel des ortsveränderlichen Anschlußgerätes verbindet sich mittels der Schutzkontakte 20 beim Einführen des Steckers 17 in die Schutzsteckdose 21, bevor die Steckerstifte 16 die Kontaktfeder 19 berühren.

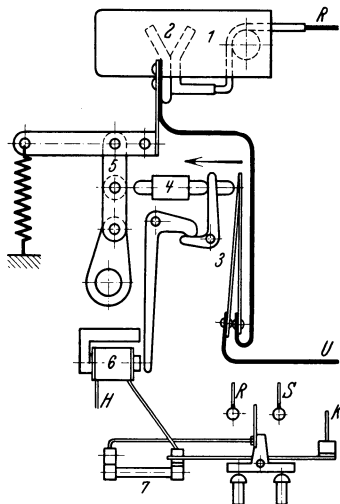


Abb. 72. Hausanschlußschalter für 380 V, 60 A. Felten & Guillaume Carlswerk, Köln-Mülheim.

Hausanschlußschalter. Abb. 72 zeigt Schaltung und Anordnung eines Hausanschlußschalters. Der Schalter besitzt Überstromauslösung in den drei Außenleitern und eine Fehlerstromspule, die auf 25 V eingestellt ist und unverzögert wirkt. Der Strom geht von R über die Blasspule 1 zu den Kontakten 2, von dort durch eine flexible Verbindung über die thermische Überstromauslösung 3, die aus einem Bimetallstreifen besteht, zur Ableitung U. Der Bimetallstreifen bewegt sich bei Erwärmung durch Überstrom und löst über den Kraftspeicher 4 ein Freiauslöseschloß (Kniegelenk) 5 aus. Bei Kurzschluß wird der Bimetallstreifen durch elektro-

dynamische Abstoßung nach links gedrückt und löst ohne Benutzung des Kraftspeichers die Freiauslösung direkt aus.

Die Fehlerstromspule 6 wirkt auf eine Welle, die alle Freiauslösungen gleichzeitig betätigt. Zur Prüfung wird die Spule von dem zu schützenden Anlageteil abgetrennt und über einen Widerstand 7 wahlweise an zwei Phasen gelegt.

Jede Phase einschließlich Nulleiter hat eine getrennt für sich wirkende Freiauslösung. Bei Überstrom oder Kurzschluß schaltet nur die davon betroffene Phase ab. Bei Fehlerstrom schalten dagegen sämtliche Schaltkontakte gleichzeitig, ab, wobei die Nulleiterabschaltung etwas nacheilt.

Einen anderen Hausanschlußschalter zeigt die Abb. 73. Der Strom fließt von R über die Blasspule 1 zu den Kontakten 2, und von

hier über eine stromführende Ausschaltfeder 3 zu dem thermischen Überstromauslöser 4, der aus einem Bimetallstreifen mit einem Stift besteht, zur Ableitung U . Der Stift wirkt auf die Wellenfeder 5, die bei Ansprechen das Kniegelenk der Freiauslösung 6 durchdrückt. Die Fehlerstromspule 7 wirkt ebenfalls auf die Wellenfeder. Die Prüftaste 8 trennt die Fehlerstromspule vom zu schützenden Anlagenteil und legt sie unter Zwischenschaltung des Widerstandes 9 an die Phase U .

Bei Überstrom bewegt sich der Stift je nach der Erwärmung mehr oder weniger schnell nach oben. Bei Kurzschluß tritt diese Bewegung sofort ein (Schnellausschaltung), ohne daß eine Erwärmung nötig ist, da die beiden Schenkel des Streifens infolge der entgegengesetzten Ströme sich elektrodynamisch abstoßen.

Stromkreisschutzschalter. Diese Schalter sind zum Schutze der einzelnen Verbrauchsstromkreise bestimmt. Durch diese Dezentralisierung der Schutzschalter wird eine große Selektivität erzielt, da nur der kranke Stromkreis abgeschaltet wird¹.

Motorschutzschalter mit Fehlerstromspule. Abb. 74 zeigt schließlich einen Motorschutzschalter.

Der Strom der Phase R führt über die Primärwicklung des Stromwandlers 1,

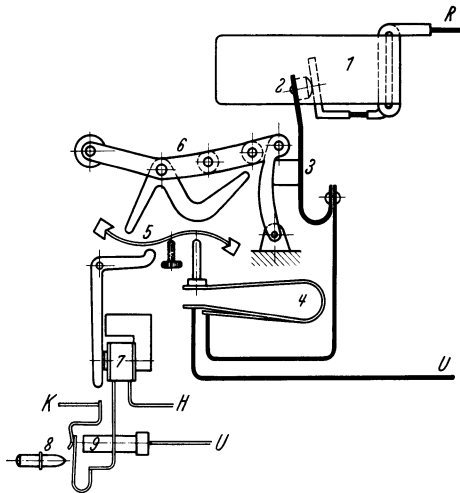


Abb. 73. Hausanschlußschalter für 380 V, 60 A. Schiele & Bruchsaler-Industriewerke, Baden-Baden.

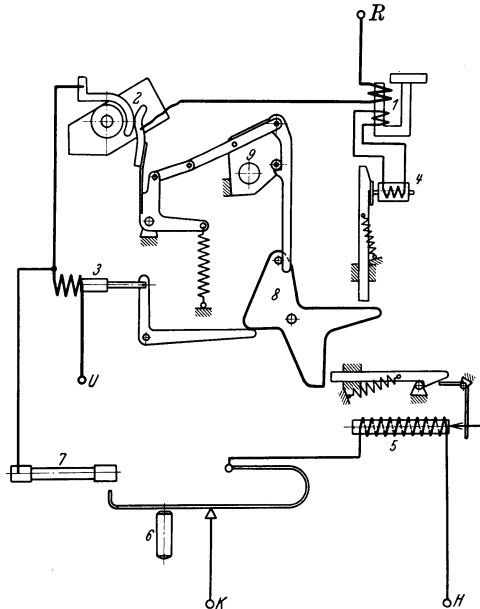


Abb. 74. Motorschutzschalter mit Fehlerstromauslösung für 500 V, 60 A. Siemens-Schuckertwerke.

¹ Stromkreisschutzschalter werden von Voigt & Haeffner, Frankfurt a. M. gebaut.

über die Schaltstücke 2 und über die Schnellauslösung 3 zur Phase *U* des Motors. Die Sekundärwicklung des Stromwandlers 1 führt zur thermischen Auslösung 4. Die Fehlerstromspule 5 liegt zwischen den Klemmen *K* für die Schutzleitung und *H* für die Hilfserdungsleitung und kann durch die Prüftaste 6 von der Schutzleitung abgetrennt und über einen Widerstand 7 an eine Phase gelegt werden.

Schnellauslösung 3, Zeitauslösung 4 und Fehlerstromauslösung 5 arbeiten auf das Schaltschloß 8, das über die Freilaufkupplung 9 die Schaltstücke 2 öffnet.

Dritter Teil.

Die Erdungsleitsätze nebst Erläuterungen.

Vorbemerkung: Die Erläuterungen und Zusätze sind schräg (kursiv) gedruckt. Die durchgestrichenen Stellen stehen in den Leitsätzen, fallen aber besser fort. Vgl. Vorwort.

Leitsätze für Schutzmaßnahmen in Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen unter 1000 V¹.

(VDE 488, L.E.S. 1./1932.)

I. Gültigkeit.

§ 1.

Geltungsbeginn.

Diese Leitsätze treten am 1. Januar 1932² in Kraft.

§ 2.

Geltungsbereich.

Diese Leitsätze gelten für alle Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen unter 1000 V zwischen beliebigen Leitern.

II. Begriffserklärungen.

§ 3.

1. Schutzmaßnahmen im Sinne dieser Leitsätze sind Maßnahmen zum Schutze von Menschen gegen Gefährdung durch zu hohe Berührungsspannung.

Schutz von Vieh ist nicht Aufgabe dieser Leitsätze. Soll Vieh geschützt werden, so ist die zulässige Berührungsspannung von 65 V auf 24 V herabzusetzen.

