

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 14 (1923)
Heft: 6

Artikel: Wegleitung für den Schutz von Wechselstromanlagen gegen Ueberspannungen
Autor: Schait, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060380>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 09.08.2025

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

<p>Erscheint monatlich, im Januar dazu die Beilage „Jahresheft“.</p> <p>Alle den Inhalt des „Bulletin“ betreffenden Zuschriften sind zu richten an das</p> <p>Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins Seefeldstrasse 301, Zürich 8 — Telephon: Hottingen 7320, welches die Redaktion besorgt.</p> <p>Alle Zuschriften betreffend Abonnement, Expedition und Inserate sind zu richten an den Verlag:</p> <p>Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G. Stauffacherquai 36/38 Zürich 4 Telephon Selnau 7016</p>	<p>Ce bulletin paraît mensuellement. — „L'Annuaire“ est distribué comme supplément dans le courant de janvier.</p> <p>Prière d'adresser toutes les communications concernant la matière du „Bulletin“ au</p> <p>Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens Seefeldstrasse 301, Zurich 8 — Telephon: Hottingen 7320 qui s'occupe de la rédaction.</p> <p>Toutes les correspondances concernant les abonnements, l'expédition et les annonces, doivent être adressées à l'éditeur</p> <p>Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A. Stauffacherquai 36/38 Zurich 4 Telephon Selnau 7016</p>
<p>Abonnementspreis (für Mitglieder des S. E. V. gratis) für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft: Schweiz Fr. 20.—, Ausland Fr. 25.— Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 2.— plus Porto.</p>	<p>Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A. S. E.), y compris l'Annuaire Fr. 20.— pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger. L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 2.—, port en plus.</p>

XIV. Jahrgang
XIV^e Année

Bulletin No. 6

Juni 1923
Juin

Wegleitung für den Schutz von Wechselstromanlagen gegen Ueberspannungen.¹⁾

Aufgestellt von der Gruppe b (Ueberspannungsschutz) der Kommission für Hochspannungsapparate,
Brand- und Ueberspannungsschutz des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins (S. E. V.)
und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke (V. S. E.).²⁾

A. Einleitung.

Bearbeitet im Auftrage der Gruppe b von Ingenieur *H. Schait*, Assistent an der E. T. H. in Zürich.

Aendert sich der stationäre Zustand einer elektrischen Anlage, sei es gewollt (betriebsmässiges Schalten) oder ungewollt (Erdschluss oder Kurzschluss), dann strebt derselbe einem den geänderten Verhältnissen Rechnung tragenden, neuen stationären Zustande zu. Die Brücke, die den Uebergang von einem stationären Zustand zu einem anderen bildet, nennt man den elektromagnetischen Ausgleichsvorgang. Wie beim Uebergang von einer Stromstärke zu einer anderen das Amperemeter zu Schwingungen seines mechanischen Systems, ausgelöst durch Masse und Federkraft, veranlasst wird, so besteht der elektromagnetische Ausgleichsvorgang in Schwingungen von Strom und Spannung, die durch Induktivität und Kapazität der Anlageteile bedingt sind. Dank der Reibung beim Amperemeter und infolge des ohmschen Widerstandes bei der elektrischen Anlage klingen die Schwingungen ab und ermöglichen so den neuen stationären Zustand. Das Wesent-

¹⁾ Beschluss der Generalversammlung des S. E. V. vom 1923. Diese Wegleitung tritt an Stelle des Berichtes über den Schutz elektrischer Anlagen gegen Ueberspannungen (Leitsätze); siehe Bulletin des S. E. V., 1916, No. 6, Seiten 137 u. ff. Die Kommission beabsichtigt, eine Ergänzung der Wegleitung für Gleichstromanlagen zu veröffentlichen.

Schriftliche Aeusserungen zur Wegleitung sind bis zum 5. August 1923 zu richten an das Generalsekretariat des S. E. V. und V. S. E., Seefeldstrasse 301, Zürich.

²⁾ Die Gruppe b der genannten Kommission, welche sich mit der Revision der „Leitsätze“ von 1916 befasst hat, besteht aus den Herren: Prof. Dr. Kummer, Zürich (Präsident); Dr. Bauer, Bern; Gysel, Zürich; Dr. Roth, Baden; Schmidt, Lausanne und dem Generalsekretär des S. E. V. und V. S. E. ex officio; Mitarbeiter Ing. H. Schait, Zürich und der Obergeringenieur des Starkstrominspektorates.

liche an diesen Schwingungen ist, dass der Spannungsverlauf Werte annehmen kann, welche die Anlageteile gefährden. Die Ueberspannung beim elektrischen Vorgang, d. h. die Spannung, die eine höhere als die dem normalen Betriebszustande entsprechende Beanspruchung der Isolation erzeugt, kann gefährlich werden zufolge ihrer *Höhe*, ihrer *örtlichen Verteilung* auf dem Leiter und im Dielektrikum und ihrer *Häufigkeit* und *Dauer*. Ob eine Ueberspannung als gefährlich anzusehen ist, kann den folgenden, durch die Erfahrung gewonnenen Ergebnissen entnommen werden. Anlageteile für mindestens 1000 Volt Betriebsspannung (verkettete Spannung) werden als gefährdet betrachtet, wenn die Ueberspannung zirka 75% der niedrigsten in Anwendung gebrachten Prüfspannung der Anlageteile übersteigt. Wicklungen sind ausserdem als gefährdet zu betrachten, wenn die örtliche Spannungsverteilung am Leiter und im Dielektrikum derselben eine Spannungsbeanspruchung bedingt, die

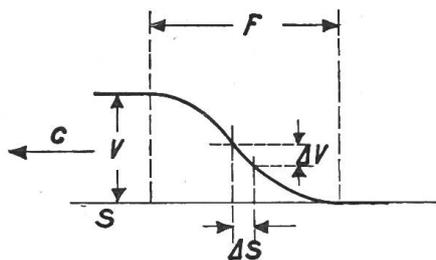


Fig. 1

Entladewelle.

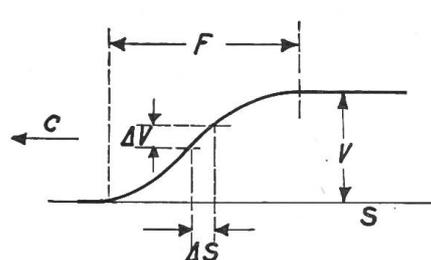


Fig. 2

Ladewelle.

 F = Wellenstirn, V = Höhe der Sprungwelle, s = Weg, c = Geschwindigkeit der Welle in Bewegungsrichtung, $\frac{dV}{ds}$ = Steilheit der Welle.

höher ist als diejenige der Sprungwellenprüfung und der Windungsprüfung.³⁾ Handelt es sich um nur kurzzeitige Ueberspannungen, so sind für Anlageteile mit festen und besonders mit flüssigen Isolierstoffen erst höhere Werte als die oben angegebenen gefährlich. Ueber das

Mass der Gefährdung durch die Dauer und Häufigkeit einer Ueberspannung liegen noch keine Erfahrungen vor, wohl deswegen, weil heute geeignete Registriervorrichtungen noch fehlen. Das Studium der elektromagnetischen Ausgleichsvorgänge bei in der Praxis beobachteten Störungsfällen ermöglichte, diejenigen Ueberspannungsvorgänge zu erkennen, welche die Betriebssicherheit der Anlagen besonders gefährden.

Da die Ueberspannungen häufig in Form von Sprungwellen auftreten, soll zur Erleichterung des Verständnisses solcher Vorgänge zuerst das Wesen der Sprungwellen erläutert werden.

Die Sprungwellen.

Wie bereits angedeutet, sind Induktivität und Kapazität die Leiterkonstanten, welche die Schwingungen ermöglichen. Die Schwingung besteht in einer fortwährenden Umwandlung der Energieform, indem die in der Induktivität gebundene magnetische Energie sich umsetzt in elektrische Energie, welche in der Kapazität aufgespeichert wird und umgekehrt. Bei gleichmässig über das Leitergebilde verteilter Induktivität und Kapazität spricht man von Wanderwellen, die sowohl als Entlade- oder Ladewellen, wie auch als Kombination beider in regelmässigem Wechsel auftreten können.

Entladewellen (Fig. 1) entstehen, wenn an einer Leitung Ueberschläge nach Erde oder nach anderen Polen entstehen. Dadurch nimmt die betreffende Stelle der Leitung plötzlich eine andere Spannung an. Da sich solche Aenderungen nur mit endlicher Geschwindigkeit fortpflanzen können, behalten benachbarte Leitungsteile ihre frühere Spannung momentan noch bei. Dadurch entsteht in Richtung der Leitung ein starkes Spannungsgefälle, das längs derselben verläuft. Besonders hoch wird dieses Gefälle dann, wenn die Spannung der Leitung durch vorhergehende Ueberspannungsvorgänge über die Betriebsspannung hinaus gesteigert worden ist. Als Ursache für Entladewellen kommen in erster Linie Ueberschläge

³⁾ Siehe Bulletin S. E. V. 1923, Heft 3, Seiten 188 u. 189.

nach Erde infolge atmosphärischer Ueberspannungen in Frage, sodann gewöhnliche Erd- und Kurzschlüsse und Schaltvorgänge. Treffen solche Entladewellen auf Wicklungen auf, so wird, z. B. bei Ueberschlag nach Erde, die Spannung der ersten Windung gegen Erde auf Null gebracht, während weiter innen liegende Wicklungsteile noch die vorher bestehende Spannung bewahren. Dadurch treten zwischen benachbarten Teilen der Wicklung grosse Spannungsunterschiede auf, welche bis zum 100fachen der betriebsmässigen Beanspruchung ansteigen können.

Ladewellen (Fig. 2) entstehen dadurch, dass entweder einzelne Stellen von Leitungen (bei Schaltvorgängen und direkten Blitzschlägen), oder ganze Leiterstrecken (bei indirekten Blitzschlägen) plötzlich auf höhere Spannung gegen Erde gebracht werden. Dadurch entstehen wieder Spannungsgefälle in Richtung der Leitung, welche grundsätzlich dieselben Folgen wie bei Entladewellen haben können. Erfahrungsgemäss ist diese Erscheinung aber, soweit das Spannungsgefälle selbst in Frage kommt, weniger gefährlich, bei indirekten Blitzschlägen, weil dasselbe sehr flach verläuft und bei Schaltvorgängen, weil die Ueberspannung nicht gross ist.

Werden Entladewellen an Leitungsenden reflektiert, so entstehen Lade- und Entladewellen in regelmässigem Wechsel, die Resonanzerscheinungen in Wicklungen und Anlageteilen zur Folge haben können (siehe S. 310 u. ff.).

Es ist gebräuchlich, steile Wellen Sprungwellen zu nennen.

Nach Erkenntnis der Gefahr, die in den Sprungwellen liegt, hat man Mittel zur Abflachung ihres steilen Gefälles gesucht, ebenso zu ihrer Reflexion und Ableitung nach Erde. In den Schutzdrosselspulen und Schutzkondensatoren erblickte man Mittel zur Reflexion von Spannung bzw. Stromstärke, sowie auch Mittel zur Abflachung der steilen Stirn. In den Ableitern (wie Hörnerableiter und Walzenableiter mit Widerständen, Bleisuperoxydableiter, Elektrolytableiter u. a. m.) erkannte man auch Mittel zur Ableitung der Sprungwellen nach Erde. Durch Drosselspulen wollte man die im Netz entstandenen Sprungwellen wieder auf dasselbe zurückwerfen, um besonders Transformatoren und Generatoren zu schützen und um die Umwandlung der Sprungwellenenergie in dem ohmschen Widerstande des Netzes in Wärme herbeizuführen. Wenn auch manchmal ein teilweiser Schutz mit den angegebenen Mitteln erreicht wurde, so entsprachen doch weder Spulen, noch Kondensatoren oder Ableiter völlig den an sie gestellten Anforderungen. Der Theorie, nach der man Drosselspulen glaubte rechnen zu können, liegen Vereinfachungen zugrunde, die sich als unzulässig ergeben haben. Die Wirkungsweise solcher Spulen ist heute noch nicht so erforscht, wie der Ueberspannungsschutz es fordert. Neuere Versuche haben ergeben, dass die Induktivität von Drosselspulen zum Schutz von Transformatoren mindestens $3 \div 5 \text{ mH}$ betragen sollte, um eine befriedigende Schutzwirkung zu erzielen, während die bisher eingebauten Spulen eine Induktivität von höchstens 1 mH , meistens aber nur Bruchteile davon aufweisen.

