

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 5 (1914)
Heft: 5

Artikel: Betriebsstörungen in Freileitungen durch elektrische Ueberspannungen
Autor: Giles, G. / Capart, G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059665>

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: 16.02.2026

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

Betriebsstörungen in Freileitungen durch elektrische Ueberspannungen.

Von G. Giles und G. Capart, Freiburg (Schweiz).

1. Die atmosphärischen Erscheinungen.

Die vorliegende Arbeit möchte bezwecken, den Leser mit einigen charakteristischen Fällen von Betriebsstörung durch Ueberspannungen bekannt zu machen, die wir zu sammeln Gelegenheit hatten. Um das Wesen und die mutmassliche Ursache dieser Störungen erkennen zu können, schien es uns notwendig, einige zwanglos aneinander gereihte theoretische Erörterungen vorangehen zu lassen, die jedoch nicht Anspruch darauf erheben, die vollständige Theorie der Ueberspannungserscheinungen wiederzugeben.

In einer vor kurzer Zeit erschienenen Abhandlung¹⁾ haben wir diejenigen atmosphärischen Erscheinungen beschrieben, die Betriebsstörungen in elektrischen Anlagen verursachen können. Wir wollen diese Erscheinungen nachstehend zusammenfassend erwähnen:

Die Verteilung des elektrischen Feldes der Erde ist eine ziemlich unregelmässige in gebirgigen Regionen. Während in der Ebene bei ruhigem Wetter die äquipotentialen Schichten horizontal sind, stehen bei gewellter Bodenformation die einzelnen elektrischen Schichten auf den Berggipfeln näher bei einander als unten in der Talsohle.

Hierzulande müssen die Leitungen oft beträchtliche Höhen erklettern, um hierauf wieder in die Ebene hinunter zu steigen; sie durchschneiden derart äquipotentielle Flächen des Erdfeldes, die unter sich sehr verschiedene Potentiale haben. Es geht daraus hervor, dass in den Freileitungen leicht sehr starke Erhöhungen des statischen Potentials hervorgerufen werden können. Von verschiedenen Seiten wurde beobachtet, dass es möglich ist, aus einer beidseitig abgeschalteten Freileitung Funken von 2—3 cm Länge²⁾ herauszuziehen und zwar infolge der Höhendifferenz, die durch die Leitung überwunden wird.

Bei schlechtem Wetter haben die statischen Erscheinungen, die auf die unregelmässige Verteilung der äquipotentialen Schichten zurückzuführen sind, einen noch viel ausgesprochenen Charakter. Messungen haben gezeigt, dass das Potentialgefälle an einem bestimmten Punkt bei der Annäherung eines Gewitters einen Wert erreichen kann, der den normalen um das hundertfache übersteigt.³⁾ Atmosphärische Schichten dieser Art, die sich in einer von einem elektrischen Freileitungs-Verteilungsnetz durchzogenen Gegend fortbewegen, können schwere Betriebsstörungen verursachen, sowohl in den Leitungen selbst, wie in den Transformatorenstationen und in der Zentrale, als Folge der zeitweise grossen Potentialdifferenz zwischen zwei im Raume sehr nahe bei einander gelegenen Punkten.

Die direkten Blitzschläge sind verhältnismässig selten, jedoch ist ihre Wirkung sehr charakteristisch. Die Entladungen sind entweder oszillierend oder aperiodisch. Die Meinungen darüber sind geteilt. Benischke verneint in seinem Werk „Die Schutzvorrichtungen der Starkstromtechnik“ (1911) das Vorhandensein oszillierender Entladungen von hoher Frequenz. In der meteorologischen Zeitschrift vom Jahre 1905 will Schmidt nur Frequenzen von 7—8 pro Sekunde zulassen. F. Emde gibt in der E. T. Z. vom Jahre 1905 eine Frequenz von 5000—6000 Perioden an, während Schrottcke oszillierende Entladungen von hoher Frequenz überhaupt nicht zulässt. Im Gegensatz dazu vermuten Steinmetz (1908) und Creighton (1910) als mögliche Frequenz 500,000—1,000,000 Perioden, Werte, die wir selbst auch befürwortet hatten⁴⁾. Sir Olivier Lodge will sogar noch höhere Zahlen annehmen.