2. Berührungsspannung ist die im Störfalle zwischen einem nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden leitfähigen Anlageteil (Metallteil) und der Erde auftretende Spannung, soweit sie von einem Menschen überbrückt werden kann.

¹ Elektrotechn. Z. 1930 S. 754; 1931 S. 676 u. 745.

² Angenommen durch den Vorstand des Verbandes Deutscher Elektrotechniker E. V. im April 1931.

Berührungsspannung ist also nicht dasselbe wie die Spannung zwischen dem Anlageteil und der Erde, sondern nur der Teil davon, der bei Berührung durch einen Menschen auf diesen entfällt. Vgl. Abschnitt 8 und 9. Der Anlageteil braucht nicht zur elektrischen Einrichtung zu gehören, sondern kann z. B. ein Konstruktionsteil des Gebäudes (etwa eine eiserne Säule) sein.

3. Schrittspannung ist die mit der Schrittweite (1 m) überbrückbare Spannung.

Berechnung der Schrittspannung im Abschnitt 27.

4. Körperschluß entsteht, wenn ein nicht zum Betriebsstromkreis, aber zur elektrischen Einrichtung gehörender Anlageteil (z. B. Motorgehäuse) durch einen Isolationsfehler eine leitende Verbindung mit dem Betriebsstromkreis erhält.

5. Erdschluß entsteht, wenn ein oder mehrere betriebsmäßig gegen Erde isolierte Leiter eine leitende Verbindung mit der Erde bekommen. Bei Einfacherdschluß hat nur ein einziger isoliert verlegter Leiter Erdschluß, bei Doppel- oder Mehrfacherdschluß haben zwei oder mehrere isoliert verlegte Leiter Erdschluß.

6. Erdschlußstrom ist der beim Erdschluß in die Erde fließende Strom.
Über den Erdschlußstrom in Hochspannungsnetzen vgl. Abschnitt 29 und 30.

7. Erden sind die zum Erden benutzten Metallteile, die sich in der Erde befinden und mit ihr in leitender Verbindung stehen.

Über Erden vgl. Abschnitt 20.

8. Erden heißt eine leitende Verbindung des zu schützenden Anlageteiles mit der Erde herstellen.

Abb. 75.

9. Erdübergangswiderstand (Ausbreitungswiderstand) eines Erders ist der Widerstand zwischen dem Erden und dem weiter (mehr als 20 m) entfernten Erdboden.

10. Erdungswiderstand ist die Summe von Erdübergangswiderstand und Widerstand der Erdungsleitung.

In diesem Buch ist der Einfachheit halber der Erdübergangswiderstand ebenfalls Erdungswiderstand genannt. Über die Berechnung des Erdungswiderstandes vgl. Abschnitt 20. Über die Reichweite des Spannungstrichters vgl. Abschnitt 26.

11. Erdungsleitung ist die leitende Verbindung zwischen dem zu schützenden Anlageteil und dem Erden einschließlich Sammelleitung.

12. Erdung bedeutet die Gesamtheit von Erdungsleitung und Erden.

13. Nulleiter ist der Leiter, der von dem Nullpunkt einer Anlage (z. B. Maschine, Transformator, Akkumulatoren-batterie usw.) ausgeht.

14. Nullen heißt eine leitende Verbindung des zu schützenden Anlageteiles mit dem Nullpunkt bzw. Nulleiter herstellen.

Abb. 76.

15. Nullungsleitung ist die leitende Verbindung zwischen dem zu schützenden Anlageteil und dem Nullpunkt bzw. Nulleiter.

16. Schutzschalter sind Apparate, die auf Berührungsspannung ansprechen.

17. Schutzschalten heißt eine leitende Verbindung des zu schützenden Anlageteiles über den Schutzschalter mit der Erde herstellen.

Abb. 77.

Löbl, Erdungen.

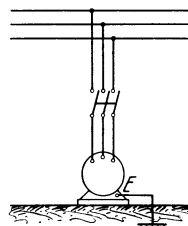


Abb. 75. Erdung.

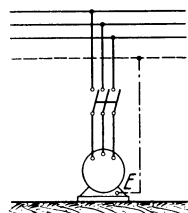


Abb. 76. Nullung.

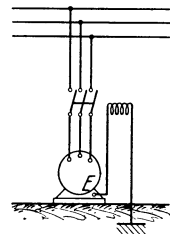


Abb. 77. Schutzschaltung.

18. Schutzschaltungsleitung ist die leitende Verbindung zwischen dem zu schützenden Anlageteil und dem Schutzschalter.

19. Schutzschaltung bedeutet die Gesamtheit von Schutzschalter und zugehörigen Leitungen einschließlich Erder.

20. Schutzleitung ist der Sammelbegriff für die leitende Verbindung zwischen dem zu schützenden Anlageteil und dem Erder (bei Erdung), dem Nulleiter (bei Nullung) oder dem Schutzschalter (bei Schutzschaltung).

21. Kleinspannungen sind Betriebsspannungen bis 42 V.

Genormte Kleinspannung sind 24 und 42 V. Die Kleinspannungsgrenze liegt also erheblich unter der Grenze von 65 V für die zulässige Berührungsspannung.

III. Bestimmungen.

A. Allgemeines.

§ 4.

Anwendungsbereich der Schutzmaßnahmen.

Schutzmaßnahmen sind in Anlagen mit Spannungen über 250 V gegen Erde überall anzuwenden.

Anlagen mit Spannungen bis 250 V gegen Erde wurden früher und werden auch in diesem Buche „Niederspannungsanlagen“ genannt.

Unter Spannung gegen Erde ist in Netzen ohne Betriebserdung die größte Spannung eines Leiters gegen Erde zu verstehen, die bei Erdschluß in der Anlage auftreten kann.

In diesen Leitsätzen wird, wenn von Anlagen mit Spannungen von soundso viel Volt gegen Erde die Rede ist, unter Spannung gegen Erde die höchste Spannung eines Außenleiters gegen Erde verstanden, die bei Erdschluß eines (anderen) Außenleiters auftreten und längere Zeit bestehen bleiben kann. Ist also keine Betriebserdung vorhanden oder ist die Betriebserdung über eine Durchschlagssicherung angeschlossen oder ist die Betriebserdung unmittelbar an einen Außenleiter angeschlossen, so ist die Spannung gegen Erde gleich der verketteten Spannung (Betriebsspannung). Ist hingegen die Betriebserdung unmittelbar am Nullpunkt angeschlossen, so kann ein Außenleiter gegen Erde eine Spannung annehmen, die zwischen der Phasenspannung und der verketteten Spannung liegt, und zwar hängt dies außer vom Erdschlußwiderstand noch vom Widerstand der Betriebserdung ab.

Die Feststellung der Spannung gegen Erde ist deswegen von Bedeutung, weil von ihrer Größe es abhängt, ob überhaupt und in welchem Umfange Schutzmaßnahmen erforderlich sind; vgl. die weiteren Absätze dieses Paragraphen.

Eine 500 V-Anlage hat schon im regulären Betrieb eine Spannung von mehr als 250 V gegen Erde, nämlich $500/\sqrt{3} = 290$ V, im Erdschlußfalle jedoch mehr, und zwar 500 V, wenn der Sternpunkt nicht geerdet ist. Schutzmaßnahmen sind also bei dieser Spannung überall erforderlich, auch in trockenen Räumen und bei isolierendem Fußboden.

In Anlagen mit Spannungen über 65...250 V gegen Erde sind Schutzmaßnahmen erforderlich, wenn die Möglichkeit einer besonderen Gefährdung vorliegt, d. h. wenn der Übergangswiderstand des Menschen zur Erde durch gute Leitfähigkeit des Standortes (z. B. metallener Fußboden) oder durch Erhöhung der an sich schlechten Leitfähigkeit des Standortes (z. B. Beton-, Fliesenfußboden, Erde) infolge Feuchtigkeit, Wärme, chemische Einflüsse oder dgl. wesentlich herabgesetzt ist.

Ausführliche Angaben über diesen sehr wichtigen Absatz, zu dem noch die drei nächsten Absätze gehören, finden sich im Abschnitt 12.