Kondensatoren besitzen nur dann eine Schutzwirkung, wenn ihre Kapazität genügend gross gewählt wird. Vor allem muss auch verlangt werden, dass sie betriebssicher sind; sie sollen deshalb mit mindestens derselben Spannung und Dauer wie die übrigen Anlageteile geprüft werden.

Für sprungwellensicher gebaute Transformatoren und Maschinen sind Drosselspulen und Kondensatoren in der Regel überflüssig, dagegen sind sie empfehlenswert für Hochspannungs-Generatoren und -Motoren, welche direkt an Freileitungsnetze angeschlossen sind.

Die Funkenableiter mit Seriewiderstand erfüllten ihren Zweck bisher in den wenigsten Fällen einwandfrei, da der in Serie geschaltete Ableiterwiderstand, der ein sicheres Löschen des Lichtbogens gewährleisten soll, im allgemeinen einen viel grösseren Widerstand erhalten muss, als für genügende Ableitung von Sprungwellenenergie erforderlich ist. Dieser Widerstand sollte nicht grösser sein als der sogenannte Wellenwiderstand ⁴⁾

⁴⁾ Darunter versteht man die Quadratwurzel aus dem Verhältnis der Induktivität zur Kapazität gegen Erde pro km Einzelleiter.

der Freileitung, an welche die Funkenableiter angeschlossen sind, d. h. nicht grösser als zirka $500 \div 600$ Ohm. Mit Rücksicht auf die Gefahr des Stehenbleibens des Lichtbogens am Funkenableiter und die Wärmekapazität des Widerstandes darf man schon bei relativ niedrigen Spannungen nicht auf den genannten Wert hinuntergehen, und bei höheren Spannungen (z. B. über 11 kV bei Anwendung von Wasserwiderständen) muss man zu Ableiterwiderständen von so hohem Widerstandswert greifen, dass eine wirksame Ableitung von Ueberspannungsenergie nicht möglich ist. Deshalb steht bei den höheren Spannungen der grosse Kostenaufwand, namentlich in bezug auf Platzbedarf, in keinem wirtschaftlich zu verantwortenden Verhältnis zur Schutzwirkung des Funkenableiters. Endlich bereitet die Herstellung zuverlässig wirkender und jederzeit betriebsbereiter Ableiterwiderstände erhebliche Schwierigkeiten. Die meisten im Gebrauch befindlichen Konstruktionen sind als Wasserwiderstände ausgeführt und weisen ein zu kleines Volumen auf. Das Wasser erwärmt sich unzulässig rasch, sein Widerstandswert nimmt daher ab, wodurch die Stromstärke vergrössert wird. Entweder bleibt dann der Lichtbogen stehen und schlägt gegen Erde über, oder das Wasser verspritzt explosionsartig (der Widerstand „packt aus“). Ein grosser Teil der sogenannten guten Erfahrungen, die vielerorts mit den Funkenableitern bei Bekämpfung der Sprungwellen (soweit Ladewellen in Frage kommen) gemacht worden sein sollen, beruht auf unkritischer Beobachtung und Beurteilung der Vorgänge. Es sei nur daran erinnert, wie mancher Betriebsleiter schon zufrieden war, nachdem es ihm gelang, die Störungen, welche die Funkenableiter wegen unrichtiger Aufstellung und ungenügender Bemessung der Widerstände selbst verursachten, endlich beseitigt zu haben, und wie oft die früher grosse Zahl von Beschädigungen an Transformatoren und Apparaten nur dadurch vermindert wurde, dass mit der sukzessiven Vermehrung der Funkenableiter und sonstiger „Blitzschutz“-Apparate auch eine ständige Verbesserung der Isolation der gefährdeten Anlageteile und eine Ausmerzung aller „schwachen Stellen“ Hand in Hand ging. Inwieweit eine Verbesserung der Funkenableiter durch Kombination mit automatischer Lichtbogenlöschung, wie solche in jüngster Zeit in den Handel kommen, erzielt werden kann, wird die Zukunft lehren. Ueber die anderen genannten Ableiter sind zu wenig einwandfreie Betriebserfahrungen bekannt geworden, um dieselben empfehlen zu können. Die Bedeutung der Ableiter zum Schutz gegen Ueberspannungen des aussetzenden Erdschlusses ist auf Seite 305 dargelegt.

Da das Anbringen von Funkenableitern prinzipiell eine gute Massnahme zum Schutz elektrischer Anlagen gegen Ueberspannungen ist, können Ableiter zugelassen werden, wenn ihre Ausführung folgenden Bedingungen genügt: Die Durch- bzw. Ueberschlagsspannung hat für die jeweilige Einstellung annähernd konstant zu sein; der Ohmwert des Ableiterwiderstandes soll so klein als praktisch möglich gehalten werden und jedenfalls den Wellenwiderstand der Leitung, an der der Ableiter liegt, nicht überschreiten; beim Ansprechen soll der Widerstand den Betriebsstrom begrenzen und sofort unterbrechen, ohne dadurch Störungen zu verursachen.

Bei der Anwendung von Ableitern soll man sich aber immer dessen bewusst sein, dass die Ueberspannungs- und Sprungwellenvorgänge viel verwickelter sind, als man früher angenommen hat und als die meisten Praktiker auch heute noch aus den vereinfachten bildlichen Darstellungen glauben schliessen zu dürfen, mit denen die Wissenschaft sie dem Verständnis hoffte näher bringen zu können.

Bis vor wenigen Jahren wurde angenommen, dass Sprungwellen nur in den Eingangswindungen von Wicklungen Ueberspannungen erzeugen, indem angenommen wurde, dass eine Abflachung der Wellenstirn durch die Eingangswindungen selbst bewerkstelligt werde. Diese Annahme trifft zu für Transformatoren kleiner und mittlerer Leistung, wie Durchschläge an den Eingangswindungen zeigen. Bei grösseren, nicht sprungwellensicher gebauten Transformatoren traten aber oft Windungsdurchschläge in weiter innen liegenden Teilen der Wicklung auf, was darauf schliessen lässt, dass die von aussen kommenden Sprungwellenzüge den Anstoss zu inneren Schwingungserscheinungen geben, die ihrerseits wieder Win-

dungsüberspannungen erzeugen. Durch die bisher vielfach übliche Verstärkung der Isolation der Eingangswindungen werden daher nicht immer sprungwellensichere Wicklungen erhalten. In welchem Masse den Wicklungen vorgeschaltete Drosselspulen oder Kondensatoren auf Wanderwellen einwirken, wird heute noch nicht soweit überblickt, dass eine Wegleitung für die Bemessung dieser Apparate gegeben werden könnte.

Wanderwellen in Freileitungen mit Spannungen über 100 kV werden durch Koronaverluste abgeflacht und ihre Höhe verkleinert sich.

Aus dem bisher Gesagten geht hervor, dass es heute keinen sicher wirkenden äusseren Schutz gegen Sprungwellen gibt, sondern dass man, sofern es sich nicht um bereits bestehende Anlagen handelt, diesen Schutz am besten in die zu schützende Wicklung selbst verlegt, d. h. sie sprungwellensicher baut. Transformatoren und, soweit möglich, auch Generatoren und Motoren sollten deshalb nicht nur der stets üblich gewesenen Spannungsprüfung, sondern auch einer nach bestimmten Normalien vorzunehmenden Sprungwellenprüfung unterzogen werden.⁵⁾

Schaltüberspannungen.

Gefährliche Ueberspannungen können beim Schalten von Leitungen, Transformatoren und Hochspannungsmotoren unter heute noch nicht abgeklärten Voraussetzungen entstehen, wobei das nicht gleichzeitige Zünden und Rückzünden der verschiedenen Pole eine Rolle zu spielen scheint. Es hat sich auch gezeigt, dass Sättigung und Leistung der Transformatoren und Motoren die Grösse der beim Schalten entstehenden Ueberspannung beeinflussen. Um Ueberspannungen im Keime schon zu ersticken, baut man bei Oelschaltern Vorkontaktwiderstände ein. Die Erfahrung hat aber ergeben, dass bei Leitungsschaltern Vorkontaktwiderstände im allgemeinen nicht notwendig sind. Dagegen sind sie anzuwenden bei Transformatoren, welche betriebsmässig im Leerlauf geschaltet werden von 40 kV Betriebsspannung an; für Motoren ist die Frage der Wirkung und der Notwendigkeit solcher Widerstände noch nicht abgeklärt. Die Vorkontaktwiderstände sollen derart bemessen werden, dass bei Transformatorschaltern der Leerlaufstrom, rechnermässig im Vorkontaktwiderstand einen Spannungsabfall erzeugt, der gleich der $0,5 \div 0,7$ fachen Betriebsspannung ist.

Der aussetzende Erdschluss.

Die meisten Störungen in ungeschützten elektrischen Anlagen haben den aussetzenden Erdschluss als Ursache, der eingeleitet werden kann durch Ueberspannungen, Vögel, Drahtwurf, Steinwurf, Baumschlag und fehlerhafte Isolation. Gewöhnlich bildet das Netz die Fehlerquelle, wobei die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Fehlern um so grösser ist, je ausgedehnter das Netz ist. Der Erdschluss heisst aussetzend, wenn sein Lichtbogen innert jeder Halbperiode löscht und wieder zündet. Beim Löschen des Lichtbogens werden Gleichspannungen, die infolge der durch den Erdschluss bedingten Unsymmetrie entstehen, abgetrennt, welche sich der Phasenspannung überlagern. Die dadurch hervorgerufenen Ueberspannungen veranlassen die Rückzündung, wobei, wie beim Löschen, Sprungwellen ausgelöst werden. Durch wiederholte Rückzündungen schwingt die Ueberspannung in Dreiphasennetzen an den gesunden (nicht erdgeschlossenen) Phasen, je nach der Dämpfung, auf das $1,7 \div 2,3$ -fache der verketteten Spannung und an der kranken Phase beim Löschen des Lichtbogens auf das $1,7 \div 2,2$ fache der verketteten Spannung gegen Erde. Die Gleichspannung erreicht dabei den $1,1 \div 1,5$ fachen Wert der verketteten Spannung. Die bei jeder Rückzündung auftretenden Sprungwellen können somit eine Höhe vom $1,7 \div 2,2$ fachen der verketteten Spannung annehmen; sie erreichen diese Werte aber nur, wenn der Erdschlussstrom einen gewissen Wert erreicht, schätzungsweise 1,5 Ampere bei 50 Perioden pro Sekunde.

⁵⁾ Prüfnormalien für Transformatoren siehe Bulletin S.E.V. 1923, Heft 3, Seiten 188 und 189. Für Generatoren und Motoren ist die Regelung erst noch zu erstreben.

Die Ueberspannungen des aussetzenden Erdschlusses, sowie die schädlichen Folgen seines Lichtbogens können durch die Anwendung der Nullpunktserdung, von Löserspulen, oder von Funkenableitern vermieden werden. Der Vollständigkeit halber seien noch der Erdungsschalter und der Nicholson-Lichtbogenlöscher erwähnt, welche die kranke Phase automatisch an Erde legen, über deren Wirkungsweise aber noch keine genügenden Betriebserfahrungen vorliegen.