¹⁾ „Die atmosphärischen Erscheinungen und die Störungen, welche durch dieselben in elektrischen Verteilungsnetzen hervorgerufen werden.“ E. u. M. 1913. No. 37.

²⁾ Dies entspricht einer Potentialdifferenz von 30,000—40,000 Volt.

³⁾ Siehe die Arbeiten von Mache und Schweidler: „Die atmosphärische Elektrizität“ (1911); von A. Vialay: „Les circulations atmosphériques“ (1911).

⁴⁾ Siehe den Katalog der „Société Générale des Condensateurs Electriques“, Freiburg (1911).

Aus den Wirkungen der direkten Blitzschläge auf die Freileitungen geht hervor, dass der verursachte Schaden im allgemeinen sehr begrenzt ist. (Fig. 1.) Der tatsächlich beschädigte Teil der Leitung bleibt auf eine Länge lokalisiert, die selten 300 Meter übersteigt. Diese Entladungen sind für die Maschinen und Transformatoren erst dann gefährlich, wenn sie in deren unmittelbaren Nähe niedergehen. Diese Tatsachen sind dazu angetan, zu beweisen, dass es sich hier wohl um oszillierende Entladungen oder solche ähnlicher Natur handelt. Der Ohmsche Widerstand der Leitung kann gegenüber der für rasch oszillierende