Zu schützen sind alle zur elektrischen Anlage, aber nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden Metallteile, die unmittelbar Spannung annehmen können, und zwar dann, wenn sie entweder von einem nicht isolierten Standort aus großflächig, d. h. mit der vollen Handfläche, berührt werden können, wie z. B. Gehäuse von Maschinen, Apparaten und Handgeräten, oder wenn sie mit metallenen in Reichhöhe befindlichen Konstruktionsteilen in leitender Verbindung stehen.

Der nächste Absatz stellt eine Ausnahme hiervon dar.

In Räumen mit Fußböden aus Stein, Fliesen, Beton (ohne Eisen), Holzzement, Lehm, Sand oder dgl. brauchen jedoch, falls diese praktisch trocken sind, bei Spannungen über 65... 150 V gegen Erde Schutzmaßnahmen nur insoweit getroffen zu werden, als obengenannte Metall- bzw. Gebäudekonstruktionsteile betriebsmäßig umfaßt werden können, wie z. B. Handräder und Griffe.

In anderen Fällen, z. B. im allgemeinen in trockenen Wohnräumen sowie in Anlagen mit Spannungen bis 65 V gegen Erde, sind Schutzmaßnahmen nicht erforderlich (Ausnahmen siehe § 7).

In den vier letzten Absätzen wird bestimmt, wann Schutzmaßnahmen erforderlich sind und wann nicht. Eine bessere Übersicht bietet die Zahlentafel 4 im Abschnitt 12.

Den Schutzmaßnahmen wird vielfach nicht die erforderliche Aufmerksamkeit zugewendet, da die Anlagen auch ohne sie betrieben werden können; weil sie aber zum Schutze des Menschen erforderlich sind, muß ihnen sogar erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden, wenn sie ihren Zweck, entweder das Überbrücken oder das Auftreten oder das Bestehenbleiben zu hoher Berührungsspannung zu verhindern, erfüllen sollen.

Die Isolierung verhindert das Überbrücken, Erdung, Nullung und Schutzschaltung das Bestehenbleiben und die Kleinspannung das Auftreten einer zu hohen Berührungsspannung.

Je besser angeordnet, je sorgfältiger ausgeführt, je gewissenhafter eine Anlage unterhalten ist und je hochwertiger die verwendeten Apparate isoliert sind, desto seltener zeigen sich Störungen.

In älteren Anlagen, die bis 6 Monate nach Inkrafttreten dieser Leitsätze nach den jeweiligen Verbands- oder den besonderen behördlichen Bestimmungen ihrer Zeit errichtet worden sind, brauchen nachträglich Schutzmaßnahmen nicht getroffen bzw. vorhandene nicht gemäß diesen Leitsätzen verbessert zu werden, wenn dadurch unbillige Härten entstehen würden; alle zur elektrischen Anlage, aber nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden Metallteile, die unmittelbar Spannung annehmen und von einem nicht isolierten Standort aus *betriebsmäßig* umfaßt (z. B. Handräder und Griffe) werden ~~können~~, müssen jedoch geschützt werden, wenn die Möglichkeit einer besonderen Gefährdung vorliegt.

Anlagen, die bis zum 1. Juli 1932 errichtet worden sind, brauchen nur den Verbands- bzw. den behördlichen Bestimmungen zu genügen, die bei Beginn der Errichtung Gültigkeit hatten, wenn eine Erdung nach diesen Leitsätzen L.E.S. 1/1932 unbillige Härten zur Folge haben. Diese Milderung tritt jedoch nur ein, falls es sich um eine großflächige Berührung handelt. Bei betriebsmäßiger Umfassung sind dagegen die Schutzmaßnahmen auf den Stand dieser Leitsätze zu bringen.

B. Isolierung.

§ 5.

Anwendung der Isolierung.

Schutz durch Isolierung kann erreicht werden entweder durch eine Isolierung des Menschen vom Anlageteil (z. B. isolierende Umfassung von Schaltergriffen, Handrädern, Isolierkapselung von Apparaten, isolierende Umhüllung von kabelähnlichen Leitungen) oder durch eine Isolierung des Menschen von der Erde (z. B.

isolierender Fußbodenbelag, trockener Holzboden oder Holzroste, isolierende Wände).

Die Isolation der spannungsführenden Teile, z. B. die Draht- und die Nutenisolation einer elektrischen Maschine ist noch keine Isolierung im Sinne dieser Leitsätze. In diesen Leitsätzen wird vorausgesetzt, daß diese Isolation schadhafte werden kann. Isolierung als „Schutzmaßnahme“ ist eine Isolierung, die zwischen dem Gehäuse des Stromverbrauchers und der Erde liegt, sei es als Umhüllung des Gehäuses oder als Fußbodenbelag.

Bei Nachinstallationen kann vielfach in einfacher Weise durch Isolierung des Standortes des Bedienenden ein Schutz im Sinne dieser Leitsätze geschaffen werden.

Lackierung und Emaillierung von Metallteilen sowie wetterfeste Umhüllung von Leitungen gilt nicht als Isolierung im Sinne dieser Leitsätze.

Isolierung kann als Schutzmaßnahme nur dann angewendet werden, wenn mit einer praktisch für Jahre ausreichenden Beschaffenheit der Isolation gerechnet werden kann.

Wird Isolierung als Schutz bei Handgeräten verwendet, so muß eine genügende mechanische Festigkeit vorhanden sein. Ein Fall aus Tischhöhe darf die Isolierung noch nicht zerstören.

C. Kleinspannung.

§ 6.

Anwendung der Kleinspannung.

Als Schutz dienen Transformatoren oder Umformer mit elektrisch voneinander getrennten Wicklungen zur Herabsetzung der Betriebsspannung auf Kleinspannung sowie Akkumulatorenbatterien, die jedoch während der Benutzung nicht unmittelbar vom Hauptnetz aus geladen werden dürfen.

Befinden sich die Schutztransformatoren selbst in einem schutzbedürftigen Raum, so müssen sie, falls sie im Handbereich sind, selbst durch ein anderes Schutzmittel geschützt sein (z. B. durch Umhüllung mit Isolierstoff).

Zu beachten sind die „Regeln für die Konstruktion und Prüfung von Schutztransformatoren mit Kleinspannungen, R.E.T.K.“.

Der Kleinspannungsstromkreis soll im allgemeinen nur eine beschränkte Ausdehnung haben (z. B. Betrieb von einzelnen oder wenigen Kleinmotoren, Koch- und Heizgeräten, Handleuchtern, Spielzeugen oder dgl.) und allpolig mit Installationsmaterial für mindestens 250 V in Bezug auf Isolierfestigkeit nach den Bestimmungen der „Vorschriften nebst Ausführungsregeln für die Errichtung von Starkstromanlagen mit Betriebsspannungen unter 1000 V, V.E.S. 1.“, der „Vorschriften, Regeln und Normen für die Konstruktion und Prüfung von Installationsmaterial bis 750 V Nennspannung, K.P.I.“ und der „Vorschriften für isolierte Leitungen in Starkstromanlagen, V.I.L.“ ausgeführt sein.

§ 7.

Ausschließliche Verwendung der Kleinspannung.

Für Handleuchter in Kesseln und ähnlichen engen Räumen mit gut leitenden Bauteilen kommt bei Wechselstrom als Schutzmaßnahme nur Kleinspannung in Frage.

Dasselbe gilt für Kinderspielzeuge, für die höchstens 24 V zugelassen sind. Ausgenommen sind die elektrisch beheizten Kinderkochherde, die unter gewissen Voraussetzungen mit höheren Spannungen betrieben werden dürfen (vgl. V.W.G./1933). Sie sind dann gegebenenfalls mit einer anderen Schutzmaßnahme zu versehen.

Bei Gleichspannung empfiehlt sich die Verwendung von Akku-Batterien.

D. Schutzerdung.

§ 8.

Anwendung der Schutzerdung.

Schutz durch Erdung kann erreicht werden durch Anschluß der zu schützenden Teile an besonders zu diesem Zweck in die Erde zu bettende metallene Leiter, wie Platten, Bänder, Rohre oder dgl., oder an bereits in der Erde liegende Leiter großer Oberfläche, wie Wasserleitungsnetze oder dgl.