Die direkte oder über einen kleinen Widerstand ausgeführte Nullpunktserdung (Fig. 3 und 4) hat im Erdschlussfalle sofortiges Abschalten der defekten Strecke zur Folge. Der induktive Strom, den die Löserspule (Fig. 5) im Erdschlussfalle aufnimmt, kompensiert den kapazitiven Erdschlussstrom des Netzes und unterdrückt somit den Lichtbogen. Eine Betriebsunterbrechung findet also bei Anwendung von Löserspulen nicht statt, dagegen nehmen die gesunden Phasen die verkettete Spannung gegen Erde an, was bei der direkten Nullpunktserdung unterbleibt. Beim Uebergang von Phasenspannung auf verkettete Spannung wird die letztere infolge des unstationären Schwingungsvorganges kurzzeitig überschritten, je nach der Dämpfung des Netzes bis zu 50%. Die erwähnten Gleichspannungen nehmen ihren Weg entweder über die Nullpunktserdung oder über die Löserspule nach Erde.

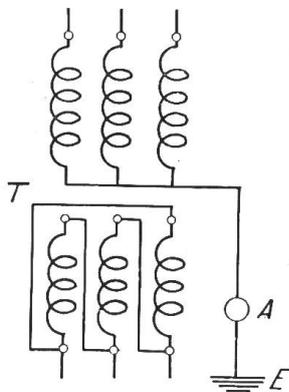


Fig. 3

Direkte Nullpunktserdung.

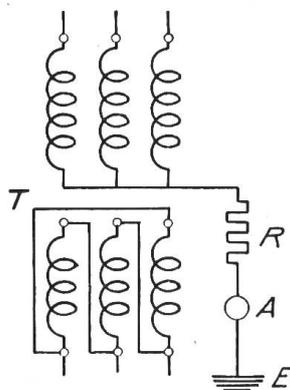


Fig. 4

Nullpunktserdung über ohmschen Widerstand.

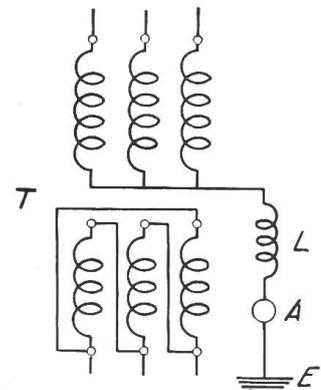


Fig. 5

Nullpunktserdung über Löserspule.

T = Transformator,

L = Löserspule,

R = ohmscher Widerstand,

A = Amperemeter,

E = Erdung.

Da die Löserspule, welche den Lichtbogen im Erdschlussfalle unterdrückt, dies ohne Betriebsunterbruch nur tun kann, wenn das Dielektrikum sich selbsttätig regeneriert, hat ihre Anwendung nur bei Freileitungen einen Sinn. Bei Kabeln verursacht ein Erdschluss eine bleibende Beschädigung der Isolation, weshalb es hier angezeigt ist, die Nullpunktserdung anzuwenden.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass ein Netz von mindestens 1000 Volt Spannung gegen die Folgen des aussetzenden Erdschlusses geschützt werden sollte, wenn sein Erdschlussstrom etwa $1,5 \cdot \frac{\text{Frequenz}}{50}$ Ampere übersteigt. Dieser Erdschlussstrom tritt

auf in Netzen von einer Ausdehnung in km von etwa $\frac{600 \text{ bzw. } 10}{\text{verkettete Spannung (in kV)}}$ für reine Freileitungsnetze, bzw. reine Kabelnetze. Damit ist eine untere Anwendungsgrenze für diese Schutzmittel gegeben.

Währenddem das Verwendungsgebiet der Nullpunktserdung in bezug auf die Spannung nach oben nicht beschränkt ist, besteht für die Anwendung der Löserspule eine Grenze, von der aus es vorteilhaft erscheint, auch in Freileitungsnetzen die Nullpunktserdung anzuwenden. Diese Grenze liegt bei zirka 80 kV Betriebsspannung. Von dieser Spannung an treten Erdschlüsse erfahrungsgemäss selten auf, wodurch die Spule an Bedeutung verliert; ferner gestattet die Verwendung der direkten Nullpunktserdung eine Verminderung der Prüfspannung wichtiger Anlageteile,

da bei Verwendung derselben die verkettete Spannung gegen Erde nicht auftreten kann, was hauptsächlich bei hohen Spannungen von wirtschaftlicher Bedeutung ist.

Die indirekte Nullpunktserdung, d. h. die über einen niederohmigen Widerstand ausgeführte Erdung des Nullpunktes ist notwendig, wenn die direkte Erdung einen mit Rücksicht auf Personengefährdung an der Erdschlussstelle und mit Rücksicht auf Erwärmung des Kabelmantels unzulässig hohen Kurzschlussstrom ergibt. Die Spannungserhöhung der gesunden Phasen bei Erdschlüssen kann dann allerdings nicht verhindert werden.

In Netzen, die aus Freileitungen und Kabeln bestehen, ist es angebracht, die Löschspule anzuwenden, um Betriebsunterbrechungen bei Erdschlüssen mit vorübergehendem Charakter möglichst zu vermeiden. Dabei muss der Netzteil mit Kabeln für die verkettete Spannung gegen Erde isoliert werden. Ueberwiegt die Kabelanlage, so sind im allgemeinen Betriebsunterbrechungen, verursacht durch die Freileitung, selten. Als Schutzmittel ist dann die Nullpunktserdung angezeigt, weil es erwünscht ist, dass eine defekte Kabelstrecke sofort abgetrennt wird.

Um jeden Netzteil bei normal vorkommenden Betriebsverhältnissen gegen die Ueberspannungen des aussetzenden Erdschlusses zu schützen, soll jeder betriebsmässig selbständig arbeitende Netzteil eine Löschspule erhalten. Damit ein Hauptvorteil der direkten Nullpunktserdung, nämlich die Unterdrückung der verketteten Spannung gegen Erde im Erdschlussfalle erreicht wird, sind möglichst viele Transformatoren zu erden.⁶⁾ Bei direkter Nullpunktserdung sollen die Freileitungen auf Eisenmasten mit einem Erdseil versehen sein, um die Gefährdung von Personen in der Nähe von Masten zu vermindern. Werden für diese Leitungen ausnahmsweise Holzmasten verwendet, so sind die Isolatorstützen mit dem Erdseil zu verbinden. Transformatoren, deren Nullpunkt geerdet wird, sollen in Stern-Dreieck geschaltet werden, um Telephonstörungen zu vermeiden. Kommen Widerstände bei der Nullpunktserdung zur Verwendung, dann sollen dieselben den Kurzschlussstrom der Anlage während mindestens einer halben Minute ertragen können, ohne sich wesentlich zu verändern; ihr Widerstandswert muss stets eine sichere Auslösung der Ueberstromrelais gewährleisten. Bei Leitungen über 80 kV mit direkter Nullpunktserdung sind zur Vermeidung der Beeinflussung von Schwachstromanlagen durch Erdströme die Leitungen derart zu verdrillen, dass für jeden unabhängig betriebenen Netzteil mindestens eine vollständige Verdrillung besteht.

Ueberspannungen des aussetzenden Erdschlusses können auch durch Funkenableiter vermieden werden. Löschspulen oder Nullpunktserdung sind aber wirksamer als diese, da sie nicht nur die Ueberspannungen beheben, sondern auch andere Folgen der Erdschlüsse (Lichtbogen, beziehungsweise Spannungserhöhung der gesunden Phasen) vermeiden; ausserdem sind Löschspulen und Nullpunktserdung billiger, namentlich bei Berücksichtigung des Platzbedarfes. Der Summenstrom aller ansprechenden Ableiter muss grösser sein als ungefähr die Hälfte des Erdschlussstromes der Anlage.

Die fortlaufende Ueberwachung der Erdschlüsse wird erreicht durch in den Erdungskreis eingebaute Registriervorrichtungen. Dieselbe ist sehr zu empfehlen, denn sie ermöglicht Einsicht in eines der wichtigsten Störungsgebiete elektrischer Anlagen.

Das luftelektrische Feld.

Freileitungen sind der elektrostatischen Induktion des luftelektrischen Feldes ausgesetzt und sind somit der Entstehungsort statischer Ladungen, die sich der Betriebsspannung überlagern.

Solche Ladungen können entstehen bei langsamen Verschiebungen des luftelektrischen Feldes (Herannahen von Wolken usw.). Da diese Vorgänge verhältnismässig langsam vorsichgehen, verteilen sich die Ladungen gleichmässig auf das ganze Netz. Bei guter Isolation desselben und wenn Erdungen fehlen (z. B. durch

⁶⁾ Der Einfluss vieler Erdungen auf Schwachstromleitungen ist allerdings noch nicht abgeklärt.

Drosselspulen, Wasserstrahlerder usw.) können hohe Spannungen durch statische Ladung entstehen, welche zu Ueberschlägen nach Erde führen können.

Solche Ladungen werden ferner frei bei plötzlichen Aenderungen des luftelektrischen Feldes (Entladung von über der Leitung befindlichen Wolken nach Erde, indirekte Blitzschläge genannt) und verursachen Spannungsdifferenzen auf der Leitung und gegen Erde, welche im Entstehungsmoment örtlich begrenzt sind und sich dann in Form von Ladewellen nach beiden Seiten in das Netz hinein fortpflanzen (siehe auch Seite 303). Ihr Gefälle ist klein und deshalb als solches ungefährlich, dagegen können diese Ladewellen infolge der Höhe ihrer Spannung gegen Erde zu Ueberschlägen an irgendwelchen Stellen des Netzes führen.

Diese verursachen am Ueberschlagsort eine Entladewelle, oder eine Reihe kombinierter Entlade- und Ladewellen (siehe Seite 303), welche die gefährlichste Erscheinungsform der atmosphärischen Ueberspannungen bilden, da sie im Innern von Wicklungen Spulen- und Lagenschlüsse hervorrufen können. Mit zunehmender Entfernung der Ueberschlagstelle wird die steile Wellenstirn abgeflacht, so dass dieselbe bei grösserer Entfernung der Ueberschlagstelle von Wicklungen als ein Kilometer kaum mehr gefährlich sein dürfte.

Eine weitere Form der atmosphärischen Ueberspannungen bilden die direkten Blitzschläge, d. h. Blitzschläge, welche die Leitung selbst treffen. Diese führen meistens in kurzer Entfernung von der Einschlagstelle zu Ueberschlägen nach Erde.

Anlagen sehr hoher Spannung, ungefähr über 80 kV, sind durch luftelektrische Ueberspannungen kaum mehr gefährdet, da ihre Isolationsfestigkeit, so hohe Werte erreicht, dass die atmosphärische Ueberspannung, welche von der Betriebsspannung der Leitung unabhängig ist, nicht zum Ueberschlag führt.

Auf Anhöhen ist der Gradient des Erdfeldes grösser als in der Ebene. Freileitungen sind daher

dort durch direkte und indirekte Blitzschläge besonders gefährdet. Daher empfiehlt sich an Orten, an denen erfahrungsgemäss häufig Blitzschläge auftreten, Stützisolatoren in der Höhe ihrer Basis mit einem Metallring (Fig. 6), Hängeisolatoren mit Bügeln (Fig. 7) zu versehen, um dieselben vor der schädlichen Wirkung des Lichtbogens zu schützen.

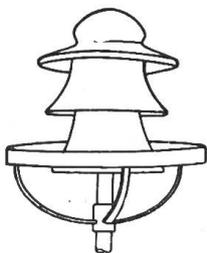


Fig. 6

Stützisolator mit metallnem Schutzring.

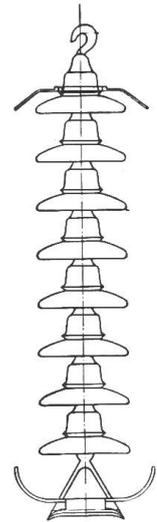


Fig. 7

Hängeisolator mit Schutzbügel.

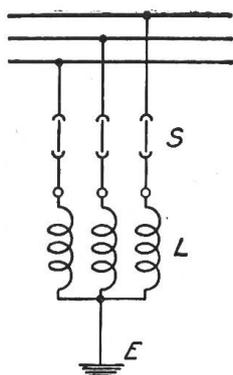


Fig. 8

Erdungsdrosselspule zur Ableitung statischer Ladungen in einem Drehstromnetz.