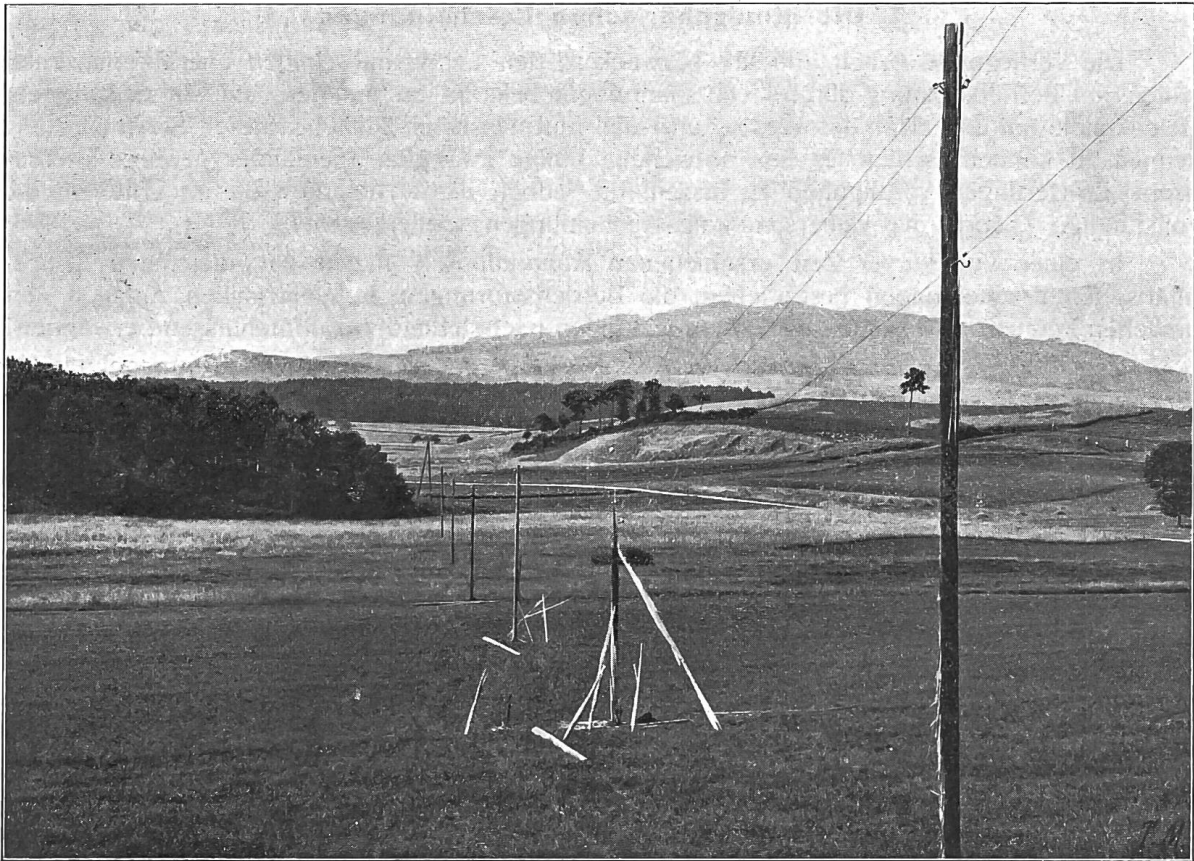


Fig. 1.

Phänomene enormen Induktanz des Leiters durchaus vernachlässigt werden. Die Entladung trachtet vielmehr, auf demjenigen Wege zur Erde abzufließen, der die geringste Induktanz darstellt. So ging in vielen Fällen die Entladung direkt nach der Erde, durch eine Luftschicht von mehreren Metern Dicke hindurch, anstatt dem Leiter entlang zu gleiten, wo sie endlich durch eine nur wenige Zentimeter breite Luftschicht hindurch einen viel kürzeren Weg nach der Erde hätten finden können.

Die oszillierenden Entladungen von geringer Frequenz, sowie die aperiodischen Entladungen stellen die Ueberlagerung dar von einer Anzahl Teilentladungen, die sich in ein und demselben Blitze sehr rasch nacheinander folgen; sie haben die gleiche induktive Wirkung wie die Schwingungen hoher Frequenz. Hier liegt, nach unserer Meinung, der Hauptgrund, warum unter den Fachmännern Uneinigkeit herrscht in Bezug auf die wahrscheinliche Frequenz der oszillierenden Erscheinungen atmosphärischen Ursprunges. Wie dem auch sei, sind die Wirkungen auf die Leitungen fast genau gleich bei direkten Entladungen oszillierender oder aperiodischer Natur. Die gefürchtesten Wirkungen, die durch solche Entladungen hervorgerufen werden können, sind Kurzschlüsse der Anlage, die entstehen, wenn ein oder mehrere Leiter durch den Blitz, einen sehr schwachen Widerstand, an die Erde gelegt werden. Der Betriebsunfall von Wylen (1913) ist eines der typischsten

Beispiele dafür.⁵⁾ Die indirekten Blitzschläge sind sehr gefährlich, wenn sie in der Nähe von Transformatoren-Stationen oder von Zentralen erfolgen. Sie erzeugen Wellen von hoher Frequenz oder solche von gleichem Charakter, wie die sogenannten Wanderwellen mit steiler Stirne, deren zerstörende Wirkung auf die Wicklungen sehr wohl bekannt sind.

Die Wanderwellen, die in den Leitungen im Moment einer direkten oder indirekten Entladung entstehen, können jedoch auch niedriger Frequenz sein oder überhaupt nicht Wechselstromcharakter haben. Ihre Entstehung erfolgt auf verschiedene Weise, im besonderen bei plötzlichen Aenderungen in der Verteilung der äquipotentialen Schichten, Aenderungen, die im Moment der Entladung eintreten können und zum Beispiel eine der Ursachen von statischen Erscheinungen am Ende der Leitung sind. Der Vorgang bei plötzlicher Entladung der statisch aufgeladenen Linie gehorcht den gleichen Gesetzen, wie wir sie später für den Fall des Kurzschlusses behandeln werden, und da die Kapazität der Freileitungen im allgemeinen sehr gering ist, kann die Spannung der Entladungswelle einen ausserordentlich hohen Wert erreichen. Derart erklärt es sich, dass nicht unter Spannung stehende Leitungen im Verlaufe eines Gewitters Ueberspannungen ausgesetzt sind, die mehrere Male die Betriebsspannung, für welche die Leitung gebaut wurde, übersteigen.

