

Die jüngsten Fortschritte in der Beurteilung und Bekämpfung von Ueberspannungen in elektrischen Anlagen

Autor(en): **Kummer, W.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **73/74 (1919)**

Heft 4

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-35659>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

INHALT: Die jüngsten Fortschritte in der Beurteilung und Bekämpfung von Ueberspannungen in elektrischen Anlagen. — Ideen-Wettbewerb für die Erweiterung der kantonalen Kranken-Anstalt Aarau. — Architekt und Bauherr. — Die neue Entwässerungs-Anlage in Codigoro. — Verband Schweiz. Baugenossenschaften. — Miscellanea: Die Ueberfliegung des Atlantischen Ozeans. Schweizer. Verein von Dampfkessel-Besitzern Eidgenössische Technische Hochschule. Der Ausbau der Isar-Wasserkräfte. Kraftwerk

Amsteg. — Nekrologie: Paul Choffat. Richard Kissling. — Konkurrenzen: Neubau der Thurgauischen Kantonalbank in Frauenfeld. Preisausschreiben zur Schaffung von Mittelstandsheimen in Zürich. — Vereinsnachrichten: St. Gallischer Ingenieur- und Architekten-Verein Gesellschaft ehemaliger Studierende der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich: Gemütliche Zusammenkunft der Maschineningenieur-Gruppe der G. e. P. Stellenvermittlung.

Band 74.

Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 4.

Die jüngsten Fortschritte in der Beurteilung und Bekämpfung von Ueberspannungen in elektrischen Anlagen.

Von Professor Dr. W. Kummer, Ingenieur, Zürich.

Vor sechs Jahren veröffentlichten wir in der „Schweizerischen Bauzeitung“ einen Aufsatz über „Auftreten und Bekämpfung von Ueberspannungen in elektrischen Anlagen“¹⁾, der uns wohl deswegen eine grosse Zahl zustimmender Aeusserungen von Fachkollegen eintrug, weil wir uns auf die Behandlung derjenigen Probleme beschränkten, in Bezug auf welche damals eine gewisse Abklärung der Anschauungen tatsächlich schon erfolgt war. Seither hat sich eine namhafte Zahl von Gelehrten und von Praktikern mit dem weitem Ausbau der Erkenntnis über Auftreten und Bekämpfung der Ueberspannungen verdient gemacht. Wir dürfen dabei nur auf zwei sehr untergeordnete Hilfsarbeiten hinweisen, mit denen wir selbst mitgewirkt haben; einerseits schien es uns wertvoll, auf die vollkommene Uebereinstimmung in der Berechnungsweise der ungedämpften hydraulischen und der elektromagnetischen Ausgleichsvorgänge in Leitungen²⁾ aufmerksam zu machen; andererseits wurde uns Gelegenheit geboten, an dem vom Schweiz. Elektrotechnischen Verein aufgestellten „Bericht über den Schutz elektrischer Anlagen gegen Ueberspannungen (Leitsätze)“³⁾ mitzuberaten. Diese und andere Einzelarbeiten treten unserer Ansicht nach als „Fortschritte“ vollkommen in den Hintergrund gegenüber der Erforschung der *Erdschluss-Störungen* einerseits und der fortschreitenden Klärung des Problems der *Schutzwirkung und Beanspruchung von Spulen* andererseits. Von diesen zwei wichtigsten Fortschritten seit 1913 soll deshalb im folgenden ausschliesslich die Rede sein.

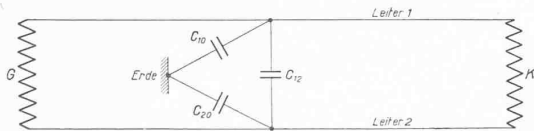


Abb. 1. Einphasen-Stromkreis ohne Erdung.

Erdschluss-Störungen und ihre Beseitigung.