S = Trennmesser,
L = Erdungsdrosselspule,
R = Wasserstrahlerder,

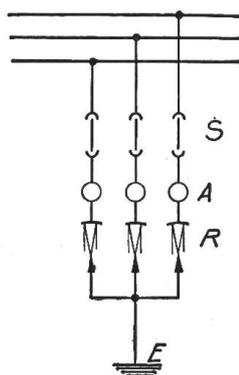


Fig. 9

Wasserstrahlerder

A = Amperemeter,
E = Erdung.

Erde über Drosselspulen (Fig. 8) oder den Betrieb nicht beeinträchtigende Widerstände (z. B. Wasserstrahlerder, Fig. 9) abgeleitet werden. Netze, die über Null-

punktserdung oder Löschspulen bereits einen Weg nach Erde besitzen, benötigen keine derartigen Einrichtungen. Ueber der Freileitung an denselben Masten geführte Erdseile verringern die Ueberspannungen atmosphärischen Ursprunges. Der Schutzwert solcher Seile ist allerdings nicht sehr hoch einzuschätzen. In der Regel ist nur ein Erdseil pro Leitung wirtschaftlich gerechtfertigt und zwar hauptsächlich deshalb, weil dasselbe auch andere Dienste leistet, wie z. B. die Verbesserung der Erdung von Eisenmasten. Bei Holzmastenleitungen empfiehlt sich die Anwendung des Erdseiles nicht, weil die elektrische Festigkeit der Leitung infolge der Verkleinerung der Isolationsstrecke des Holzes viel weiter herabgesetzt wird als die Beanspruchung der Isolatoren bei Blitzschlägen, welche bei einem Erdseil nur um zirka 30% reduziert wird.

Die kapazitive Spannungsübertragung.

Die kapazitive Spannungsübertragung bei Transformatoren, Strom- und Spannungswandlern, sowie bei parallel laufenden Leitungen tritt ein, wenn ein Pol der Oberspannungsseite geerdet ist, vorübergehend bei Erdschluss, dauernd bei Bahnbetrieb. Dann entsteht eine Unsymmetriespannung gegen Erde von der Grösse der Phasenspannung. Diese induziert in der Seriekapazität, gebildet aus den Elektroden: Oberspannungswicklung – Unterspannungswicklung und den Elektroden: Unterspannungswicklung – Erde, Teilspannungen, wobei die Teilspannung an dem letztgenannten Elektrodenpaar unzulässig hoch werden kann. Die Wesensgleichheit dieser Erscheinungen mit der elektrischen Induktion der Freileitung durch das Erdfeld ist sofort ersichtlich, wenn man die Elektroden der Seriekapazität ersetzt durch die Elektroden: Wolke – Freileitung; Freileitung – Erde. Ob die Spannung der Unterspannungsseite gefährliche Werte annimmt, hängt ganz von der Kapazität der letzteren gegen Erde ab, welche sich aus der Kapazität der Unterspannungswicklung und derjenigen der daran angeschlossenen Leitungen und Maschinen zusammensetzt. Ist die Kapazität der Unterspannungsseite gegen Erde klein, sind also keine oder nur kurze Leitungs- oder Kabelstücke an die Unterspannung angeschlossen, so kann die Erscheinung in unzulässigem Masse auftreten. Sie kann verstärkt werden, wenn auf der Unterspannungsseite Erdungsdrosselspulen zwischen Phase und Erde geschaltet sind, welche die Kapazität derselben gegen Erde kompensieren.

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass auch bei parallel laufenden Leitungen verschiedener Spannung kapazitive Einwirkungen möglich sind. Durch die Vergrösserung der Kapazität der Unterspannungsseite von Transformatoren, Strom- und Spannungswandlern können die kapazitiv übertragenen Ueberspannungen auf einen ungefährlichen Wert herabgesetzt werden. Bei Transformatoren wird die Kapazität der Unterspannungsseite durch die Anwendung von Kabeln oder Kondensatoren vergrössert; bei Messwandlern bewirkt die Erdung der Unterspannungswicklungen dasselbe. Treten bei parallel geführten Leitungen unzulässig grosse kapazitiv übertragene Ueberspannungen auf, so können dieselben auf einen ungefährlichen Wert vermindert werden, entweder durch teilweise Verlegung der einen Leitung auf ein entfernteres Gestänge oder durch die Erdung des Nullpunktes des Leitungsstranges mit der kleineren Spannung. Zur Behebung von Störungen durch kapazitive Einwirkung von parallel geführten Leitungen können unter anderem das Verlegen einer Leitung, wobei eine derselben auch als Kabel ausgeführt werden kann, oder auch das Verdrillen derselben in Frage kommen.⁷⁾ In letzterem Falle sollen längs der Parallelführung die Drähte der einen Leitung mindestens einmal zyklisch vertauscht werden. Dies bedingt bei einer Dreiphasenleitung zwei Verdrillmaste. In Netzen unter zirka 80 kV Spannung empfiehlt sich das Verdrillen der Leitungen wegen der grossen Netzdichte und der Erschwerung der Uebersicht über den Phasenverlauf im Netz weniger. Da sich die kapazitive Spannungsübertragung unter 80 kV im allgemeinen noch nicht stark geltend macht, so erscheint es heute zweckmässig, Leitungen erst von höheren Spannungen an zu verdrillen.

⁷⁾ Vergl. Seite 307.

In jedem Falle sollen bei Arbeiten an Leitungen sämtliche Pole derselben mindestens einmal sorgfältig geerdet werden.

Der direkte Spannungsübertritt von Oberspannung auf Unterspannungsseite.

Auf der Unterspannungsseite elektrischer Anlagen können auch Ueberspannungen zufolge direkten Uebertritts von Oberspannung auf Unterspannung auftreten. Dieser direkte Uebertritt erfolgt hauptsächlich dann, wenn sich an der Oberspannungsseite von Transformatoren Ueberschläge mit Lichtbogen bilden, und der letztere die Unterspannungsklemmen oder -Leiter erreicht. Ausserdem kommen direkte Durchschläge der Transformatoren von Ober- auf Unterspannung vor, ferner Ueberschläge auf das Transformatoreisen, Gestelleisen usw. und bei unsachgemäss ausgeführter Erdung von dort auf Unterspannung. Endlich entsteht ein direkter Uebertritt bei Kreuzungen von Ober- und Unterspannungsleitungen, wenn Drähte herunterfallen. Wenn nicht besonders günstige Verhältnisse vorliegen, erhält das Unterspannungsnetz die volle Spannung der Oberspannungsseite und schlägt an irgend einer Stelle nach Erde über. Ein spezieller Fall, welcher verhältnismässig oft auftritt, ist der, dass die Oberspannungsseite einer Transformatorenstation Erdschluss auf das Eisengestell hat. Wenn letzteres schlecht geerdet ist, nimmt es gegen Erde Spannung an, die durch Ueberschlag bzw. Durchschlag auf in der Nähe befindliche Niederspannungsanlageteile dieselben unter Spannung setzen können, wodurch Apparate und Personen gefährdet werden. Der Spannungsübertritt kann auch bei einer Durchschlagssicherung oder Nullpunktserdung der Niederspannungsseite erfolgen, wenn dieselbe mit dem Eisengestell verbunden ist. Durch gute und sachgemässe Ausführung und Erdung der Eisengestelle und des Nullpunktes bzw. der Durchschlagssicherung, ferner durch ausreichende Bemessung der Abstände der Unterspannungsleitungen und besonders der Beleuchtungsinstallationen nicht nur von den Oberspannungsleitungen, sondern auch von den Eisengestellen, die Oberspannungsanlageteile tragen, wird den erwähnten Gefahren vorgebeugt. Die Trennung der Erdung des Nullpunktes von derjenigen von Durchschlagssicherungen ist allerdings vom Gesichtspunkte des Ueberspannungsschutzes aus wünschenswert; es kommen hier jedoch auch andere Gesichtspunkte in Frage, die voraussichtlich in den sich in Revision befindlichen Bundesvorschriften betr. Starkstromanlagen berücksichtigt werden.

Die Durchschlagssicherung ist eine Funkenstrecke, gebildet aus zwei Elektroden, die mit Glimmer voneinander distanziert und einerseits an den Nullpunkt oder eine Phase, andererseits an Erde angeschlossen sind. Die Glimmerscheibe besitzt Öffnungen, welche von der Ueberspannung überbrückt werden. Die Durchschlagssicherung wird in Anlagen unter 1000 V Spannung, die nicht direkt geerdet sind, stets gute Dienste leisten gegen Ueberspannungen, welche Apparate und Personen gefährden.

Die Resonanzerscheinungen.

Jedem Stromkreis, der Induktivität und Kapazität enthält, kommt eine, durch deren Grösse bestimmte Eigenfrequenz zu. Wird ein solcher Kreis durch eine Quelle erregt, deren Frequenz Impulsfrequenz heissen möge, so tritt eine Resonanzerscheinung auf, wenn Impulsfrequenz und Eigenfrequenz übereinstimmen. Die Impulsfrequenz kann sein die Betriebsfrequenz oder die Frequenz von Oberwellen von Generatoren und Transformatoren, oder auch die Frequenz von Sprungwellenzügen; man wird jeweilen unterscheiden zwischen Resonanz mit Betriebsfrequenz oder Oberwellenfrequenz und solcher mit Sprungwellenfrequenz. Die Frequenz von Wanderwellenschwingungen liegt in praktisch vorkommenden Fällen immer bedeutend höher als die anders benannten Frequenzen; es werden daher mehr lokale Kreise, z. B. solche gebildet aus Schutzdrosselspulen und Sammelschienenkapazität, denen eine hohe Eigenfrequenz zukommt, auf Sprungwellenzüge ansprechen. Kreise, die durch Anregung der Betriebs- oder Oberwellenfrequenz in Resonanz geraten, können

gebildet werden bei Leitungsbrüchen mit einseitigem Erdschluss, sowie bei einpoligem Schalten. Der nicht erdgeschlossene Teil der vom Bruche betroffenen Phase nimmt in Dreiphasennetzen bis zum Abschalten der Fehlerquelle dauernd das $2,2 \div 2,3$ fache der verketteten Spannung an und zwar wird diese Ueberspannung während des Einschwingens (Kippens) noch um 30 % überschritten. Bei einpoligem Schalten, sei es mit Trennmessern oder mit Oelschaltern, bei ungleichmäßigem Durchgehen von Sicherungen, sowie ungleichzeitigem Löschen und Zünden von Hörnerableitern entsteht an den offenen und unverbundenen Phasen eine Ueberspannung vom $1,9 \div 2$ fachen Wert der verketteten Spannung. Ist der Erdschluss ein verkehrter, d. h. ist das Netz über die im Störungsbezirke liegenden Transformatoren geerdet (Fig. 10), so nehmen die beiden gesunden Phasen des Netzes gegen Erde das $1,3 \div 1,4$ fache und die getrennte offene Phase, wie bereits erwähnt, das $2,2 \div 2,3$ fache der verketteten Spannung an. Das Kippen erfolgt, je nach der Leitungslänge, entweder von selbst oder durch magnetische Erschütterungen der Transformatoren. In Netzen besonders grosser Kapazität (sehr grosse Kabelnetze) kann Resonanz mit Betriebsfrequenz auch bei Erdschluss erfolgen, ohne dass ein Leitungsbruch stattfindet. In diesem Falle bilden die Kapazitäten der gesunden Phasen gegen Erde und die Induktivität der vom Erdschluss

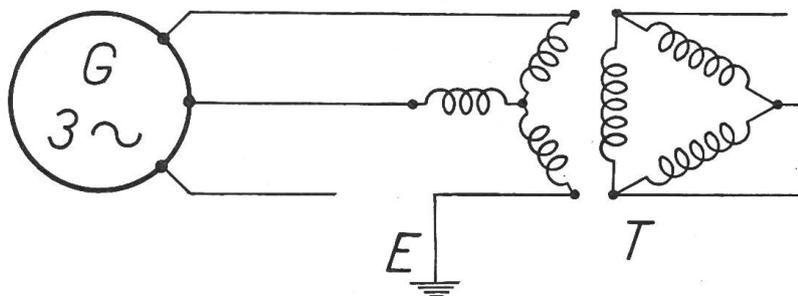


Fig. 10

Der verkehrte Erdschluss.