In den vorstehenden Ausführungen haben wir nur diejenigen statischen Erscheinungen angedeutet, die auf eine unregelmässige Verteilung des atmosphärischen Feldes zurückzuführen sind. Wenn wir aber auf Vollständigkeit Anspruch machen wollen, müssen wir noch die *normalen meteorologischen Vorgänge* in Erinnerung bringen, die auch solche statische Erscheinungen hervorrufen. So ist zum Beispiel das Vorbeiziehen einer elektrisch geladenen Wolke oberhalb einer Leitung eine wohlbekannte Quelle von Störungen. Der Wind, der Schnee, heftiger Regen und Hagel verursachen bisweilen statische Ladungen in der Leitung. Für weitere Einzelheiten verweisen wir den Leser auf unsere früheren Studien über die genannten Fragen.⁶⁾

2. Permanente und vorübergehende Erscheinungen.⁷⁾

Die Induktanz L eines elektrischen Stromkreises speichert die elektromagnetische Energie $\frac{L i^2}{2}$ auf, und die Kapazität C die elektrostatische Energie $\frac{C e^2}{2}$. Es geht klar hervor, dass ein elektrischer Stromkreis, den weder Selbstinduktion noch Kapazität inne wohnte, keine Energie in sich aufspeichern könnte und dass demzufolge am Gleichgewichtszustand eines solchen Stromkreises ohne irgendwelche Störungserscheinung fast augenblickliche Aenderungen vorgenommen werden könnten. Es bedarf also, mit andern Worten, keiner besonderen Bedingung, die den Uebergang von einem Zustand zum andern vermittelt. Praktisch weisen aber die elektrischen Stromkreise Selbstinduktion und Kapazität auf, so dass sich der Uebergang von einem Gleichgewichtszustand zum andern durch *eine vorübergehende Erscheinung* bemerkbar macht, welche letztere hervorgerufen wird durch den Austausch von abwechselnd in magnetischer und elektrostatischer Form aufgespeicherter Energie, also eine periodische Aenderung von Form und Art ein und derselben Energie.

Die aufgespeicherte Energie, die abwechselnd vom Kondensator nach der Selbstinduktion übergeht, lässt sich, bei Vernachlässigung der Dämpfung, wie folgt ausdrücken:

$$\frac{L i_0^2}{2} = \frac{C e_0^2}{2}$$

Daraus folgt:

$$\frac{e_0}{i_0} = \sqrt{\frac{L}{C}} = s_0.$$

⁵⁾ Siehe „Bulletin“ 1913, Seite 153.

⁶⁾ G. Giles: „La protection des installations électriques contre les surtensions“ (1911). — „Les accidents d'exploitation dans les réseaux“ (Vortrag, gehalten in der Gesellschaft der aus der Schule von Montefiore hervorgegangenen Ingenieure, 1912). — G. Capart: „La protection des réseaux.“ — La Technique Moderne (1912 und 1913). — Elektrotechnik und Maschinenbau (1913).

⁷⁾ C. P. Steinmetz: Theory and Calculation of Transient Electric Phenomena and Oscillations. (1908).

Diesen Faktor nennt Steinmetz die natürliche Impedanz des Stromkreises.⁸⁾ Es gibt dieser Faktor die Beziehung an, die zwischen e und i vorhanden ist, wenn keine Energiequelle in Frage kommt, das heisst, im Fall von Eigenschwingungen des Stromkreises. Aus diesem Grunde nimmt für Schwingungen sehr hoher Frequenz oder für Wanderwellen, die sich mit einer Geschwindigkeit verbreiten, die derjenigen des Lichtes nahe kommt, der Ausdruck $\sqrt{\frac{L}{C}}$ in gewissem Sinne den Charakter eines Ohmschen Widerstandes an und man nennt ihn deshalb auch bisweilen *Wellenwiderstand*.