Dass der zufällige Erdschluss isolierter, bezw. isoliert sein sollender Leitungen, der mit sehr häufig besonders heftigen Lichtbogenerscheinungen auftritt, als gefährliche Störung zu gelten hat, ist aus der Praxis der elektrischen Anlagen seit langem bekannt. Hingegen war man bis zu seiner vollständigen Erforschung geneigt, ihn grundsätzlich als Ueberspannungserreger nicht schwerer einzuschätzen als irgend einen ungünstig veranlagten Schaltvorgang.

Der weitere Ausbau der Erkenntnis über das Auftreten von Ueberspannungen hat jedoch gezeigt, dass die Erdschlusserscheinung in zweifacher Hinsicht zu andern Wirkungen führen kann, als sie lediglich auf Grund einer

¹⁾ Auf Seite 330 und 340 von Bd. LXI (21. und 28. Juni 1913); diese Arbeit ist auch als Sonderabdruck erschienen und heute noch erhältlich. Als moralischen Mangel empfinden wir an ihr nachträglich, dass versehentlich der Name von O. Heaviside, des verdienstvollen Lehrmeisters von K. W. Wagner, von uns nicht genannt wurde, was wir hiermit aber nachholen möchten.

²⁾ Ueber Wasserstoss und Ueberspannung; Bulletin des Schweiz. Elektr. Vereins, 1914, Seite 103.

³⁾ Bericht der Kommission für Ueberspannungsschutz des S. E. V. und des V. S. E., Bulletin des Schweiz. Elektr. Vereins, 1916, Seite 137; als Sonderabdruck erhältlich vom Generalsekretariat S. E. V.

Betrachtung, wie sie bei gewöhnlichen Schaltvorgängen am Platze sind, erwartet werden. Einerseits muss nämlich der *dauernde* Erdschluss grundsätzlich als Resonanzerscheinung bewertet werden, während andererseits der *intermittierende* Erdschluss durch Erzeugung von Gleichspannungsladungen zu besonders hohen Ueberspannungen führt.

Die Beurteilung der *Verhältnisse des dauernden Erdschlusses* ist bei zufällig entstandenen und bei absichtlich, mittels Nullpunkt-Erdungen betriebmässig angeordneten Erdschlüssen qualitativ übereinstimmend. Für die letztgenannte Gruppe von Erdschlüssen hat M. Voigt¹⁾ wohl zuerst die massgebende Bedeutung des Resonanzphänomens, sowie auch die Abhilfe mittels Widerständen in der Erdungsverbindung dargelegt. Die Uebertragung und Weiterbildung dieser Erkenntnis auf zufällig entstandene dauernde Erdschlüsse ist alsdann von W. Petersen²⁾ durchgeführt worden. Die Häufigkeit der in Frage stehenden Resonanzerscheinung verdient es, dass wir uns im folgenden etwas näher mit ihr beschäftigen. Unsere Betrachtungen sollen auf Grund einfacher Einphasen-Stromkreise erfolgen; die Uebertragung dieser Betrachtungen auf Mehrphasen-Stromkreise, insbesondere Drehstrom-Anlagen, ist dem Fachmann ohne weiteres geläufig. In Abbildung 1 bringen wir das Schema des ungeerdeten Einphasen-Stromkreises mit der Generatorwicklung G und mit der „Konsum“-Wicklung K, wobei G und K natürlich auch die Hochspannungswicklungen eines Auftransformators und eines Abtransformators sein können, samt den Fernleitern 1 und 2 zur Darstellung. Die Leiter 1 und 2 sollen gegen Erde die Kapazitäten C₁₀ und C₂₀ und gegeneinander die Kapazität C₁₂ aufweisen. Dieses Schema erscheint in Abbildung 2 dahin abgeändert, dass die Wicklungen G und K absichtlich symmetrisch geerdet sind. In Abb. 3 (S. 40) erscheint das ursprüngliche Schema durch Annahme eines

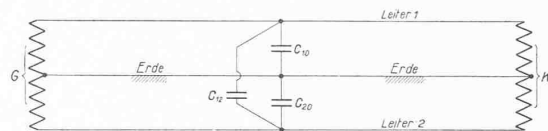


Abb. 2. Einphasen-Stromkreis mit absichtlicher symmetr. Erdung.