G = Generator;

T = Transformator;

E = Erdschluss.

durchflossenen Leitung den Resonanzkreis. Von etwa $50 \div 100$ Ampere Erdschlussstrom pro 10 kV Spannung an kann die Erscheinung gefährlich werden, und sie ist um so schärfer, je grösser der Kupferquerschnitt der in der Erdschlussbahn liegenden Leitung ist. Ueberströme und Ueberspannungen vom $2,5$ fachen bzw. $3,5$ fachen

Wert des Normalbetrages sind bei 50 mm^2 Querschnitt möglich, wenn der Erdschluss in kritischer Entfernung vom Werke erfolgt.

Im normalen Betriebe (ohne Erdschluss) kann allerdings Resonanz, angeregt durch Grundwellen oder Oberwellen, auftreten; diese hat jedoch praktisch kaum unzulässige Ueberspannungen zur Folge. Uebrigens ist zu sagen, dass gefährliche Resonanzen der Grundwellen und Oberwellen sehr selten auftreten, viel eher tritt Resonanz auf, angeregt durch Sprungwellenzüge beim Auftreffen derselben auf lokale Schwingungskreise, gebildet aus Schutzdrosselspulen und Sammelschienenkapazität oder Eingangskapazität von Transformatoren.

Die durch Oberwellen angeregten Resonanzüberspannungen werden vermieden durch eine reine Sinusform der Spannungskurve in Generatoren und durch Vermeidung allzu hoher Eisensättigung in Transformatoren, welche letztere die Ausbildung von oberharmonischen Schwingungen verursacht. Die Ausbildung von Resonanzüberspannungen, verursacht durch die Betriebsfrequenz, wird erschwert durch die allpolige Anordnung der Schalter und deren gleichzeitige Betätigung, durch die Kupplung der Trennmesser von Erdungsdrosselspulen, sofern sie unter Spannung geschaltet werden, sowie durch Weglassen der Sicherungen an den letzteren. Diese Massnahmen sind für Anlagen unter zirka 40 kV Betriebsspannung von geringerer Bedeutung, da hier der Sicherheitsgrad der Anlagen ein hoher ist und da erfahrungsgemäss erst von der erwähnten Spannungsgrenze an diese Ueberspannungen gefährliche Werte annehmen.

Resonanzüberspannungen, die angeregt werden durch Sprungwellenzüge, wird vorgebeugt durch Parallelwiderstände zu den im Zuge der Leitungsführung liegenden Induktivitäten, wie Stromwandler, Auslösespulen und Schutzdrosselspulen, da damit eine Dämpfung des Schwingungskreises erzielt wird.

B. Leitsätze.

I. Die Arten der Ueberspannungen in elektrischen Starkstromanlagen.

Gefährlichkeit
der Ueberspan-
nungen.

1. Wird an irgend einer Stelle der Anlage die dem normalen Betriebszustande entsprechende Spannungsbeanspruchung überschritten, dann besteht an dieser Stelle eine Ueberspannung. Die Ueberspannung kann gefährlich werden zufolge ihrer Höhe, ihrer örtlichen Verteilung auf dem Leiter und im Dielektrikum und ihrer Häufigkeit und Dauer. An Anlageteilen für mindestens 1000 V Betriebsspannung ist den Leitsätzen anhand der Erfahrung eine Ueberspannung, die zirka 75 % der niedrigsten in Anwendung gebrachten Prüfspannung der verschiedenen zusammengehörenden Anlageteile übersteigt, als gefährlich zugrunde gelegt. Eine Ausnahme machen dabei Anlageteile mit festen und besonders solche mit flüssigen Isolierstoffen, soweit ganz kurzzeitige Ueberspannungen in Frage kommen; für diese sind erst höhere Ueberspannungen gefährlich (hohe Momentanfestigkeit). Als gefährlich gelte an Wicklungen eine örtliche Spannungsverteilung an dem Leiter und im Dielektrikum, wenn sie die bei der Sprungwellenprüfung herrschende Beanspruchung übertrifft. In allen andern Fällen gelte diejenige Spannungsverteilung als gefährlich, welche die bei der Isolationsprüfung herrschende Beanspruchung übertrifft. Für den Grad der Gefährlichkeit, der Dauer oder der Häufigkeit, die ja gewöhnlich keine beträchtlichen Werte annehmen, lassen sich heute noch keine allgemein gültigen Angaben machen.

Bei Anlagen für Betriebsspannungen unter 1000 V, deren Material zurzeit mit einer Spannung von mindestens 1500 V¹⁾ geprüft wird, bei denen aber mit der Zeit eine unkontrollierbare Abnahme der Isolationsfestigkeit stattfindet, können schon Ueberspannungen, die wesentlich niedriger als 75 % der Prüfspannung liegen, mit Rücksicht auf die Gefährdung von Personen bedenklich werden.

Einteilung
der Ueber-
spannungen.

2. Die Ueberspannungen, welche gefährliche Werte annehmen können, lassen sich wie folgt klassifizieren:

- a) Ueberspannungen des aussetzenden Erdschlusses,
- b) Ueberspannungen atmosphärischen Ursprungs,
- c) Schaltueberspannungen,
- d) Resonanzueberspannungen mit Betriebs- oder Oberwellenfrequenz,
- e) Resonanzueberspannungen der Entladewellen bei Erd- oder Kurzschlüssen,
- f) Kapazitiv übertragene Ueberspannungen,
- g) Direkter Spannungsübertritt,
- h) Kombinierte Ueberspannungen.

Die Ueber-
spannungen des
aussetzenden
Erdschlusses.

3. Ein aussetzender Erdschluss liegt vor, wenn der Erdschluss einen Lichtbogen aufweist, der innert jeder Halbperiode löscht und wieder zündet. Beim Löschen dieses Lichtbogens werden Gleichspannungen abgetrennt, die infolge der durch den Erdschluss bedingten Unsymmetrie entstehen und sich der Phasenspannung überlagern. Die dadurch geschaffenen Ueberspannungen veranlassen die Rückzündung, wobei, wie beim Löschen, Sprungwellen ausgelöst werden.

Ueber-
spannungen
atmosphärischen
Ursprungs.

4. Das luftelektrische Feld induziert in der Seriekapazität, gebildet aus den Elektroden: einerseits Wolke – Freileitung, andererseits Freileitung – Erde, Teilspannungen, die für das Netz unzulässig gross werden können (langsame statische Ladungen). Durch momentane Aenderungen des luftelektrischen Feldes während Gewittern („indirekte“ Blitzschläge) werden Ladungen frei und verursachen Ueberschläge nach Erde und damit Sprungwellen von gefährlicher Höhe. Ferner können Blitzschläge die Anlage treffen („direkte“ Blitzschläge), sie sind aber seltener.

Schalt-
ueberspannungen.

5. Beim Ausschalten leerlaufender Transformatoren können Unterbrechungsueberspannungen entstehen. Allgemein entstehen bei den meisten Ein- und Ausschaltvorgängen Sprungwellen, deren Höhe aber meistens ungefährlich ist.

¹⁾ Anlässlich der bevorstehenden Normalisierung der Prüfvorschriften für Niederspannungsmaterial wird die Prüfspannung festgesetzt werden.

6. Resonanzüberspannungen mit Betriebsfrequenz entstehen hauptsächlich bei „verkehrtem“ Erdschluss²⁾ und wenn Sicherungen bezw. die Zuleitungen von Erdungsdrosselspulen und Spannungswandlern nicht gleichzeitig abgetrennt werden.

Resonanzüberspannungen mit Betriebs- oder Oberwellenfrequenz.

Resonanzüberspannungen mit Oberwellenfrequenz treten auf in Netzen mit zu stark gesättigten Transformatoren oder in solchen mit Generatoren, deren Kurvenform verhältnismässig stark von der Sinusform abweicht.

7. Resonanzüberspannungen der Entladewellen entstehen bei Erd- und Kurzschlüssen im Netz, wenn die Frequenz der dabei auftretenden Entladewellen annähernd gleich ist der Eigenfrequenz von Schwingungskreisen, gebildet aus Induktivitäten, wie Relais und Stromwandler mit dahinter liegenden Kapazitäten, wie Sammelschienenanteilen usw.

Resonanzüberspannungen der Entladewellen.

8. Die bei vorübergehender oder dauernder Erdung eines Netzes (Erdschluss bezw. Bahnnetz) entstehende Unsymmetriespannung induziert in der Seriekapazität, gebildet aus den Elektroden: einerseits Oberspannungswicklung – Unterspannungswicklung eines Transformators samt angeschlossener Leitung, andererseits Unterspannungswicklung – Erde, Teilspannungen, wobei die Teilspannung zwischen Unterspannungswicklung und Erde unzulässig gross werden kann. Kapazitiv übertragene Ueberspannungen treten weiterhin auf in parallel geführten, voneinander isolierten Leitungen.

Kapazitiv übertragene Ueberspannungen.

9. Der direkte Spannungsübertritt wird durch eine leitende Verbindung zwischen Ober- und Unterspannungsanlageteilen gebildet, z. B. verursacht durch Spannungsdurchschlag an Transformatoren, bei Lichtbogenüberschlag zwischen Anlageteilen verschiedener Betriebsspannungen, bei direktem Kontakt, bei Erdschluss auf der Oberspannungsseite von Transformatorstationen unter gewissen Voraussetzungen, wenn die Schutzerdung der Station hohen Erdwiderstand aufweist (siehe Einleitung S. 310).

Direkter Spannungsübertritt.

10. Die in den Anlagen auftretende kombinierte Ueberspannung ist das Schlussglied mehrfacher Verkettungen von Störungsursachen, wie sie unter 3 ÷ 9 behandelt wurden.

Kombinierte Ueberspannungen.

II. Methoden der Schutzmassnahmen.

a) Isolation der Anlage.

11. Die Isolation der Maschinen, Transformatoren und Apparate soll der Spannungsprüfung, diejenige der Transformatorenwicklungen für Betriebsspannungen über 3000 V ausserdem der Sprungwellenprüfung und der Windungsprüfung unterzogen werden, die nach besondern Normalien vorgenommen werden sollen; die Isolation soll diesen Prüfungen unter allen Umständen genügen.³⁾

Isolationsfestigkeit von Maschinen, Transformatoren und Apparaten.

12. Die Einführungsisolatoren von Transformatoren, Transformatorcabinen, Apparaten (Oelschalter, Kabelendverschlüsse usw.) sollen unter Berücksichtigung der möglichen Ueberanstrengungen in ihrem Aufbau den Prinzipien der modernen elektrischen Festigkeitslehre entsprechen, derart, dass nicht infolge mangelhafter Konstruktion in elektrischer Hinsicht durch sie eine neue Störungsquelle geschaffen wird. Insbesondere ist zu fordern, dass die Durchschlagsspannung wesentlich höher sei als die Ueberschlagsspannung. In Durchführungen sollen bei der höchsten Betriebsspannung keine Glimmentladungen auftreten.

Isolationsfestigkeit von Einführungsisolatoren.

13. Stütz- und Tragisolatoren sind derart auf elektrische Festigkeit zu bemessen, dass ihre Durchschlagsspannung grösser ist, als die Ueberschlagsspannung des trockenen und sauberen Isolators. Isolatoren an vereinzelt Eisenmasten, Freileitungsschaltern, u. dgl. im Zuge von Leitungen mit Holzmasten sollen höhere elektrische Festigkeit aufweisen als die übrigen Isolatoren der betreffenden Freileitung.