Vgl. Abschnitt 20.

Aus wirtschaftlichen Gründen kommt die Erdung mittels Einzelerder praktisch nur für Stromverbraucher in Stromkreisen mit Stromsicherungen (Schmelzsicherungen oder Selbstschalter) bis etwa 35 A Abschaltstrom in Frage; es sind dann andere Schutzmaßnahmen zu wählen.

Auch bei 35 A Abschaltstrom wird eine Erdung mittels Einzelerder im allgemeinen schon zu teuer, da hier Erdungswiderstände von etwa $2\ \Omega$ erforderlich werden. Die wirtschaftliche Grenze für die Schutzerdung mittels Einzelerder wird gewöhnlich bei 10 A Nennstrom = 25 A Abschaltstrom der vorgeschalteten Sicherung liegen. Bei geringer Leitfähigkeit, z. B. bei Sandboden, werden auch solche Erdungen schon erhebliche Kosten verursachen.

Beim Anschluß an bereits in der Erde liegende Leiter großer Oberfläche ist die Anwendungsmöglichkeit entsprechend ihrem geringeren Erdungswiderstand größer.

Hiermit sind in erster Linie größere zusammenhängende Wasserleitungsnetze gemeint, die zu Erdungszwecken zu benutzen indessen der Genehmigung des zuständigen Wasserwerks unterliegt. Über den Anschluß an die Wasserrohre vgl. IV 1a dieser Leitsätze.

Unter Abschaltstrom ist die Stromstärke zu verstehen, bei der die Schmelzsicherung oder der Selbstschalter innerhalb kurzer Zeit abschaltet. Infolge der großen Verschiedenheit der Charakteristiken der Schmelzsicherungen soll der Einfachheit halber als Abschaltstrom der Berechnung die 2,5-fache Nennstromstärke zugrunde gelegt werden. Dieses gilt auch für Selbstschalter, falls nicht durch Messung ein genauerer Wert festgelegt wird.

Der Faktor 2,5 gilt nur für die gewöhnlichen Schmelzsicherungen. Für träge Sicherungen erscheint dieser Faktor zu klein. Da die Charakteristiken der trägen Sicherungen verschiedenen Fabrikates voneinander stark abweichen, läßt sich zur Zeit ein einheitlicher Faktor nicht angeben. Über die Charakteristiken der trägen Sicherungen eines bestimmten Fabrikates vergleiche Abschnitt 17.

Laut Zahlentafel 5 schwankt die „kurze Zeit“ zwischen Bruchteilen einer Sekunde (bei den schwächeren Sicherungen) und mehreren Minuten (bei den stärkeren Sicherungen).

§ 9.

Bemessung der Schutzerdung.

Die Schutzerdung ist so auszuführen, daß bei einem Körperschluß entweder der Fehlerstrom mindestens gleich dem Abschaltstrom wird und damit eine Abschaltung nach kurzer Zeit bewirkt, oder wenn dieses nicht möglich ist, wenigstens keine höhere Berührungsspannung als 65 V bestehen bleibt; das ist der Fall, wenn der Erdungswiderstand

a) in Netzen mit geerdetem Netzpunkt nicht größer ist als

$$\frac{\text{halbe Spannung gegen Erde}}{\text{Abschaltstrom}}, \quad (\text{Nebenformel})$$

wobei vorausgesetzt ist, daß auch die Betriebserdung gemäß § 20 bemessen ist,

Netze mit geerdetem Netzpunkt sind solche, bei denen die Betriebserdung am Nullpunkt oder Außenleiter unmittelbar, d. h. nicht über eine Durchschlagsicherung angeschlossen ist.

Unter Spannung gegen Erde ist hier — im Gegensatz zu § 4 — die Spannung eines Außenleiters gegen Erde bei regulärem Betrieb verstanden, d. h. bei Nullpunktserdung die Phasenspannung und bei Außenleitererdung die verkettete Spannung. Es ist daher klarer, in der obigen Formel statt „Spannung gegen Erde“ den Ausdruck „treibende Spannung“ zu setzen, da es sich um die Spannung handelt, die den Fehlerstrom treibt. Vgl. Abschnitt 46.

Die Ableitung dieser „Nebenformel für die Schutzerdung“ findet sich im Abschnitt 45 und 46. Diese Nebenformel führt aber nur dann zu billigeren Erdungen als die unter b) aufgeführte „Hauptformel“, wenn die treibende Spannung größer als 130 V ist, also z. B. in 380/220 V-Netzen mit unmittelbarer Nullpunktserdung und in 3×220 V-Netzen mit unmittelbarer Außenleitererdung. Der Vorteil der billigeren Erdung nach der Nebenformel wird dadurch erkaufte, daß man von der Güte der Betriebserdung abhängig wird.

Bei der Ableitung der Nebenformel ist außerdem angenommen worden, daß die Körperschlüsse nur an den Einführungsstellen in die Stromverbraucher auftreten und immer satt (ohne Widerstände) sind. Die Hauptformel ist auch von diesen einschränkenden Bedingungen frei.

b) in Netzen ohne geerdeten Netzpunkt nicht größer ist als

$$\frac{65 \text{ V}}{\text{Abschaltstrom}} \quad (\text{Hauptformel})$$

Netze ohne geerdeten Netzpunkt sind Netze, deren Betriebserdung über eine Durchschlagsicherung angeschlossen ist. Diese Formel ist auch für den Fall a) anwendbar. Deswegen und weil sie von den genannten Einschränkungen frei ist, wird sie „Hauptformel“ genannt. Die Herleitung findet sich im Abschnitt 44.

E. Nullung.

§ 10.

Anwendung der Nullung.

Die Nullung kommt nur in Verteilungsanlagen mit einem geerdeten Nulleiter in Betracht. Sie wird hergestellt durch den Anschluß der zu schützenden Anlagenteile an den geerdeten Leiter. Die nachstehenden Bestimmungen gelten auch sinngemäß für Anlagen ohne Nulleiter, in denen aber ein Außenleiter betriebsmäßig geerdet ist.

Durch die Nullung soll erreicht werden, daß jeder Körperschluß zum Kurzschluß und zur Abschaltung führt.

Vgl. Abschnitt 52.

§ 11.

Nullungsbedingungen.

Bei Anwendung der Nullung als Schutzmaßnahme muß das Leitungsnetz folgenden 3 Nullungsbedingungen genügen:

1. *Nullungsbedingung.* Die Leitungsquerschnitte sind so zu bemessen, oder die Leitungen sind so abzusichern, daß bei Kurzschluß zwischen einem Außenleiter und dem Nulleiter mindestens der 2,5-fache Nennstrom der nächsten vorgeschalteten Stromsicherung zum Fließen kommt, damit in kurzer Zeit abgeschaltet wird.

Diese „Abschaltbedingung“ braucht nur erfüllt zu werden, wenn der Ohmsche Spannungsabfall im Nulleiter bei dem erwähnten Kurzschluß zwischen einem Außenleiter und dem Nulleiter nicht wesentlich über 65 V liegt. Dadurch, daß der Nulleiter

mindestens am Anfang und am Ende geerdet ist, bleibt dann zwischen Nulleiter und Erde, also auch zwischen den genullten Anlageteilen und Erde keine höhere Spannung als etwa 65 V bestehen. Die Abschaltbedingung kommt also praktisch nur für folgende Niederspannungsnetze in Frage:

- 380/220 V-Drehstromnetze mit geerdetem Nulleiter,*
- 3 × 220 V-Drehstromnetze mit geerdetem Außenleiter,*
- 2 × 220 V-Gleichstromnetze mit geerdetem Nulleiter,*

(wenn die genannten geerdeten Leiter zur Nullung benutzt werden).

In Netzen mit Betriebsspannungen von 220/127 V und darunter ist diese Abschaltung nicht erforderlich, wenn bei gleichem Werkstoff das Verhältnis des Querschnittes eines Außenleiters zu dem des Nulleiters den Wert 1,6 nicht überschreitet.

Vgl. die Erläuterung zum vorigen Absatz und den Beweis auf S. 66.