Diese Betrachtung führt uns logischerweise zum Begriff der *stationären Wellen*. Man weiss, dass diese Wellen in bestimmten Zeitpunkten gewisse Stellen der Anlage mehr gefährden können als andere. Es kann zum Beispiel jede Spule eines Transformators oder eines Wechselstromgenerators ihre natürliche Eigenfrequenz besitzen und das Eindringen einer Wanderwelle in einen derartigen Stromkreis genügt dann, um die eine oder die andere Spule in Resonanz zu setzen und darin derartige Ueberspannungen hervorzurufen, dass ein Durchschlag der Spule erfolgen kann. Der absolute Wert dieser Ueberspannungen ist im allgemeinen nicht sehr hoch; da aber die Welle kurzperiodisch ist, befindet sich bisweilen zwischen zwei benachbarten Punkten der Wicklung, Punkte, die nur durch eine Baumwollschicht von einander getrennt sind, eine beträchtliche Potentialdifferenz, die ein Durchschlagen hervorrufen kann. Daraus erklärt sich, dass man bei gewissen Gelegenheiten konstatieren konnte, dass *gesunde* Transformatoren- oder Generatorspulen, in ziemlich grosser Entfernung von den Eintrittsklemmen gelegen, zwischen den einzelnen Wicklungen ganz verbrannt wurden, während die ersten, den Klemmen zunächst gelegenen Spulen intakt waren. Wir sprechen ausdrücklich von gesunden Spulen im Gegensatz zu den viel häufiger vorkommenden Durchschlägen an Spulen von Maschinen oder von Lufttransformatoren, deren Isolation infolge von Ozonisierungs- oder Salpeterbildungserscheinungen angegriffen wird.

Interne Vorgänge statischer Natur. Die Verteilung des elektrostatischen Feldes eines unter Spannung stehenden Leiters ist eine Funktion der geometrischen Dimensionen des letzteren. Daraus geht hervor, dass die Beanspruchung des umgehenden Dielektrikums an einzelnen Punkten des Stromkreises viel höher sein kann als an andern. Mit andern Worten: Die Dichte der äquipotentialen Schichten und damit die Beanspruchung des Dielektrikums um den Leiter herum ist mit dessen Formgebung veränderlich; die gegenseitige Annäherung dieser Flächen ist zum Beispiel viel ausgesprochener, wenn der Stromkreis scharfe Kanten aufweist (Spitzenwirkung). Dieser Umstand begünstigt die Bildung von überspringenden Lichtbogen und erhöht den Verlust im Dielektrikum (dunkle Entladungen). Die erste Spule der Transformatoren, die Schalterausführungen, die Stellen plötzlicher Querschnittsänderungen, wie die Verbindungsstellen zwischen einer Freileitung und einem unterirdischen Kabel sind ganz besonders der Sitz von solchen Erscheinungen.

3. Resonanzerscheinungen.

Mit Unrecht hat man oft geschrieben, dass in Freileitungen keine Resonanz auftreten könne. Wir werden einige typische Beispiele anführen, die in schweizerischen Verteilungsnetzen beobachtet wurden. Für das spätere Verständnis der verschiedenen Vorgänge, die wir weiter unten beschreiben werden, halten wir es für angebracht, den Leser an die sehr klare und eindeutige Definition zu erinnern, die von Steinmetz über die Resonanz gegeben wurde.⁹⁾

Wenn eine Welle an einen Leiter gelangt, zum Beispiel an eine Freileitung für Kraftübertragung, so pflanzt sie sich dieser Leitung entlang fort und zwar mit einer Geschwindig-

⁸⁾ C. P. Steinmetz: Mémoire à l'Exposition de Turin, 1911. The nature of Transient in Electrical Engineering.

⁹⁾ C. P. Steinmetz: „Theory and Calculation of Transient electric phenomena and oscillations“ (1908).

keit, ungefähr gleich derjenigen des Lichtes. Wenn die Leitung am andern Ende offen ist, so wird die Welle, wenn sie dort anlangt, nach dem Prinzip der Energieerhaltung zurückgeworfen und kommt mit der gleichen Geschwindigkeit nach ihrem Ausgangspunkt zurück. Setzen wir nun voraus, dass in diesem Moment eine zweite Welle in die Leitung geschickt wird, so wird sich die Amplitude derselben zu der Amplitude der ersten Welle summieren und die zweite Welle wird nun den gleichen Weg machen wie die erste. Vorausgesetzt, dass sich Wellen abwechselnd in gleichen Zeiträumen folgen, von einem Ende der Leitung zum andern wandern und so ihre Amplituden summieren, folgt nach obigem, dass starke Ströme oder hohe elektromotorische Kräfte durch Wellen von geringer Amplitude erzeugt werden können, oder auch durch kleine Impulse, deren Wirkungen sich summieren. Die Bedingung für das Zustandekommen einer Resonanz ist, dass die Welle Zeit hat, die ganze Länge der Leitung zu durchlaufen und in demjenigen Momente an ihren Ausgangspunkt zurückzukommen, wo eine zweite Welle oder ein zweiter Impuls in die Leitung gelangt.