Isolationsfestigkeit von Stütz- und Tragisolatoren.

14. Die Isolation der Kabel, die in Anlagen mit nicht direkt geerdetem Nullpunkt verlegt werden, soll einer besonders scharfen Spannungsprobe unterzogen werden.

Isolationsfestigkeit von Kabeln.

²⁾ Siehe Einleitung Fig. 10, Seite 311.

³⁾ Siehe Bulletin S. E. V. 1923, Heft 3, Seite 187 u. ff.

Isolationsfestigkeit von Anlagen.

15. Die Isolationsfestigkeit von Anlagen mit Freileitungsnetzen über 1000 V soll kurzzeitigen Beanspruchungen gegenüber möglichst *einheitlich* sein. Damit können zwar bei indirekten Blitzschlägen Leitungsüberschläge nicht vermieden werden, wohl aber die Ueberschläge in Stationen, indem dieselben von der Ueberspannung zeitlich später betroffen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass feste und besonders flüssige Isolierstoffe von gleicher elektrischer Dauerfestigkeit, d. h. bei Dauerprüfung, eine wesentlich höhere momentane elektrische Festigkeit besitzen als Luft.

b) Vorbeugungsmassnahmen.

Allgemeine Angaben.

16. Die erste und vornehmste Lösung des praktischen Ueberspannungsschutzes liegt in den vorbeugenden Massnahmen gegen das Auftreten primärer Störungserscheinungen und den Vorkehrungen gegen die Verkettung weiterer Ueberspannungsmöglichkeiten mit der primären Ueberspannung. Die Aufstellung eigentlicher Schutzapparate ist nur dann gerechtfertigt, wenn die vorbeugenden Massnahmen keine hinreichende Sicherheit gewähren.

Massnahmen gegen atmosphärische Ueberspannungen.

17. Atmosphärische Ueberspannungen bei Freileitungen lassen sich nicht vermeiden. Jedoch kann die Höhe der Ueberspannungen durch ein Erdseil verringert werden. Der grösseren Isolationsfestigkeit wegen, die Freileitungen mit Holzmasten gegenüber solchen mit Eisenmasten besitzen, empfiehlt sich die Anwendung eines Erdseiles nur für letztere. Metallringe oder -bügel an Isolatoren schützen die letzteren vor Zertrümmerung und die Leiter vor dem Durchschmelzen durch den Lichtbogen. Der Einbau derselben ist besonders an durch Gewitter gefährdeten Stellen und an vereinzelt stehenden Eisenmasten empfehlenswert.

Massnahmen gegen Schaltüberspannungen.

18. Die durch betriebsmässige Schalteroperationen bedingten Ueberspannungen und Stromstösse können durch Verwendung von Vorkontaktwiderständen unterdrückt werden. Im allgemeinen sind dieselben bei Leitungsschaltern unnötig. Für Transformatoren, welche betriebsmässig im Leerlauf geschaltet werden, sind jedoch Vorkontaktwiderstände, für Spannungen von 40 kV an, je nach Leistung und Eisensättigung anzuwenden. Dieselben sind auf derjenigen Seite des Transformators vorzusehen, von der aus die betriebsmässige Schaltung erfolgt. Ebenso sind Vorkontaktwiderstände anzuwenden für Transformatoren, deren Einschaltstromstoss den mehrfachen Betrag des Nennstromes erreicht.

Massnahmen gegen Resonanzüberspannung.

19. Der Ausbildung von Resonanzüberspannungen, die durch Oberwellen angeregt werden können, wird durch eine sinusförmige Spannungskurve der Generatoren und durch Vermeidung allzu hoher Eisensättigung in Transformatoren vorgebeugt. Das Auftreten von Resonanzüberspannungen bei Betriebsfrequenz wird durch folgende Massnahmen vermieden: Schalter sind allpolig anzuordnen und zu bedienen. Trennmesser von Erdungsdrosselspulen, welche unter Spannung ein- und ausgeschaltet werden, sind in Anlagen über 40 kV Spannung zu kuppeln. Sicherungen an Erdungsdrosselspulen sind wegzulassen. Trennmesser und Sicherungen von Spannungswandlern sind so nahe am Wandler anzuordnen als es die gefahrlose und bequeme Bedienung der Anlage erlaubt. Trennmesser brauchen dann nicht gekuppelt zu werden. Das einpolige Zu- und Abschalten grösserer Anlageteile unter Spannung mittels Trennmessern ist von 40 kV an zu vermeiden. Der Einbau von Dämpfungswiderständen in die Schwingungskreise verhindert die Ausbildung der Resonanz. In Anlagen über 1000 V sind daher im Zuge der Leitung liegende Induktivitäten (Stromwandler, Relaispulen usw.) durch Parallelwiderstände zu überbrücken.

Massnahmen gegen kapazitive Uebertragung von Oberspannung.

20. Zur Vermeidung einer gefährlichen kapazitiven Uebertragung von Oberspannung auf Unterspannung sind bei Strom- und Spannungswandlern die Unterspannungsseiten an Erde zu legen und alle Anlagen unter 1000 V, soweit sie nicht dauernd geerdet sind, mit Durchschlagssicherungen zu versehen. Im übrigen ist die kapazitive Spannungsübertragung nur in besonderen, seltenen Fällen gefährlich und kann alsdann durch Vergrösserung der Kapazität der Unterspannungsseite (Anwendung von Kabeln oder Kondensatoren) reduziert werden.

Bei parallel geführten Leitungen verschiedener Spannung, bei denen durch kapazitive Uebertragung gefährliche Ueberspannungen auftreten, empfiehlt sich die teilweise Verlegung der einen Leitung oder die Nullpunktserdung der Leitung niedrigerer Spannung.⁴⁾ Bei Betriebsarbeiten an einer Leitung ist die abgeschaltete Strecke zur Vermeidung kapazitiv übertragener Spannungen allpolig und beidseitig zu erden.

21. Zur Vermeidung des direkten Uebertrittes von Oberspannung auf die Unterspannungsseite sind Gestelle, Transformatoreisen usw. sachgemäss an Erde zu legen und die stromführenden Leitungen getrennter Anlageteile möglichst weit voneinander zu entfernen. Dazu gehört auch die besonders sorgfältige Ausführung von Leitungskreuzungen und die sachgemässe Ausführung der Erdung der Gestelle und der Durchschlagssicherungen oder des Nullpunktes in Netzen mit Spannungen unter 1000 V⁵⁾.

Massnahmen
gegen den
direkten
Spannungs-
übertritt.

c) Wahl der Schutzmittel gegen entstandene Ueberspannungen.

22. Ein reines Freileitungsnetz von mindestens 1000 V Spannung bedarf zur Verhinderung der gefährlichen Ueberspannungen des aussetzenden Erdschlusses und der schädlichen Folgen seines Lichtbogens besonderer Schutzmittel, sobald der Erdschlussstrom dieses Netzes etwa $1,5 \frac{\text{Frequenz}}{50}$ Ampere übertrifft; dies entspricht ungefähr einer Ausdehnung des metallisch zusammenhängenden Netzes in km von $\frac{600}{\text{verkettete Spannung (in kV)}}$.

Erdschluss in
Freileitungs-
netzen.

Als Schutzmittel ist besonders die Löschspule zu empfehlen. Sie unterdrückt die Ueberspannungen, löscht den Lichtbogen und verhindert damit die Betriebsunterbrechung. Von 80 kV Spannung an ist als Schutzmittel im allgemeinen eine direkte Erdung des Nullpunktes vorzuziehen, weil bei dem erfahrungsgemäss seltenen Auftreten der Erdschlüsse in Anlagen von so hoher Spannung die Wirkung der Löschspule an Bedeutung verliert und weil die Verwendung der direkten Nullpunktserdung eine Herabsetzung der Prüfspannung wichtiger Anlageteile erlaubt, was bei diesen Spannungen von wirtschaftlicher Bedeutung ist.⁶⁾

23. Ein reines Kabelnetz von mindestens 1000 Volt Spannung bedarf zur Verhinderung der gefährlichen Ueberspannungen des aussetzenden Erdschlusses und der schädlichen Folgen seines Lichtbogens besonderer Schutzmittel, sobald der Erdschlussstrom dieses Netzes etwa $1,5 \frac{\text{Frequenz}}{50}$ Ampere übertrifft; dies entspricht bei Kabelnetzen einer metallisch zusammenhängenden Ausdehnung in km von etwa $\frac{10}{\text{verkettete Spannung (in kV)}}$. Als Schutzmittel ist besonders die direkte Nullpunktserdung zu empfehlen. Diese wird durch eine niederohmige Nullpunktserdung ersetzt, wenn im Erdschlussfalle, nach Massgabe von Spannung und Kurzschlussleistung des Netzes, die direkte Erdung einen unzulässig grossen Kurzschlussstrom ergibt.

Erdschluss in
Kabelnetzen.

Die Anwendung der Löschspule ist in reinen Kabelnetzen nicht empfehlenswert, weil die Löschwirkung zufolge der Art des Isoliermaterials ausser Betracht fällt und weil im Erdschlussfall die Abschaltung des kranken Kabelstückes wünschenswert ist.

24. Ein aus Freileitungen und Kabeln bestehendes Netz (gemischtes Netz) von mindestens 1000 Volt Spannung bedarf zur Verhinderung der gefährlichen Ueberspannungen des aussetzenden Erdschlusses und der schädlichen Folgen seines Lichtbogens besonderer Schutzmittel, sobald der Erdschlussstrom dieses Netzes etwa $1,5 \frac{\text{Frequenz}}{50}$ Ampere übertrifft. Dies entspricht einer Länge des metallisch zusammenhängenden Netzes, die nach den, in den Ziffern 22 und 23, gemachten Angaben jeweils berechnet werden kann. Die anzuwendenden Schutzmittel sind im allge-

Erdschluss in
gemischten
Netzen.

⁴⁾ Weitere Massnahmen siehe Einleitung Seite 309.

⁵⁾ Siehe auch Einleitung Seite 310.

⁶⁾ Unter den in der Einleitung, Seiten 303 und 304, erläuterten Voraussetzungen kann der Schutz gegen Erdschlüsse auch durch richtig gebaute (siehe Einleitung Seiten 304 und 307) und in genügender Anzahl angeschlossene Funkenableiter bewirkt werden.

meinen dieselben wie für reine Freileitungsnetze, ausgenommen im Fall starken Ueberwiegens der Kabellänge.

Anordnung und
Schaltung der
unter 22 bis 24
genannten
Schutzmittel

25. Die in den Ziffern 22 ÷ 24 behandelten Erdungen über induktive oder induktionslose Widerstände bzw. Anschlüsse müssen folgenden Bedingungen entsprechen: Anzahl und Aufstellungsort der Löschspulen sind so zu wählen, dass bei den normal vorkommenden Betriebsverhältnissen jeder Netzteil geschützt ist.

Bei direkter Nullpunktserdung sind möglichst viele Transformatoren zu erden, ⁷⁾ wobei die Freileitungen von Anlagen mit grossem Kurzschlussstrom, mit Rücksicht auf die Gefährdung von Personen, Erdseile besitzen müssen. Die geerdeten Transformatoren müssen Stern-Dreieck- oder eine äquivalente Schaltung besitzen. Bei Anlagen über 80 kV müssen in solchen Netzen die Phasenleitungen nach den in der Einleitung vorgebrachten Gesichtspunkten verdrillt werden. ⁸⁾ Widerstände, die zur Nullpunktserdung verwendet werden, müssen den Kurzschlussstrom der Anlage mindestens während $\frac{1}{2}$ Minute aushalten, wobei sie so zu bemessen sind, dass eine sichere Auslösung der Ueberstromrelais erfolgt. Bei Anwendung von Nullpunktserdungen (direkt oder über Widerstände) in Netzen mit Freileitungen ist der Vermeidung von Personengefährdung besondere Aufmerksamkeit zu schenken; insbesondere sollen Erdseile an Eisenmasten Verwendung finden, falls für diese nicht besonders ausgiebige Erdung vorhanden ist.