Errechnen sich zu große Leitungsquerschnitte, so können, um die Abschaltung zu erreichen, in die Außenleiter abgestufte Sicherungen eingebaut werden.

Die Abschaltung kann auch durch einen Schalter erfolgen, dessen Auslöseorgan durch den Nulleiterstrom betätigt wird. Die Einstellung des Nulleiterelementes hat so zu erfolgen, daß bei Kurzschluß die Abschaltung in kurzer Zeit erfolgt.

Über diesen Schalter, den Stationsschutzschalter, vgl. Abschnitt 61. Als kurze Zeit ist etwa eine halbe Minute zu verstehen, vgl. dazu Abschnitt 16.

Empfohlen wird, bei Freileitungsnetzen bis 50 mm² den Querschnitt des Nulleiters gleich dem der Außenleiter zu wählen.

Vgl. S. 67.

2. Nullungsbedingung. Der Nulleiter ist zu erden, und zwar im allgemeinen in der Nähe der Station; in Freileitungsnetzen auch noch mindestens an den Enden der Netzausläufer und bei Installationen im Freien [siehe V.E.S. 1, § 2d)], falls genullt wird, auch an seinem Ende.

Damit bei einem Erdschluß eines Außenleiters die Spannung des Nulleiters gegen Erde und damit die Berührungsspannung an den genullten Anlageteilen nicht über 65 V steigen kann, darf die gesamte Betriebserdung (d. h. die Erdung des Nulleiters bzw. die des zur Nullung benutzten geerdeten Außenleiters) nicht schlechter sein als 2 Ω. Dies gilt sowohl für 380/220 V-Netze als auch für 220/127 V-Netze. Wie im Abschnitt 36 gezeigt wird, können dann bei einem Erdschluß die gesunden Außenleiter keine höhere Spannung als 250 bzw. 150 V annehmen, wodurch der Umfang der Schutzmaßnahmen begrenzt wird (vgl. Zahlentafel 4).

Sind im Bereich des Stromverteilungsnetzes besonders gute Erder, wie z. B. Wasserleitungen, vorhanden, so sind diese mit dem Nulleiter zu verbinden. Diese Verbindungen haben an mehreren Stellen an den Hauptrohren zu erfolgen.

Dies ist natürlich nur dann möglich, wenn das zuständige Wasserwerk die Genehmigung erteilt. Sonst muß die Betriebserdung mindestens so gut sein, daß bei einem Schluß eines Außenleiters mit der Wasserleitung die Spannung des geerdeten Leiters nicht über 65 V steigt oder, falls dies doch der Fall ist, daß eine Abschaltung erfolgt.

Die Verbindungsleitung soll hinsichtlich ihrer Leitfähigkeit dem Nulleiter gleichwertig sein, jedoch hat ihr Querschnitt bei Kupfer über Erde mindestens 16 mm², unter Erde mindestens 50 mm² zu betragen.

Unter Leitfähigkeit ist hier das Verhältnis des spezifischen Widerstandes zum Querschnitt (ρ/q) zu verstehen. Die Verbindungsleitung soll also je Meter höchstens den Widerstand des geerdeten Leiters je Meter haben. Dies wird aus thermischen Rücksichten verlangt. Der in der zweiten Hälfte des Satzes geforderte Mindestquerschnitt ist aus mechanischen Gründen notwendig.

Zur Erdung der Netzausläufer von Freileitungen genügen Erder von höchstens 5 Ω; größere Bandlängen als 50 m brauchen nicht verlegt zu werden.

Diese Erdung wird gefordert, damit beim Reißen des Nulleiters der vom Transformator abgetrennte Nulleiterteil keine zu hohe Spannung gegen Erde annimmt. Für Kabelnetze fällt diese Bedingung fort, da eine Unterbrechung des Nulleiters nicht zu erwarten ist.

Bänder von 50 m Länge haben bei einem spezifischen Widerstand des Erdreichs von mehr als 120 Ω m (vgl. Abschnitt 20) einen größeren Erdungswiderstand als 5 Ω . Daß trotzdem nicht mehr als 50 m verlegt zu werden brauchen, ist eine Erleichterung, die an sich nicht begründet ist.

Beim Reißen des Nulleiters nimmt der vom Transformator abgetrennte Nulleiterteil nur dann keine Spannung über 65 V gegen Erde an, wenn höchstens $65/5 = 13$ A in die Erde fließt. Damit kann man nur rechnen, wenn das abgetrennte Nulleiterstück nicht direkt auf einen Außenleiter fällt. Es empfiehlt sich daher, den Nulleiter unter den Außenleitern zu verlegen. Vgl. Abschnitt 55.

Für die Erdung von Nulleitern bei Installationen im Freien sollen im allgemeinen 15 m Band oder ein gleichwertiger Erder genügen.

„Installationen im Freien“ sind gemäß V.E.S. 1 § 2 Freileitungen innerhalb von Anschlußanlagen (z. B. auf Höfen und in Gärten), deren Stützpunkte weniger als 20 m auseinander liegen. Auch hier empfiehlt es sich, den Nulleiter unter den Außenleitern bzw. unter dem Außenleiter zu verlegen.

Der Anschluß des Nulleiters an den besten vorhandenen Erder soll verhindern, daß bei einem Erdschluß eines Außenleiters über jenen Erder die zulässige Berührungsspannung des Nulleiters überschritten wird.

Vgl. die Erläuterung zum zweiten Textabsatz der 2. Nullungsbedingung in diesem Paragraphen.

3. *Nullungsbedingung.* Der Nulleiter ist ebenso sorgfältig wie die Außenleiter zu verlegen.

Dies wird wegen der mit einer Unterbrechung des Nulleiters verbundenen Gefahr verlangt.

§ 12.

Erdung in Netzen mit Nullung.

In einem Netz, in dem die Nullung angewendet wird oder der Nulleiter blank verlegt ist ohne daß an sich von der Nullung Gebrauch gemacht wird, ist Erdung ohne leitende Verbindung mit dem Nulleiter unzulässig.

Hat nämlich eine solche Erdung einen besonders niedrigen Erdungswiderstand, so kann dies bei einem Körperschluß zur Folge haben, daß der Nulleiter und damit die genullten Anlageteile eine Spannung über 65 V bekommen. Um das zu vermeiden, ist eine Erdung ohne leitende Verbindung mit dem Nulleiter nicht statthaft.

Die blanke Verlegung des Nulleiters hat zur Voraussetzung, daß die Nullungsbedingungen erfüllt sind und Schutzerdungen ohne Verbindung mit dem Nulleiter nicht vorkommen. Vgl. § 13.

Wird jedoch das Wasserleitungsnetz zur Erdung benutzt, so kann von einer besonderen Verbindung des Installations-Nulleiters mit der Wasserleitung abgesehen werden, wenn der Netznullleiter an mehreren Stellen, auch an seinen Ausläuferenden, mit den Hauptrohren des Wasserleitungsnetzes verbunden ist (siehe § 11, 2. Nullungsbedingung).

Dachständer oder dgl. können, falls ein Schutz erforderlich ist und die Nullungsbedingungen im Ortsnetz erfüllt sind, genullt werden.

Eine Schutzerdung der Dachständer wäre nur dann zulässig, wenn bei einem Körperschluß zwischen einem Außenleiter und Dachständer eine vorgeschaltete Sicherung (in diesem Fall die Ortsnetz-sicherung) in kurzer Zeit abschaltet. Eine so gute Erdung des Dachständers wird im allgemeinen nicht zu erreichen sein.

Die von den Feuerversicherungsgesellschaften angestrebte Verbindung der Dachständer mit den Blitzableiteranlagen bietet deshalb bei Körperschlüssen eine große Gefahr.

§ 13.

Blanke Nulleiter.

Nur in solchen Netzen, in denen die vorstehenden Bedingungen erfüllt sind und Schutzerdungen ohne Verbindung mit dem Nulleiter nicht vorkommen, dürfen Nulleiter im Handbereich blank verlegt werden [Ausnahmen siehe V.E.S. 1 § 34 b)].