In Wirklichkeit handelt es sich bei der Anwendung dieser Bedingung auf Freileitungen und Wechselströme um halbe Wellen, für welche die Zeit identisch ist mit derjenigen, die das Licht braucht, um zwei Mal die Länge der Leitung zu durchlaufen. Für die ganze Periode ist die Zeit gleich derjenigen, die das Licht braucht, um vier Mal die ganze Leitungslänge zu durchlaufen. Wenn also l die Länge der Leitung ist, v die Geschwindigkeit des Lichtes, so beträgt die Schwingungsfrequenz oder natürliche Periode der Leitung:

$$f_0 = \frac{v}{4l}$$

Trägt man l in Kilometer ein und setzt man für $v = 300,000$ Kilometer pro Sekunde, kann man schreiben:

$$f_0 = \frac{75,000}{l}$$

Man sieht daraus, dass für gebräuchliche Frequenzen Freileitungen von 3000 Kilometer Leitungslänge bei 25 Perioden und 1250 Kilometer bei 60 Perioden nötig sind, um mit der normalen Schwingungszahl technischer Wechselströme in Resonanz zu treten.

Wendet man jedoch die gleichen Grundsätze auch auf diejenigen Wellen an, die sich in den Kabeln und in den Wicklungen elektrischer Maschinen fortpflanzen, das heisst in Leitern, für welche die Geschwindigkeit der Wellen mehr von derjenigen des Lichtes abweichen, oder die einen Vergleich erlauben mit künstlichen Leitungen von grösserer Länge, so findet man praktisch für die Resonanzbedingung Werte, die sich den normalerweise gebräuchlichen Frequenzen nähern.

Resonanz durch die Harmonischen. Bei Wechselstromgeneratoren, deren Spannungswelle nicht streng sinusoidal verläuft, können die Harmonischen der letzteren, selbst diejenigen von geringer Amplitude, in Resonanz mit der Eigenschwingung des Netzes treten, wenn der Generator auf ein Netz mit grosser Kapazität arbeitet. Dieser Vorgang gibt zu Ueberspannungen Anlass, denen keine Isolation Stand halten kann. Rufen wir nur in unser Gedächtnis zurück, welchen Einfluss zum Beispiel die Harmonischen von der Ordnungsgrösse 3 k in Drehstrominstallationen haben können. Bekanntlich heben sich diese bei einem in Dreieck geschalteten und absolut gleichbelasteten Transformator auf, können also nicht in die Leitung gelangen. Anders aber bei in Stern geschalteten Wicklungen mit geerdetem Nullpunkt. Hier addieren sich die Harmonischen von der Ordnung 3 k und zirkulieren im neutralen Leiter (Erde) zwischen Generator (Transformator) und dem Netz. In grossen Kabelnetzen können so Ladeströme dritter und neunter Ordnung auftreten, die mit der Eigenschwingungszahl des Netzes übereinstimmen und dadurch zu den charakteristischen Resonanzerscheinungen führen.¹⁰⁾ Umgekehrt geben auch in Dreieck geschaltete Transfor-

¹⁰⁾ Siehe: „La protection des réseaux contre les surtensions.“ G. Capart. La Technique Moderne, Band III, No. 10 (Oktober 1911), Seite 533; No. 11 (November 1911), Seite 610; No. 12 (Dezember 1911), Seite 668; Band IV, No. 2 (15. Januar 1912), Seite 52; No. 4 (15. Februar 1912), Seite 137; No. 6 (15. März 1912), Seite 212; No. 7 (1. April 1912), Seite 251; No. 9 (1. Mai 1912), Seite 329; No. 10 (15. Mai 1912), Seite 375.

matoren infolge der Harmonischen Anlass zu Resonanzerscheinungen, wenn bei der Betätigung des Schalters nicht alle 3 Phasen gleichzeitig unterbrochen bzw. eingeschaltet werden. Infolge der Unsymmetrie des Drehstromsystems gelangen hierbei die höheren harmonischen Ströme im Netz selbst zum Schluss.