Für solche Erdungskreise werden Signalanlagen und registrierende Ampere-meter zur Anzeige und Aufzeichnung von Erdschlüssen empfohlen.

Langsame
atmosphärische
Ladungen.

26. In Netzen von mindestens 1000 Volt Spannung, die weder Löschspulen noch Nullpunktserdung besitzen, sollen zur Ableitung der durch das luftelektrische Feld erzeugten statischen Ladungen Erdungsdrosselspulen oder Wasserstrahler an die Sammelschienen angeschlossen werden. Es empfiehlt sich, die Erdungsdrosselspulen mit Sekundärwicklungen zu versehen und an diese Voltmeter und Signaleinrichtung anzuschliessen zwecks Anzeige und allfälliger Registrierung von Erdschlüssen.

In Netzen mit Spannungen unter 1000 Volt, welche keine Nullpunktserdung besitzen, übernimmt die in Ziffer 20 empfohlene Durchschlagssicherung die Ableitung statischer Ladungen. Der Nullpunktserdung ist jedoch der Vorzug zu geben.

Indirekte
Blitzschläge.

27. Die Gefährlichkeit von Ueberspannungen atmosphärischen Ursprunges kann in ihrer Wirkung gegenüber Anlageteilen ausser Oel, sofern diese der in Ziffer 15 geforderten einheitlichen Isolationsfestigkeit der ganzen Anlage nicht entsprechen, in gewissen Fällen durch sogenannte Funkenableiter herabgesetzt werden. Dies trifft besonders zu für Lufttransformatoren, Generatoren und Hochspannungsmotoren, sowie für alle Anlagen unter 1000 Volt Betriebsspannung. Solche Funkenableiter können aber nur ihren Zweck erfüllen, sofern ihr Widerstand kleiner ist als der Wellenwiderstand einer Freileitung, d. h. kleiner als rund 600 Ohm, und wenn sie wiederholtes und andauerndes Ansprechen ohne Schaden aushalten.

Sprungwellen.

28. Die steile Front von Sprungwellen, die zu Ueberspannungen zwischen den Windungen von Wicklungen führt, kann durch konzentrierte Kapazitäten, beziehungsweise konzentrierte Induktivitäten vor den Wicklungen abgeflacht werden. Bei Generatoren und Motoren, für welche die Herstellung sprungwellensicherer Wicklungen Schwierigkeiten bereitet, sind vorgeschaltete Kabelstücke, Kondensatoren, beziehungsweise Drosselspulen, deren Kapazität, beziehungsweise Induktivität jedoch nicht allgemein angegeben werden können, zu empfehlen. Da durch Induktivitäten lokale Schwingungskreise geschaffen werden können, ist dabei stets auf die Dämpfung dieser Kreise zu achten.

III. Nutzenwendungen.

29. Die nachfolgende Tabelle zeigt für jede praktisch vorkommende Netzart für Wechselstromanlagen die Mittel zur Bekämpfung der am Kopfe jeder Horizontalreihe angegebenen Ueberspannung, mit Ausnahme der kombinierten Ueberspannungen, für welche die Massnahmen für die Elemente, aus denen solche Ueberspannungen bestehen, kombiniert gelten.

⁷⁾ Der Einfluss vieler Erdungen auf Schwachstromleitungen ist allerdings noch nicht abgeklärt.

⁸⁾ Siehe Einleitung Seite 309.

Uebersicht über die zu verwendenden Schutzmittel für Wechselstromanlagen.

Art der Ueber- spannungen		Netze unter 1000 V		Netze über 1000 V		
		Freileitung	Kabel	Freileitung	Kabel	Gemischte Netze
Ueberspannungen des aussetzenden Erdschlusses.		Ungefährlich, kein Schutz notwendig.	Ungefährlich, kein Schutz notwendig.	Für Netze mit mehr als $1,5 \frac{\text{Frequenz}}{50}$ A Erdschlussstrom Löschspulen, über 80 kV direkte Nullpunktserdung. Siehe Ziffern 22 und 25.	Für Netze mit mehr als $1,5 \frac{\text{Frequenz}}{50}$ A Erdschlussstrom Nullpunktserdung, direkt oder wo dadurch unzulässig grosse Kurzschlussströme entstehen über niederohmigen Widerstand. Siehe Ziffer 23.	Je nach Überwiegen der Leitungsart Löschspulen oder Nullpunktserdung. Siehe Ziffern 14, 24 u. 25.
Ueberspannungen atmosphär. Ursprungs.	Langsame stat. Ladung.	Nullpunktserdung, in ungeerdeten Netzen Durchschlags-sicherungen.	Kommen hier nicht vor.	Nullpunktserdung jedes betriebsmässig getrennten Netzteiles, Löschspulen, besondere Erdungsdrosselspulen oder Wasserstrahlerder. Siehe Ziffer 22.	Kommen hier nicht vor.	Wie unter Freileitungsnetz.
	Indirekte Blitzschläge.	Ableiter empfohlen für Erzeugungs- und Unterstationen.		Möglichst einheitliche Isolationsfestigkeit für Stationen und Freileitungen. Möglichst grosse Sprungwellenfestigkeit von Wicklungen. Ueberbrückung von Stromwandlern und direkt eingebauten Relais. Bei Eisenmasten Erdseil. Schutzringe oder Bügel bei Freileitungsisolatoren an exponierten Punkten. Direkt an Freileitungen angeschlossenen Generatoren, Hochspannungsmotoren und Lufttransformatoren sind Kabel (Kondensatoren) oder Drosselspulen vorzuschalten, eventuell sind Funkenableiter vorzusehen. Siehe Ziffern 11 ÷ 13, 15, 17, 19, 26 ÷ 28.		Freileitungen wie nebstehend.
Schaltüberspannungen.		Ungefährlich	Ungefährlich.	Für Transformatorenschalter, mit welchen betriebsmässig leerlaufende oder schwach belastete Transformatoren über 40 kV geschaltet werden, sind Vorkontaktwiderstände empfohlen, ebenso für Transformatoren, deren Einschaltstromstoss ein Mehrfaches des Normalstromes beträgt. Siehe Ziffer 18.		
Resonanzüberspannungen mit Betriebs- oder Oberwellenfrequenz.		Ungefährlich	Ungefährlich.	In Anlagen bis ca. 40 kV ungefährlich. In Anlagen über 40 kV Verwendung von Generatoren mit möglichst sinusförmiger Kurve sowie allpolig gekuppelter Schalter. Trennmesser sind bei Erdungsdrosselspulen, welche unter Spannung geschaltet werden, zu kuppeln. Weglassen von Sicherungen bei Erdungsdrosselspulen. Anordnung der Trennmesser für Spannungswandler mögl. nahe an den Wandlern (dann nicht zu kuppeln). Siehe Ziffern 19 und 28.		
Resonanzüberspannungen der Entladewellen bei Erd- und Kurzschlüssen.		Ungefährlich	Ungefährlich.	Ueberbrückung von Relais und Stromwandlern. Siehe Ziffer 19 und 28.		
Kapazitiv übertragene Ueberspannungen.		Nullpunktserdung oder Durchschlags-sicherung. Sorgfältige Ausführung von Leitungskreuzungen und der Erdung in Transformatorstationen. Siehe Ziff. 20 und 21.		Erdung der Unterspannung aller Messwandler, sonst nur in Spezialfällen gefährlich. Abhilfe: Nullpunktserdung oder Polderdung der Unterspannung wo zulässig, oder Vergrösserung der Erdkapazität der Unterspannungsseite, z. B. durch Verwendung von Kabeln in der Schaltanlage. Siehe Ziffer 21.		
Direkter Spannungsübertritt.				In Transformatorstationen sorgfältige Erdung aller Transformatorenkessel, Traggestelle und Schalter. Sorgfältige Ausführung von Leitungskreuzungen. Siehe Ziffer 21.		

Literaturverzeichnis.

Das Zitieren einer Veröffentlichung in nachstehendem Verzeichnis, das keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt, bedeutet nicht, dass die Kommission mit allen in derselben entwickelten Anschauungen einverstanden ist, es soll lediglich demjenigen, der sich weiter in die Materie vertiefen will, das Aufsuchen erleichtern.

Wanderwellen.

- Electromagnetic theory*, by O. Heaviside, 1894; 2. Auflage 1922.
Elektromagnetische Ausgleichsvorgänge in Freileitungen und Kabeln, von K. W. Wagner, 1908.
Elektromagnetische Ausgleichsvorgänge in Freileitungen und Kabeln (eine experimentelle Untersuchung), von K. W. Wagner, Elektrotechnische Zeitschrift, 1911, Seite 899, 928, 947.
Hochspannungstechnik, von W. Petersen, 1911.
Wanderwellen als Ueberspannungserreger, von W. Petersen, Archiv für Elektrotechnik, 1912, Seite 233.
Stationäre Zustände und Zustandsänderungen in elektrischen Stromkreisen, von Landry, Bulletin des S. E. V., 1914, Seite 33, 77, 125, 225.
Ueber Wasserstoss und Ueberspannung, von W. Kummer, Bulletin des S. E. V., 1914, Seite 103.
Grundzüge des Ueberspannungsschutzes in Theorie und Praxis, von K. Kuhlmann, Bulletin des S. E. V., 1914, Seite 142.
Das Eindringen einer elektromagnetischen Welle in eine Spule mit Windungskapazität, von K. W. Wagner, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1915, Seite 89, 105.
Messungen über die Form der Stirn von Wanderwellen, von L. Binder, Elektrotechnische Zeitschrift, 1915, Seite 241, 259, 273.
Elektrische Schwingungen in Maschinenwicklungen, von J. Biermanns, Archiv für Elektrotechnik, 1916, Seite 211.
Eine Erweiterung des Reflexionsgesetzes für Wanderwellen, von W. Rogowski, Archiv für Elektrotechnik, 1916, Seite 204.
Elektromagnetische Wellen in Spulen mit Windungskapazität, von M. Sieghahn, Archiv für Elektrotechnik, 1916, Seite 305.
Das Eindringen von Spannungswellen in Maschinenwicklungen, von M. Vidmar, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1916, Seite 573, 590, 601.
Beanspruchung und Schutzwirkung von Spulen bei schnellen Ausgleichsvorgängen, von K. W. Wagner, Elektrotechnische Zeitschrift, 1916, Seite 425, 440, 456.
Rechnerische und experimentelle Untersuchungen der Einwirkung von Wanderwellen-Schwingungen auf Transformatorwicklungen, von O. Böhm, Archiv für Elektrotechnik, 1917, Seite 383.
Ueber Wanderwellen-Schutzeinrichtungen, von J. Biermanns, Archiv für Elektrotechnik, 1917, Seite 215.
Wanderwellen-Schwingungen in Transformatorwicklungen, von K. W. Wagner, Archiv für Elektrotechnik, 1918, Seite 301.
Beiträge zur Frage der Schutzwirkung von Drosselspulen, von O. Böhm, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1918, Seite 377, 392.
Die Spule als Spannungsschutz, von W. Rogowski, Archiv für Elektrotechnik, 1919, Seite 159.
Ueberspannungen und Eigenfrequenzen einer Spule, von W. Rogowski, Archiv für Elektrotechnik, 1919, Seite 240.
Spulen und Wanderwellen, von W. Rogowski, Archiv für Elektrotechnik, 1919, Seite 320.
Abnormal voltages within transformers, by L. Blume and A. Boyajian, Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, 1919, pag. 211.
Die stationären Schwingungen der Wechselstrom gespeisten Spule, von O. Böhm, Archiv für Elektrotechnik, 1920, Seite 341.
Ueber Sprungwellenbeanspruchung von Transformatoren, von G. Courvoisier, Bulletin S. E. V., 1922, Seite 437.
Ableitung und Wanderwellen, von C. Breiffeld, Bulletin S. E. V. 1923, Seite 83.

Schaltvorgänge.