zufälligen Erdschlusses im Leiter 2 verändert. In den Leitern 1 und 2 treten nun an den Klemmen der Wicklung G bei Annahme sinusförmigen Wechselstroms von ν Perioden, entsprechend einer effektiven Spannung E an den Klemmen der Wicklung G, Effektivwerte von Ladeströmen I_0 auf, die für die drei Fälle die folgenden Beträge annehmen; es gilt gemäss Abbildung 1:

$$I_0' = 2\pi\nu \cdot E \cdot \left(\frac{C_{10} \cdot C_{20}}{C_{10} + C_{20}} + C_{12} \right)$$

gemäss Abbildung 2:

$$I_0'' = 2\pi\nu \cdot E \cdot \left(\frac{C_{10} + C_{12}}{2} \right)$$

und gemäss Abbildung 3:

$$I_0''' = 2\pi\nu \cdot E \cdot (C_{10} + C_{12}).$$

Für praktische Verhältnisse ist im allgemeinen:

$$C_{10} \approx C_{20};$$

$$C_{12} < C_{10};$$

$$C_{12} < C_{20}.$$

¹⁾ Die Erdung des neutralen Punktes in Drehstrom-Anlagen, Bulletin des Schweiz. Elektr. Vereins 1915, Seite 49.

²⁾ Der Einfluss der Kapazität gegen Erde, E. T. Z. 1916, Seite 129, 493, 512.

Deshalb darf man im Falle der Abbildung 1 schreiben:

$$I_0' = \sim 2 \pi \nu \cdot E \cdot \left(\frac{C_{10}}{2} + C_{12} \right)$$

und es folgt für den Vergleich der drei Fälle:

$$I_0''' > I_0' > I_0''.$$

Im Falle der Abbildung 3, der nicht nur den überhaupt grössten Ladestrom, sondern namentlich auch den grössten an Erde gehenden Ladestrom aufweist, fliesst über den auf dem Leiter 2 angenommenen Erdschlusspunkt ein kapazitiver Erdschluss-Strom I_c von der Grösse:

$$I_c = 2 \pi \nu \cdot E \cdot C_{10}.$$

Berücksichtigt man, dass im Stromkreise des Erdschluss-Stroms auch eine Induktivität L und ein Ohm'scher Widerstand R liegen müssen, und dass dann, wenn E die Spannung am Kondensator C_{10} bedeutet, eine geänderte Klemmenspannung E' in Betracht fällt, so kann im Falle der sogen. „Stromresonanz“ ein Erdschluss-Ueberstrom I_{max} auftreten, der durch die Bedingung:

$$2 \pi \nu \cdot C_0 = \frac{1}{2 \pi \nu \cdot L}$$

bezw.:

$$E' = \sqrt{E^2 + (R \cdot I_c)^2}$$

sich zu:

$$I_{max} = \frac{E'}{R} = I_c \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2 \pi \nu \cdot C_{10} \cdot R} \right)^2} = I_c \sqrt{1 + \left(\frac{2 \pi \nu L}{R} \right)^2}$$

berechnen lässt. Bei einer geringfügigen Verschiebung der Konstanten, entsprechend der Bedingung:

$$2 \pi \nu \cdot C_{10} = \frac{1}{2 \pi \nu \cdot L - 2 \pi \nu \cdot C_{10} \cdot R^2}$$

tritt die sogen. „Spannungsresonanz“ mit der maximalen Ueberspannung E_{max} auf, die sich zu:

$$E_{max} = E' \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2 \pi \nu \cdot C_{10} \cdot R} \right)^2}$$