Unter den „vorstehenden Bedingungen“ sind die der §§ 11 und 12 zu verstehen. — Die Ausnahme ist gemäß eines späteren Beschlusses des Arbeitsausschusses der V.E.S. 1 und der Erdungskommission wieder fallengelassen worden.

§ 14.

Nullung ortsveränderlicher Stromverbraucher.

Ortsveränderliche Stromverbraucher dürfen nicht durch unmittelbaren Anschluß an den beweglichen Teil des an der Stromzuführung beteiligten Nulleiters genullt werden, sondern sind durch eine besondere Nullungsleitung in der Zuleitungsschnur über eine Steckvorrichtung mit Schutzkontakt am festverlegten Teil des Nulleiters anzuschließen.

Vgl. Abschnitt 55 und 15.

F. Schutzleitungssystem.

§ 15.

Anwendung des Schutzleitungssystems.

In begrenzten einheitlichen Anlagen, wie z. B. Fabriken mit eigener Stromerzeugung oder eigenem Transformator mit elektrisch getrennten Wicklungen, kann ein Schutz durch Verbindung aller zu schützenden Anlageteile untereinander sowie mit den der Berührung zugänglichen Gebäudekonstruktionsteilen, Rohrleitungen u. dgl. erreicht werden. Diese Verbindungsleitungen, die das Schutzleitungssystem bilden, sind zu erden.

Ist eine Isolationskontrolle vorhanden, dann genügt für die Erdung des Schutzleitungssystems ein Erdungswiderstand von 20 ... 30 Ω .

Beim Schutzleitungssystem (Abb. 78) wird die Betriebserdung über eine Durchschlagssicherung angeschlossen (auch bei Nullpunktserdung) und die zu schützenden Anlageteile

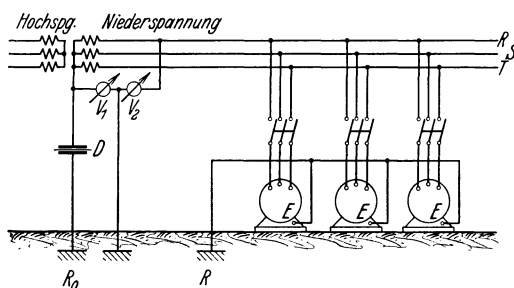


Abb. 78. Schutzleitungssystem.

untereinander leitend verbunden. Der Vorteil dieses Systems besteht darin, daß der Widerstand R der Schutzerdung nicht nach § 9 bemessen zu werden braucht, sondern bis etwa 30 Ω sein kann. Bedingung ist allerdings, daß eine Isolationskontrolle vorhanden ist, die jeden Erdschluß, auch den des Nullpunkts, anzeigt, der sofort behoben werden muß, da sonst bei einem hinzutretenden Körperschluß in einem Stromverbraucher eine unzulässige hohe Spannung an diesem bestehen bleibt. Erdschlüsse treten z. B. beim Ansprechen einer Durchschlagssicherung auf, die am Null-

punkt oder am Außenleiter angeschlossen sein kann. Die Kontrolle eines Erdschlusses des Nullpunkts ist jedoch mit dem normalen Drei-Voltmeter-Verfahren nicht möglich, da sich in den Spannungsverhältnissen nichts ändert. Als Isolationskontrolle kann aber folgende Anordnung in Frage kommen (Abb. 78). Zwei in Reihe geschaltete unter sich gleiche Voltmeter V_1 und V_2 liegen zwischen dem Sternpunkt und einem Außenleiter, etwa R. Der Verbindungspunkt zwischen den beiden Voltmetern ist geerdet. Ist kein Erdschluß vorhanden, so zeigt jedes Voltmeter die halbe Phasenspannung. Bei Erdschluß des Nullpunktes, z. B. infolge Durchschlag von D, zeigt V_1 keine Spannung, V_2 die volle Phasenspannung. Bei Erdschluß von R zeigt V_1 die volle Phasenspannung, V_2 Null. Bei Erdschluß von S oder T zeigt V_1 die volle Phasenspannung, V_2 die verkettete Spannung.

Tritt nun ein Erdschluß oder ein Körperschluß auf, so wird ein solcher angezeigt. Eine Gefahr ist zwar noch nicht vorhanden, kann jedoch jeden Augenblick auftreten, wenn im ersten Fall ein Körperschluß, im zweiten Fall ein Erdschluß hinzukommt. Der Fehler muß also sofort beseitigt werden.

Zwei Körperschlüsse schalten sich durch den entstehenden Kurzschluß ab.

Bei der Entscheidung, ob und in welchem Umfang Schutzmaßnahmen erforderlich sind, ist zu beachten, daß beim Schutzleitungssystem unter „Spannung gegen Erde“ nach § 4 die verkettete Spannung zu verstehen ist. In einer 380/220 V-Anlage sind also Schutzmaßnahmen stets und überall anzuwenden, da die Spannung gegen Erde 250 V übersteigt. — In einer 220/127 V-Anlage wird die 150 V-Grenze überschritten. Vgl. dazu Zahlentafel 4.

Ist vorstehende Bedingung nicht erfüllt keine Isolationskontrolle vorhanden oder ist die Betriebserdung unmittelbar angeschlossen, so ist nach § 9 zu erden.

Denn es liegt eine gewöhnliche Schutzerdung mit gemeinsamer Erdung (Sammelerdung) vor.

Wird das Schutzleitungssystem mit einem Netzpunkt verbunden, so müssen die Nullungsbedingungen erfüllt werden.

Denn in diesem Falle spielt das Schutzleitungssystem die Rolle des Nulleiters.

Bei Anlagen elektrischer Bahnen gilt die Fahrtschiene einschließlich der Rückleitungen als geerdetes Schutzleitungssystem. Eine besondere Erdung ist hierbei mit Rücksicht auf die „Vorschriften zum Schutze der Gas- und Wasserröhren gegen schädliche Einwirkungen der Ströme elektrischer Gleichstrombahnen, die die Schienen als Leiter benutzen“ nicht erforderlich.

G. Schutzschaltung.

§ 16.

Anwendung der Schutzschaltung.

Als Schutz dienen Schalter, die so beschaffen sind, daß beim Auftreten einer zu hohen Berührungsspannung die Fehlerstelle selbsttätig in kurzer Zeit abgeschaltet wird. Die Schutzschalter müssen Freiauslösung haben.

Bei Schutzschaltern, deren wesentlichen Bestandteil eine zwischen dem zu schützenden Anlagenteil und einem Erder liegende Auslösespule bildet, ist darauf zu achten, daß die Fehlerstromspule unabsichtlich nicht kurz geschlossen werden kann.

Der erste Absatz gilt allgemein, der zweite bezieht sich speziell auf die RWE-Heinisch-Riedl-Schutzschaltung. Vgl. Kapitel XIV. Es empfiehlt sich, entweder die Schutzleitung oder die Hilfserdungsleitung isoliert zu verlegen. Bei nachträglichem Einbau der Schutzschalter in vorhandene Anlagen ist es in den meisten Fällen einfacher, die Hilfserdungsleitung isoliert zu verlegen.

H. Gemeinsames für Erdung, Nullung, Schutzleitungssystem und Schutzschaltung.

§ 17.

Verhütung von Unterbrechungen der Schutzleitung.

Stecker und Steckdosen sind so einzurichten, daß die Schutzverbindung hergestellt ist, bevor die Polkontakte sich berühren.

Weiteres über Steckvorrichtungen s. Abschnitt 15.

Unterbrechungsstellen in den Schutzleitungen, z. B. Schalter, sind nur bei gleichzeitiger Abschaltung aller Strom führenden Leiter zulässig.

Auch hier ist es notwendig, daß die Schutzleitungen zuletzt geöffnet und zuerst geschlossen werden.

§ 18.

Bemessung der Schutzleitung.

a) Feste Verlegung als Einfachleitung.

Der Querschnitt der Erdungs- und Nullungsleitung soll, wenn sie als Einfachleitung verlegt wird, mit Rücksicht auf thermische Sicherheit mindestens gleich dem halben Querschnitt der zugehörigen Leitung (Außenleiter) sein, braucht jedoch bei Kupferleitungen nicht über 50 mm² gewählt zu werden.