- Die Ausschaltvorgänge in Gleich- und Wechselstromkreisen*, von A. G. Collis, Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen, 1911, Heft 14.
Electric line oscillations, by G. Faccioli, Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, 1911, pag. 1803.
Ueber Einschaltvorgänge bei elektrischen Maschinen und Apparaten, von W. Linke, Archiv für Elektrotechnik, 1912, Seite 16, 69.
Ueberspannungserscheinungen bei Schaltvorgängen, von W. Linke, Archiv für Elektrotechnik, 1912, Seite 163.
Phénomènes à haute tension consécutifs à la rupture d'un circuit, par G. Faccioli, Revue Electrique, 1912, Bd. I, pag. 554.
Rückzündüberspannungen, von W. Petersen, Elektrotechnische Zeitschrift, 1914, Seite 697.
Schaltvorgänge bei elektrischen Maschinen und Transformatoren, von W. Linke, Elektrotechnische Zeitschrift, 1914, Seite 757, 793, 953, 965.
Ueberspannungen beim Abschalten von Asynchronmotoren, von R. Rüdberg, Elektrotechnische Zeitschrift, 1915, Seite 169.

Erdschluss.

- La mise à la terre du point neutre des réseaux à courant triphase dans les mines*, par Wellesley-Wood, *Revue Electrique*, 1910, Bd. II, pag. 97.
- Protection of electrical transmission lines*, by E. Creighton, *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, 1911, pag. 257.
- Surtensions dûs aux ondes mobiles créées par les manœuvres d'interrupteurs et les arcs à la terre*, par R. Swyngedauw, *Revue Electrique*, 1914, Bd. II, pag. 217, 222.
- Die Erdung des neutralen Punktes in Drehstromanlagen*, von M. Voigt, *Bulletin des S.E.V.*, 1915, Seite 49.
- Résultats d'expériences sur la mise à la terre du point neutre dans les lignes de transmission à haute tension*, par Thomas (Percy H.), *Revue Générale d'Electricité*, 1916, Bd. 26, pag. 235.
- Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss*, von W. Petersen, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1917, Seite 553, 564.
- Courants de capacité et mises à la terre de protection sur les lignes à haute tension et à longue portée*, par H. Behrend, *Revue Générale d'Electricité*, 1917, Bd. II, pag. 625.
- Unterdrückung des aussetzenden Erdschlusses durch Nullwiderstände und Funkenableiter*, von W. Petersen, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1918, Seite 341.
- Beseitigung von Freileitungsstörungen durch Unterdrückung des Erdschlussstromes und -lichtbogens*, von W. Petersen, *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 1918, Seite 297.
- Die Begrenzung des Erdschlussstromes und die Unterdrückung des Erdschlusslichtbogens durch die Erdschlusspule*, von W. Petersen, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1919, Seite 5, 17.
- Prevenzioni dei disturbi di linea mediante la soppressione degli archi verso terra*, di W. Petersen, *Elettrotecnica*, 1919, Bd. VI, pag. 324.
- Ueber den Schutz von Hochspannungsnetzen mit unsymmetrisch auf die Netzleitungen verteilter Teilkapazität gegen Erde*, von J. Jonas, *Elektrotechnik und Maschinenbau*, 1920, Seite 453.
- Sovratensione elettriche e sistemi di protezione norme per l'applicazione del dispositivo Petersen*, di L. Lombardi, *Elettrotecnica*, 1920, Bd. XII, pag. 439—486.
- Note sur la mise à la terre des machines et installations électriques*, par Jacques Damien, *Revue Générale d'Electricité*, 1920, Band VII, pag. 130.
- Problemi relativi all' impianto della reattanze di protezione (sistema Petersen)*, di Vallauri, *Elettrotecnica*, 1920, pag. 342.
- La protezione degli impianti elettrici colla bobina induzione di Petersen*, di Palestrino, *Elettrotecnica*, 1920, pag. 342.
- Voltages and current harmonics caused by corona*, by F. Peek, *Journal of the American Institute of Electrical Engineers*, 1921, Seite 455.
- Inductive interference between electric power and communication circuits*; Arbeit der Eisenbahnverwaltung des Staates Kalifornien, auszugsweise in der *Elektrotechnischen Zeitschrift*, 1921, Seite 1261.
- Protezione contro i contatti a terra*, di A. Roth, *Elettrotecnica*, 1921, Bd. VIII, pag. 647.
- Mise à la terre des phases par bobines de réactance pour la protection contre les décharges à la terre et surtensions qui en résultent*, par R. Bauch, *Revue Générale d'Electricité*, 1921, Bd. X, pag. 439.
- Sur les accidents de la mise à la masse dans les réseaux à courants alternatifs et les moyens de protection*, par J. Perret, *Revue Générale d'Electricité*, 1921, Bd. IX, pag. 107.
- Dispositif pour la protection des réseaux contre les terres intermittentes*, par W. Petersen, *Revue Générale d'Electricité*, 1921, Bd. IX, pag. 100.
- La bobine de mise à la terre de Petersen*, par Rn. Conwell and Evans, *Revue Générale d'Electricité*, 1922, Bd. XII, pag. 187.
- Sur la mise à terre du neutre d'un réseau triphasé*, par Ch. Ledoux et M., Kœchlin *Revue Générale d'Electricité*, 1922, Bd. XII, pag. 685.
- Essai d'une bobine d'extinction des courts-circuits à la terre*, par A. Roth et G. Courvoisier, *Revue Générale d'Electricité*, 1922, Bd. XII, pag. 402.
- La bobina di Petersen*, di Rn. Conwell and Rd. Evans, *Elettrotecnica*, 1922, Bd. IX, pag. 321.
- La bobina di Petersen e la terra diretta dei neutri*, di A. Incontre, *Elettrotecnica*, 1922, Bd. IX, pag. 748.

Vorgänge atmosphärischen Ursprunges.

- Protezione delle condutture aeree dalle sovra elevazioni di tensione indotte da scariche atmosferiche*, di M. Pizzuti, *Atti della Associazione Elettrotecnica Italiana*, 1910, Bd. XIV, pag. 501.
- Protezione delle condutture aeree*, di M. Pizzuti e E. C. Ferrari, *Atti della Associazione Elettrotecnica Italiana*, 1910, Bd. XIV, pag. 495.
- Protezione delle condutture aeree dalle sovra elevazioni di tensione*, di M. Pizzuti, *Atti della Associazione Elettrotecnica Italiana*, Bd. XIV, pag. 713, 1910.
- La protection contre les surtensions des isolateurs aériens et en particulier des isolateurs à suspensions*, par W. Weicker, *Revue Electrique*, 1911, Bd. II, pag. 568.
- Investigation of the electrical state of the upper atmosphere*, *The Electrician*, 1911, pag. 742, by A. Makower, W. Gregory and H. Robinson.
- Effets sur les lignes aériennes des phénomènes électriques atmosphériques*, par Addendorf, *Revue Electrique*, 1912, Bd. I, pag. 264.

- Sur les effets des phénomènes électriques atmosphériques dans les lignes aériennes*, par G. P. Capart, Revue Electrique, 1912, Bd. I, pag. 426, 440.
- Sur la protection des lignes aériennes*, par Creighton, Revue Electrique, 1912, Bd. I, pag. 386, 398, 555.
- Die atmosphärischen Erscheinungen und die Störungen, welche durch dieselben in den elektrischen Verteilungsnetzen hervorgerufen werden*, von G. Capart, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1913, Seite 782.
- Quelques cas de surtensions d'origine atmosphériques dans un grand réseau aérien*, von A. Wæber, Bulletin des S. E. V., 1914, Seite 149.
- Der Schutzwert von Blitzseilen*, von W. Petersen, Elektrotechnische Zeitschrift, 1914, Seite 1.
- Die Schirmwirkung des geerdeten Schutzseiles*, von E. Pfiffner, Elektrotechnik und Maschinenbau, 1914, Heft 13.
- Zum Ueberspannungsschutz in Sekundärnetzen*, von F. Ringwald, Bulletin des S. E. V., 1915, Seite 113.
- Quelques considérations sur les appareils de sécurité contres les surtensions dans les distributions des hautes tensions*, par Gierlich, Revue Electrique, 1913, Bd. XX, pag. 95.
- Les paratonnerres*, par Ach. Delamarre, Revue Générale d'Electricité, 1918, Bd. III, pag. 133.
- Les éclateurs des parafoudres; leur rôle dans la protection contre les tensions à front d'onde raide, ou tension de choc*, par Ch. Alcutt, Revue Générale d'Electricité, 1918, Bd. IV, pag. 1012.
- Protection des installations électriques contre les décharges atmosphériques et les surtensions*, par A. Hayet, Revue Général d'Electricité, 1920, Bd. VII, pag. 657.
- Notes sur la protections contre la foudre*, par Poirson, Revue Générale d'Electricité, 1921, Bd. X, pag. 943.
- Schutz gegen Ueberspannungen in Höchstspannungsanlagen*, von A. Roth, Bulletin des S. E. V., 1921, Seite 321.
- Undersökninger över det Luftelektriska fältet vid Askväder*, von H. Norinder, Tekniska Meddelanden fran Kungl. Vattenfallsstyrelsen, Serie E, Nr. 1, Stockholm 1921.

Induktion.

- Studies of protection and protective apparatus for electric railways*, by E. Creighton, S. Shavor and R. Clark, Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, 1912, pag. 851.
- Induktionswirkungen von Wanderwellen in Nachbarleitungen*, von K. W. Wagner, Elektrotechnische Zeitschrift, 1914, Seite 639, 677, 705.
- Di alcune possibilità di sottrarre telegrafi e telefoni all' influenza delle correnti vicine*, di G. Reveschi, Elettrotecnica, 1915, Bd. II, pag. 146.
- Neutralisation des actions perturbatrices apportées par des circuits extérieurs dans les transmissions électriques à faibles courant*, par J. Perret, Revue Générale d'Electricité, 1918, Bd. IV, pag. 281.
- Effets d'induction produit par le courant alternatif de traction sur les lignes téléphoniques et télégraphiques*, par N. S. Warren, Revue Générale d'Electricité, 1919, Bd. V, pag. 175.

Resonanz.

- Seibt*, Elektrotechnische Zeitschrift, 1905, Seite 25.
- Spannungserhöhung in elektrischen Netzen infolge Resonanz und freier elektrischer Schwingungen*, von Markowitsch, in Sammlung elektrotechnischer Vorträge, Heft 11/12, Stuttgart 1905.
- La risonanza in circuiti contenenti ferro*, di A. Diana, Atti della Associazione Elettrotecnica Italiana, 1911, Bd. V, pag. 15.
- La résonance de l'harmonique 3 dans les réseaux à courants triphasés*, par Swyngedauw, Revue Electrique, 1914, Bd. I, pag. 178.
- Ueberspannungsschutz bei Stromwandlern*, von H. Gewecke, Elektrotechnische Zeitschrift, 1914, Seite 386.
- Ueberspannungsschutz bei Stromwandlern*, von E. Wirz, Elektrotechnische Zeitschrift, 1915, Seite 450, 467.
- Ueberspannungen mit der Betriebsfrequenz bei Leitungsbrüchen und einpoligen Schaltvorgängen*, von W. Petersen, Elektrotechnische Zeitschrift, 1915, Seite 353, 366, 383.
- Ueberströme und Ueberspannungen in Netzen mit hohem Erdschlussstrom*, von W. Petersen, Elektrotechnische Zeitschrift, 1916, Seite 129, 148, 493, 512.
- Notes sur les surtensions produites par l'harmonie 3 et ses multiples dans les transformateurs triphasés*, par Jacques Damien, Revue Générale d'Electricité, 1917, Bd. II, pag. 363.
- Note sulle sovratensioni prodotte dalla terza armonica e suoi multipli nei trasformatori trifasi*, di J. Damien, Elettrotecnica, 1918, Bd. V, pag. 6.
- Resonance électrique dans un circuit dont la self-induction contient du fer*, par P. Boucherot, Revue Générale d'Electricité, 1920, Bd. VII, pag. 615.