ergibt. Da die Zahlenwerte der Konstanten C_{10} , R und L vornehmlich durch die Abmessungen, Anordnungen und Längen der Leiter 1 und 2 bestimmt sind, so lassen sich für bestimmte Leitertypen diejenigen kritischen Längen der Leiter bestimmen, für die die Maximalwerte der Ueberströme I_{max} und der Ueberspannungen E_{max} zu erwarten sind, und können dabei auch die zu erwartenden Zahlenwerte $\frac{I_{max}}{I_c}$, sowie $\frac{E_{max}}{E'}$ angegeben werden; solche Rechnungen hat *W. Petersen*¹⁾ in der bereits erwähnten Arbeit bekannt gegeben. Die besondere Gefahr dieser Resonanz-Erscheinungen beruht darauf, dass sie auch bei der Betriebsfrequenz ν leicht eintreten können, während sonst die Resonanzerscheinungen erst bei höhern Frequenzen, z. B. denen der höhern Harmonischen von nicht sinusförmigen Wechselstromwellen zu erwarten sind.

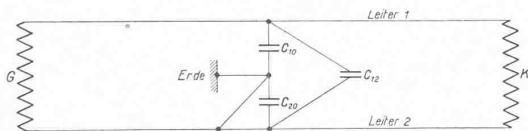


Abb. 3. Einphasen-Stromkreis mit zufälliger Erdung im Leiter 2.

Die Beurteilung der *Verhältnisse des intermittierenden Erdschlusses* können wir in Anlehnung an die, ebenfalls durch *W. Petersen*²⁾ entwickelten Anschauungen, wiederum auf Grund unserer Abbildung 3, also auf Grund eines einphasigen Schemas, vornehmen. Im Erdschluss des Leiters 2 weist der Leiter 1 für den Zeitpunkt der Nullstelle der Erdschluss-Stromwelle den Scheitelwert $E \cdot \sqrt{2}$ der Spannung auf, wobei die elektrische Ladungsmenge:

$$Q = (C_{10} + C_{12}) \cdot \sqrt{2} \cdot E = \sim C_{10} \cdot \sqrt{2} \cdot E$$

auf dem Leiter 1 als Gleichspannungsladung liegen bleibt, wenn der Erdschlusslichtbogen selbstständig verlöscht. Falls dieser sich wiederentzündet und dann wiederverlöscht und dies in regelmässiger Folge je Halbperiode für Halbperiode

wiederholt, entsteht der regelrechte *intermittierende* (aussetzende) Erdschluss. An der Wiederentzündung (Rückzündung) sind die beim vorausgehenden Erlöschen des Lichtbogens auf dem nicht geerdeten Leiter liegenden Gleichspannungsladungen in hohem Masse beteiligt, da sie, zusammen mit den von der Stromquelle in regelmässiger Frequenz aufgedrückten Spannungs-Scheitelwerten, eine zur Wiederentzündung genügend hohe Ueberspannung bilden können. Nach jedem Löschen verteilt sich die Gleichspannungsladung Q gleichmässig auf das Netz, bezw. auf die Leiter 1 und 2, deren Spannung gegen Erde, im Sinne von Abbildung 1, dann den Wert:

$$\frac{Q}{C_{10} + C_{20}} = \sim \frac{Q}{2 \cdot C_{10}} = \frac{\sqrt{2} \cdot E}{2}$$

annimmt. Zu dieser Spannung addieren sich bald wieder genügend hohe Momentanwerte der regelmässigen Spannungswelle, im Maximum also die Scheitelwerte, wobei im Zeitpunkte der Rückzündung das Schema nach Abb. 1 sprunghaft in das der Abbildung 3 übergeht und eine freie Spannungsschwingung von der approximativen Frequenz

$$\nu' = \frac{1}{2 \pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L \cdot C_{10}}}$$

auftritt; das nächste Erlöschen des Erdschlusslichtbogens führt sprunghaft wieder auf das Schema nach Abbildung 1, wobei eine freie Spannungsschwingung mit der approximativen Frequenz:

$$\nu'' = \frac{1}{2 \pi} \cdot \sqrt{\frac{2}{L \cdot C_{10}}}$$

auftreten muss. Bei diesem, sich alle Viertelperioden einstellenden Zünden, bezw. Löschen überlagern sich die jeweils ausgelösten Ueberspannungen zu einer nach kurzer Dauer stationär werdenden resultierenden Ueberspannungswelle, deren Scheitelwerte, verglichen mit dem Scheitelwerte $E \cdot \sqrt{2}$, die Ueberspannungsgefahr des intermittierenden Erdschlusses ziffernmässig zum Ausdruck bringen. Auf Grund der Lehre von den Schwingungen lässt sich ersehen, dass, bei Vernachlässigung jeder Art von Dämpfung, auf dem Leiter 1 ein höchster Spannungsscheitelwert von:

$$2 \cdot \left[\sqrt{2} \cdot E + \frac{\sqrt{2} \cdot E}{2} \right] = 3 \cdot (\sqrt{2} \cdot E)$$

auf dem Leiter 2 ein solcher von:

$$2 \cdot (\sqrt{2} \cdot E)$$

möglich ist, d. h. es sind Ueberspannungen von höchstens dreifacher Höhe auf dem Leiter 1 und solche von höchstens zweifacher Höhe auf dem Leiter 2 zu erwarten. Unter Berücksichtigung der Kapazitäten C_{10} , C_{20} , C_{12} und eines Dämpfungsverhältnisses d von der allgemeinen Form:

$$d = 1 - e^{-\frac{\alpha \cdot \pi}{2 \pi \nu}}$$

(mit $e = 2,72$) hat *W. Petersen*¹⁾ den höchsten Spannungsscheitelwert auf dem Leiter 1 zu:

$$(\sqrt{2} \cdot E) \cdot \frac{3 \cdot C_{10} + C_{12} - d \cdot C_{10}}{C_{10} + 2 \cdot C_{12} + d \cdot C_{10}}$$

und auf dem Leiter 2 zu:

$$(\sqrt{2} \cdot E) \cdot \frac{2 \cdot (C_{10} + C_{12})}{C_{10} + 2 \cdot C_{12} + d \cdot C_{10}}$$

berechnet. Auf Grund der von uns schon angegebenen Beziehungen über die relative Grösse der einzelnen Kapazitäten ist:

$$3 > \frac{3 \cdot C_{10} + C_{12} - d \cdot C_{10}}{C_{10} + 2 \cdot C_{12} + d \cdot C_{10}} > 2$$

sowie:

$$2 > \frac{2 \cdot (C_{10} + C_{12})}{C_{10} + 2 \cdot C_{12} + d \cdot C_{10}} > 1$$

womit die Grössenordnung der Ueberspannungen des intermittierenden Erdschlusses von Einphasen-Stromkreisen etwas genauer dargestellt wird.

Wenn nun zur Beurteilung der Ueberspannungen infolge dauernder, sowie infolge intermittierender Erdschlüsse an Stelle von Einphasen-Stromkreisen *verkettete*

¹⁾ E. T. Z., 1916, Seite 131.

²⁾ Der aussetzende Erdschluss, E. T. Z. 1917, Seite 553, 564.

²⁾ E. T. Z. 1917, Seite 565.

Mehrphasen-, insbesondere Dreiphasen-Stromkreise herangezogen werden, so ergeben sich auf einem ursprünglich nirgends geerdeten solchen Stromkreise bei eintretendem Erdschluss auf einer der Phasenleitungen, also grundsätzlich bei einem dem Schema nach Abbildung 3 gleichwertigen Mehrphasenschema, noch höhere Ueberspannungen als beim entsprechenden Einphasenstromkreis; dabei ist die Erhöhung der Ueberspannung vornehmlich durch die beim Erdschluss an einer der Phasen platzgreifende beträchtlichere Spannungshebung gegen Erde auf den andern Phasen zurückzuführen.