Unter Einfachleitung ist hier eine von den stromführenden Leitungen gesondert verlegte Leitung zu verstehen, im Gegensatz zu der im letzten Absatz dieses Paragraphen behandelten Verlegung in gemeinsamer Hülle. Da die Erdungs- und die Nullungsleitung thermisch von den dem betreffenden Stromverbraucher vorgeschalteten Sicherungen mitgeschützt werden müssen, ist die Zulassung des halben Querschnitts nicht ganz gerechtfertigt. — Bei der Schutzschaltungsleitung ist der Querschnitt thermisch nicht begrenzt, da der Schutzschalter schon in Bruchteilen einer Sekunde abschaltet.

Mit Rücksicht auf mechanische Festigkeit beträgt der Mindestquerschnitt aller gesondert verlegten Schutzleitungen

- | | |
|---|-----------------------|
| 1. bei fester ungeschützter Verlegung | 4 mm ² , |
| 2. bei fester geschützter Verlegung | 1,5 mm ² . |

„Aller Schutzleitungen“, d. h. einschließlich der Schutzschaltungsleitung, während der erste Absatz dieses Paragraphen nur für die Erdungs- und Nullungsleitung gilt.

b) Feste oder bewegliche Verlegung in gemeinsamer Hülle.

Für Schutzleiter, die in gemeinsamer Hülle mit den übrigen Leitern liegen, und zwar bei Rohrdrähten, kabelähnlichen Leitungen sowie bei Mehrfachleitungen zum Anschluß ortsveränderlicher Stromverbraucher, gelten die Bestimmungen der „Vorschriften für isolierte Leitungen in Starkstromanlagen, V.I.L./1930“.

I. Erdung eines Netzpunktes (Betriebserdung).

§ 19.

Schutz bei Übertritt der Oberspannung.

Als Schutz bei Übertritt von Oberspannungen über 250 V gegen Erde auf die Unterspannungsseite soll entweder der Nullpunkt (Nulleiter) oder ein Außenleiter des Unterspannungsnetzes unmittelbar oder über Durchschlagssicherungen geerdet werden. Der Erdungswiderstand ist so zu bemessen, daß beim Übertritt der Oberspannung auf die Unterspannungsseite durch den Einfach-Erdschlußstrom keine höhere Berührungsspannung als 125 V am Nulleiter hervorgerufen wird oder bestehen bleibt (siehe V.E.S. 1 § 4). Auch andere gleichwertige Maßnahmen, z. B. Verwendung von Relais, sind zulässig.

Näheres s. Abschnitt 36.

Ist die Abschaltstromstärke der Sicherungen oder des Schalters der Oberspannungsseite kleiner als der Erdschlußstrom, so kann sie der Bemessung der Erdung zugrunde gelegt werden.

Vgl. Abschnitt 36.

Bei Oberspannungen über 250 V gegen Erde wird in Kabelnetzen empfohlen, die Bleimäntel der Kabel beider Spannungen (*nämlich der Ober- und der Unterspannung*) gut leitend miteinander zu verbinden und an eine gemeinsame Erdung anzuschließen; da diese Erdung vom Fehlerstrom nicht voll beansprucht wird, genügt hierbei ein Erdungswiderstand von etwa 20Ω . Diese Erdung und die der Kabelmuffen haben nämlich in erster Linie den Zweck, etwa im Erdreich fließende Fremdströme aufzusaugen und die Bleimäntel sowie deren Be- wehrung vor Anfrassungen durch diese Ströme zu schützen.

Die Fehlerströme verlaufen hier in den Kabelmänteln und nicht in der Erde.

Bei anderen Netzarten sollen die unterspannungsseitigen Erder mit Rück- sicht auf einen etwaigen Doppelerdschluß, wenn technisch und wirtschaftlich möglich, von dem überspannungsseitigen Erder getrennt verlegt werden und mindestens 20 m von diesem entfernt sein. Eine Trennung der Erdung wird aber auch hier nicht gefordert für öffentliche Elektrizitätswerke, *sofern- weit* sie keine fremden Verbraucheranlagen speisen.

§ 20.

Schutz bei Erdschluß auf der Unterspannungsseite.

Um in Mehrleiteranlagen mit Betriebsspannungen über 250 V zu verhindern, daß beim Erdschluß eines Außenleiters die Spannung eines anderen Außenleiters gegen Erde über 250 V steigt, ist der Mittel- bzw. Sternpunkt zu erden; der Erdungs- widerstand dieser Betriebserdung soll 2Ω nicht überschreiten. Auch durch andere Maßnahmen, z. B. Verwendung von Relais, kann verhindert werden, daß zwischen einem beliebigen Außenleiter und der Erde eine höhere Spannung als 250 V be- stehen bleibt.

Diese Vorschrift bezieht sich praktisch nur auf Drehstromnetze von 380/220 V und Gleichstromnetze von 2×220 V. In Drehstromnetzen von 500 V, für die diese Leitsätze ja auch Gültigkeit haben, kann man die Spannung gegen Erde nicht unter $500/\sqrt{3} = 290$ V halten.

Die Beschränkung auf 250 V gegen Erde hat den Vorteil, daß dann gemäß § 4 1. Abs. nicht überall Schutzmaßnahmen notwendig werden. Weiteres s. Abschnitt 36.

Um in Drehstromnetzen von 220/127 V und in Gleichstromnetzen von 2×110 V zu verhindern, daß beim Erdschluß eines Außenleiters die Spannung eines anderen Außenleiters gegen Erde über 150 V steigt, ist der Nullpunkt nicht schlechter als mit 2Ω zu erden, oder es sind geeignete andere Maßnahmen (z. B. Relais) zu verwenden. Der Vorteil dieser Beschränkung auf 150 V gegen Erde geht aus Zahlentafel 4 hervor. Vgl. Abschnitt 36.

In Netzen mit einem geerdeten Netzpunkt, in denen Schutzerdungen gemäß § 9a) Anwendung finden, darf der Widerstand der Betriebserdung jedoch nicht größer sein als

$$65 \text{ V}$$

Abschaltstromstärke des größten geerdeten Stromverbrauchers

Vgl. Abschnitt 36.

Sind im Bereich des Stromverteilungsnetzes besonders gute Erder, wie z. B. Wasserleitungen, vorhanden, so sind diese mit dem Mittel- bzw. Sternpunkt zu verbinden. Diese Verbindungen haben an den Hauptrohren zu erfolgen.

Identisch mit § 11, 2. Nullungsbedingung, 2. Textabsatz.

Die Erdungsleitung soll hinsichtlich ihrer Leitfähigkeit dem Außenleiter, und zwar unter Berücksichtigung seines halben Querschnittes gleichwertig sein, jedoch hat ihr Querschnitt bei Kupfer über Erde mindestens 16 mm^2 , unter Erde mindestens 50 mm^2 zu betragen.

Hierzu ist dasselbe zu sagen wie zum dritten Textabsatz der 2. Nullungsbedingung im § 11, mit dem der vorliegende Absatz teilweise identisch ist.

IV. Verlegung der Erder.

1. Erder.

a) Wasserleitungen. Der Anschluß an die Rohre erfolgt an gut blank gemachten Stellen durch breite Schellen (siehe DIN VDE 1818).

Die Benutzung der Wasserleitung zu Schutzzwecken hängt von der Genehmigung des zuständigen Wasserwerks ab.

Die Wasserleitung darf zu Schutzerdungen innerhalb der Gebäude nur verwendet werden, wenn die Rohre gut leitend verbunden sind, wie z. B. bei Bleirohren durch Verlötung. Der Anschluß soll jedoch möglichst vor dem Wassermesser erfolgen. Erfolgt er hinter dem Wassermesser, so muß dieser gut leitend überbrückt werden.

Der Anschluß an die Wasserleitung zum Zwecke der Schutzerdung geschieht am besten vor dem Wassermesser, also straßenseitig. Es ist dann eine besondere Schutzleitung erforderlich, die von der Anschlußstelle durch das ganze Gebäude hindurch zu den Stromverbrauchern bzw. Schutzkontakt Dosen führt. — Erfolgt der Anschluß an die Wasserleitung jedoch innerhalb eines Gebäudes, also hinter dem Wassermesser, so muß der Wassermesser gut leitend überbrückt werden und die Rohre untereinander gut leitend verbunden sein. Die Wasserrohre dienen hier nicht als Erder, sondern als Erdungsleitung.