Zur Verhütung, bezw. Beseitigung der durch den dauernden oder den intermittierenden Erdschluss entstehenden Störungen, bezw. zur Bekämpfung der auf Erdschlüsse zurückführbaren Ueberspannungen stehen uns mehrere wirksame Hilfsmittel zur Verfügung, von denen sich die folgenden grundsätzlichen Wirkungsbeziehungen an Hand unserer Schemata nach den Abbildungen 1, 2 und 3 feststellen lassen. Im Grunde genommen laufen nämlich alle diese Hilfsmittel darauf hinaus, die ungewollte Erdung durch eine gewollte und technisch richtig durchgebildete Erdung zu ersetzen. In einem derartigen Bestreben ist ja auch die in Abbildung 2 veranschaulichte Nullpunkt-Erdung zur Anwendung gebracht worden; indessen ist sie in dieser einfachsten Ausführungsform noch recht mangelhaft.

Wie M. Voigt¹⁾ gezeigt hat, kann durch den Einbau von Erdungswiderständen an den Erdungspunkten, bezw. an den Nullpunkten der Wicklungen G und K nach Abbildung 2 diese Nullpunkt-Erdung wesentlich verbessert werden; solche Widerstände kann man als Nullwiderstände bezeichnen. Die technische Anwendung solcher Nullwiderstände verlangt die Kenntnis ihres Zahlenwertes R_0 in Ohm. Gemäss R_0 wird bei eintretender Unsymmetrie in der Schaltung nach Abbildung 2, also insbesondere bei einem Erdschluss auf einem der Leiter 1 oder 2 ein maximaler Wattstrom J_w an Erde gehen, der sich mit dem kapazitiven, also wattlosen Strom J_0 zum resultierenden Erdstrom J_e zusammensetzt; für den letztern kann die Beziehung:

$$J_e = \sqrt{J_w^2 + J_0^2}$$

benutzt werden. Herrscht gegen Erde die Spannung E , so ist angenähert:

$$J_w = \frac{E}{R_0}; J_0 = 2 \pi \nu \cdot E \cdot C_{10}$$

Für:

$$R_0 = \frac{1}{2 \pi \nu \cdot C_{10}}$$

werden die Stromkomponenten J_w und J_0 einander gleich und hat der resultierende Erdschluss-Strom J_e gegen E eine Phasenverschiebung von 45° , dank der er ebenso leicht verlischt, wie der rein wattlos voreilende Erdschluss-Strom J_0 . Den weitaus grössten Schutz gewährt R_0 gegenüber dem intermittierenden Erdschluss, indem die mit Hilfe von R_0 gebildete Ableitung an Erde die entstehenden Gleichspannungsladungen wesentlich herabsetzt. Nach Untersuchungen von W. Petersen²⁾ wird der günstigste Wert von R_0 durch die Beziehung:

$$R_0 = (2,5 \text{ bis } 1) \cdot \frac{1}{2 \pi \nu \cdot C_{10}}$$

innerhalb gewisser Grenzen gegeben.

Anstatt der dauernden Erdung eines Einphasen- oder Mehrphasen-Stromkreises über Nullwiderstände kann auch die dauernde Erdung der Verbindungsleitungen 1 und 2 zwischen den Wicklungen G und K durch Ohmsche Einzelwiderstände R_e angeordnet werden. Im Schema unserer Abbildung 1 würden demgemäss sowohl C_{10} als auch C_{20} je durch einen Parallelwiderstand R_e überbrückt; verglichen mit der Erdung durch einen einzigen Widerstand R_0 sind die verschiedenen Einzelwiderstände R_e zu dimensionieren gemäss:

$$R_0 = \frac{1}{\sum \left(\frac{1}{R_e} \right)}$$

¹⁾ Bulletin des Schweiz. Elektr. Vereins, 1915, Seite 49.

²⁾ E. T. Z., 1918, Seite 341.

Anstatt Einzelwiderstände R_e zur dauernden Erdung der Leiter 1 und 2 zu verwenden, können auch Funken-Ableiter mit gleichem Ersatzwiderstand der gleichzeitig ansprechenden Funkenstrecken benutzt werden.

Bei der Anwendung irgend eines der behandelten Erdungshilfsmittel ist auf das Vorhandensein von Induktivitäten L im Stromkreis des Erdschluss-Stroms zu achten und im Falle eines solchen Vorhandenseins der um die übrigen Leitungswiderstände vermehrte Erdschlusswiderstand auch noch im Hinblick auf aperiodische Entladung nach der Formel:

$$R \geq 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

zu kontrollieren, wobei C von Fall zu Fall aus den Teilkapazitäten C_{10} , C_{20} , C_{12} unserer Schemata zu bilden ist.

Bei der Anwendung von sehr hohen Spannungen der Leiter 1 und 2 gegen Erde bildet die Beschaffung und Instandhaltung wirklich betriebstüchtiger Ohm'scher Widerstände zur Dauererdung erhebliche Schwierigkeiten. In diesem Falle kann dann die vor kurzem von W. Petersen¹⁾ empfohlene sogen. Erdschluss-Spule mit Nutzen verwendet werden, die im Schema der Abbildung 2 an den Erdungspunkten, bezw. an den Nullpunkten der Wicklungen G und K an Stelle eines Nullwiderstandes R_0 zum Einbau kommt. Im Falle eines zufälligen Erdschlusses auf dem Leiter 2 wird die Erdschluss-Spule L_0 nach unserer Abbildung 4 von einem Ausgleich-Strom J_a durchflossen, der durch die Beziehung:

$$J_a = \frac{E}{2 \pi \nu \cdot L_0}$$

gegeben ist; anderseits fliesst vom Leiter 1 der kapazitive Erdschluss-Strom:

$$J_0 = \sim 2 \pi \nu \cdot (2 \cdot E) \cdot C_{10}$$

nach dem Erdschlusspunkte hin. Falls:

$$2 \pi \nu \cdot L_0 = \sim \frac{1}{2 \pi \nu \cdot 2 \cdot C_{10}}$$

gemacht wird, sind die zwei Ströme J_a und J_0 gleich gross; da sie auch entgegengesetzt gerichtet sind (da J_a ein nach-eilender, J_0 aber ein voreilender wattloser Strom ist), so heben sie sich auf dem Leiter 2 gegenseitig auf und bleibt

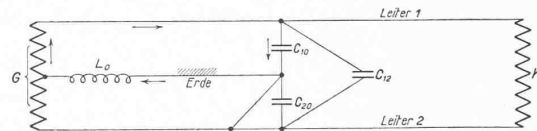


Abb. 4. Einphasen-Stromkreis mit Erdschluss-Spule L_0 und mit zufälliger Erdung im Leiter 2.

im Schema der Abbildung 4 nur der durch die Pfeile angedeutete Erdschluss-Stromverlauf übrig. Damit verschwindet aber auch im wesentlichen die durch den Erdschluss allfällig erzeugbare Ueberspannungsgefahr, da der Gefahrenpunkt, an dem die Lichtbogenbildung zu befürchten ist, vom kapazitiven Erdschluss-Strom in der Hauptsache befreit ist. Ueber die Erdschluss-Spule verläuft bei plötzlicher Unterbrechung des Erdschlusses eine Entladung von der Frequenz ν_0 , die gemäss:

$$\nu_0 = \frac{1}{2 \pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_0 \cdot (C_{10} + C_{12})}} = \sim \frac{1}{2 \pi} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot \pi^2 \cdot \nu^2 \cdot 2 \cdot C_{10}}{2 \cdot C_{10}}} = \nu$$

mit der Betriebsfrequenz ν übereinstimmt und nach Massgabe der natürlichen Dämpfung rasch abklingt. Die bislang erzielten praktischen Resultate mit der Anwendung solcher Erdschluss-Spulen scheinen die an sie gestellten Erwartungen vollauf zu bestätigen und dürfte das neue Schutzmittel einer wichtigen Entwicklung fähig sein.

Auf alle Fälle erscheint heute das Problem der Erdschluss-Störungen und die Wirkung der gegen solche anwendbaren Hilfsmittel bereits hinreichend abgeklärt zu sein. (Schluss folgt.)

¹⁾ Die Begrenzung des Erdschluss-Stroms und die Unterdrückung des Erdschlusslichtbogens durch die Erdschluss-Spule, E. T. Z. 1919, S. 5, 17.