Bei Verwendung der Wasserleitung zu Betriebserdungen muß der Anschluß an den Hauptrohren außerhalb der Gebäude erfolgen.

Ausgedehnte Wasserleitungsnetze haben meist einen Erdübergangswiderstand in der Größenordnung von $0,1 \dots 2 \Omega$.

b) Oberflächenerdungen aus Bändern oder Drähten. Sie sind mindestens 30 cm unter der Erdoberfläche zu verlegen und müssen einen Mindestquerschnitt von 50 mm^2 haben. Bänder sollen mindestens 3 mm dick sein. Stahl soll feuerverzinkt oder verbleit sein. Die Länge richtet sich nach der Bodenart, Bodenfeuchtigkeit und dem Erdübergangswiderstand (Ausbreitungswiderstand), der erreicht werden soll. Als Anhaltspunkt für den Widerstand derartiger Oberflächenerder können die folgenden Werte bei Acker- (Humus-) oder Lehmboden dienen:

Länge in Metern	25	50	100
Widerstand in Ohm	8	5	3 .

Näheres s. Abschnitt 20.

Bei ungünstigen Platzverhältnissen können die Leitungen im Zickzack verlegt werden, wenn ein Mindestabstand der Windungen von ungefähr $1,5 \text{ m}$ eingehalten wird. Der Widerstand wird aber dadurch erhöht

Ist der Abstand kleiner als $1,5 \text{ m}$, so wird der Erdungswiderstand größer.

c) Rohre. Der Erdübergangswiderstand (Ausbreitungswiderstand) eines ein- (siehe DIN VDE 1815) bis zweizölligen Rohres von etwa 3 m Länge beträgt bei Ackerboden etwa 30Ω . Benutzt man mehrere Rohre, um einen kleineren Widerstand zu erreichen, so ist ein Mindestabstand von ungefähr 3 m zwischen ihnen einzuhalten. Stahlrohre sollen feuerverzinkt, verbleit oder verkupfert sein.

Vgl. Abschnitt 20 und 21.

d) Erdplatten. Stählerne Platten sollen einseitig mindestens $0,5 \text{ m}^2$ groß und mindestens 3 mm stark sein (siehe DIN VDE 1816). Stählerne Platten sollen feuerverzinkt oder verbleit sein. Erdplatten sollen senkrecht im Erdreich angeordnet werden, da bei waagerechter Anordnung Hohlräume leichter entstehen können. Platten von $0,5 \text{ m}^2$ einseitiger Oberfläche haben in Ackerboden einen Erdübergangswiderstand (Ausbreitungswiderstand) von etwa 40Ω , solche von 1 m^2 einseitiger Oberfläche von etwa 30Ω . Bei Verwendung von mehreren Platten zur Herabsetzung des Widerstandes ist ein Mindestabstand von ungefähr 3 m zwischen ihnen einzuhalten. Das Einbetten von Platten in Koks ist zu vermeiden.

Vgl. Abschnitt 20 und 21.

2. Bodenbeschaffenheit u. dgl.

Lehmboden ist hinsichtlich seines Widerstandes dem Ackerboden gleich zu achten. Feuchter Sandboden hat etwa 3-fachen, trockener Sandboden etwa 5-fachen, Kies etwa 10-fachen Widerstand.

Diese Angaben können nur als rohe Näherungswerte betrachtet werden. Weitere zum Teil allerdings abweichende Angaben siehe Abschnitt 18.

An Gewässern sind Erder längs des Ufers und nicht im Wasser zu verlegen, da Wasser im allgemeinen schlecht leitet.

Die Erder müssen fest in den Erdboden eingestampft oder eingeschlämmt werden, so daß die Berührung zwischen Erder und Erde möglichst innig wird. Dazu gehört, daß das Erdreich in der nächsten Umgebung des Erders möglichst feinkörnig ist. Grober Kies und Steine sind ebenso schlechte Vermittler des Stromübergangs wie reines Wasser und fettige oder ölige Schichten. Erder dürfen nicht mit Anstrich (z. B. Rostschutzmittel) versehen sein, da dadurch der Ausbreitungswiderstand erhöht würde.

Über die Wirkung des Einschlämmens und Einsalzens s. Abschnitt 24.

3. Erdungsleitung.

Die Erdungsleitungen sind, soweit sie offen verlegt sind, außer gegen mechanische Beschädigung gegebenenfalls auch gegen chemische Zerstörung zu schützen und möglichst so zu verlegen, daß sie leicht überwacht werden können. Unzulässig ist, sie ohne Schutz einzumauern.

Offene Verlegung steht im Gegensatz zur umhüllten Verlegung.

4. Verbindungsstellen.

Sämtliche Verbindungen sind sorgfältig herzustellen, da selbst ein verhältnismäßig geringer Übergangswiderstand (Oxydbildung oder dgl.) die Güte einer Erdung stark beeinträchtigt. Verbindungen sollen verschweißt, vernietet oder verschraubt sein. Schraub- oder Nietverbindungen müssen überlappt sein und mit 2 Schrauben oder 2 Nieten ausgeführt werden. Empfohlen wird, die fertigen Verbindungen gegen Oxydation durch Anstrich zu schützen.

V. Prüfung der Schutzmaßnahmen.

Die Schutzmaßnahmen sind einer Prüfung vor Inbetriebsetzung der Anlage und regelmäßigen Nachprüfungen gemäß den „Vorschriften nebst Ausführungsregeln für den Betrieb von Starkstromanlagen, V.B.S.“ zu unterziehen.

§ 2b der V.B.S./1932 bestimmt, daß die Einrichtungen, die der Sicherheit von Personen dienen, in ordnungsmäßigem Zustande zu erhalten sind. In der Regel 2 wird für gewerbliche, industrielle und landwirtschaftliche Betriebsstätten eine Prüfung durch einen Sachverständigen in angemessenen Zwischenräumen empfohlen.

Bei Nullung und bei Schutzschaltung erfolgt die Prüfung durch Feststellung der Wirksamkeit.

Bei Erdung erfolgt die Prüfung entweder gleichfalls durch Feststellung der Wirksamkeit oder durch Messung des Erdübergangswiderstandes wie folgt:

a) Messung mit Strom- und Spannungsmesser.

Die gegebenenfalls vom Nulleiter bzw. dem zu schützenden Anlageteil abzulemmende Erdungsleitung wird mit einem nicht geerdeten Außenleiter über einen Widerstand von etwa 30Ω hinter der Sicherung unter Zwischenschaltung eines Strommessers verbunden. Ist ein geerdeter Leiter im Netz vorhanden, so schließt sich der Strom über diesen. Ist ein solcher nicht vorhanden und kommt durch die Isolationsfehlerströme des Netzes kein für die Messung ausreichender Strom zustande, so wird die Messung nach b) empfohlen.

Mit einem Spannungsmesser von hinreichend hohem Widerstand (etwa 3000Ω) wird dann die Spannung zwischen einem Punkt hinter dem Vorschaltwiderstand und einer etwa 20 m entfernten Sonde gemessen, die einen Ausbreitungswiderstand von höchstens 200Ω haben soll. Die Sonde ist am Standort einzutreiben. Wenn eine Verschleppung der Berührungsspannung durch Rohre, Eisengeräte usw. zu befürchten ist, ist am Ende des Leiters (Rohrleitung) zu messen. Der Erdübergangswiderstand ergibt sich als Quotient aus Spannung und Stromstärke, wobei die Spannung zwischen dem Erder und der Sonde zu messen ist.

Vgl. Abschnitt 22.

Da bei derartigen Messungen Schrittspannungen auftreten, so ist zur Vermeidung von Unfällen Vorsicht zu üben (Absperrung, Isolierung, kleine Schrittweite).

b) Messung mit Erdungsmesser.

Hierbei bedient man sich mit Vorteil fabrikmäßig hergestellter Meßgeräte.