Resonanz der Einschaltvorgänge. Resonanzen, die auf diese Weise zustande kommen, erscheinen in vorübergehender Form.

Wir verdanken Herrn Schenker, Oberingenieur der Kraftwerke Beznau-Löntschi (Schweiz), eines der schlagendsten Beispiele, das in einem Hochspannungs-Freileitungsnetz beobachtet werden konnte.

An den Sammelschienen einer 45,000 Volt-Zentrale, in welcher einige Freileitungen von grosser Länge enden (ca. 120 km), ist ein Messtransformator für ein Voltmeter abgezweigt.

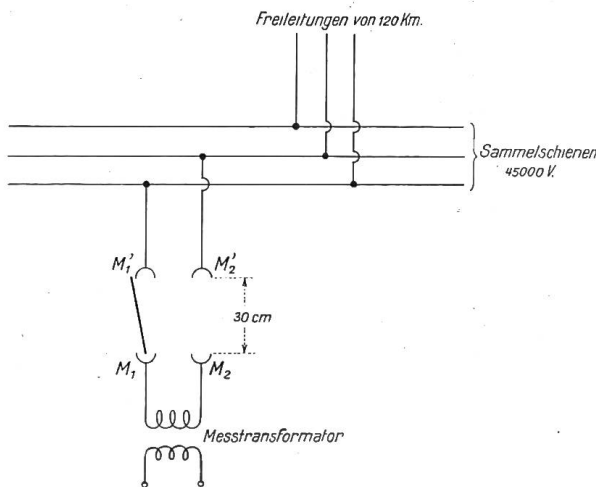


Fig. 2.

Die Anschlussklemmen jeder Sicherung des genannten Messtransformators sind 30 cm von einander entfernt. Wenn der sekundäre Stromkreis des Transformators offen ist, so springt im Moment des Einschaltens der ersten Sicherung S an den festen Stromanschlusstücken $M_2 M_2'$ ein Funken von 30 cm Länge über (Fig. 2).

Die Konstanten der an einem Ende offenen Transformatorenwicklung sind derart, dass sich der Apparat genau so verhält, wie wenn die Leitung selbst verlängert wäre und zwar um einen Betrag, der zur Erfüllung der Resonanzbedingung genügt.

Dieses Beispiel lässt sofort erkennen, wie wichtig es ist, dass bei Hochspannungsschaltern ein exaktes und gleichzeitiges Schliessen aller drei Phasen erzielt wird, wenn diese Schalter Transformatoren bedienen, an die lange Freileitungen oder Kabelleitungen angeschlossen sind.

ges Schliessen aller drei Phasen erzielt wird, wenn diese Schalter Transformatoren bedienen, an die lange Freileitungen oder Kabelleitungen angeschlossen sind.

4. Einschalt- und Reflexionsvorgänge.¹¹⁾

Wird eine elektrische Leitung durch die Betätigung eines Schalters unter Spannung gesetzt, so sind verschiedene Vorgänge zu beobachten. Der erste derselben, den wir mit „Einleitungsvorgang“ bezeichnen wollen, ist die Ausbreitung der Spannungswelle von einem Ende des Leiters zum andern mit einer Geschwindigkeit, die derjenigen des Lichtes nahe kommt. Die zweite Erscheinung, die wir als „vorübergehend“ bezeichnen wollen, ist das Auftreten von Störungerscheinungen im Stromkreis, hervorgerufen durch Ausgleichströme, die dem stationären Zustand zustreben. Dies sind die zwei voneinander sehr verschiedenen Hauptphasen des Einschaltvorganges. Die erste davon spielt sich in unendlich kurzer Zeit ab, während die zweite von erheblich längerer Zeitdauer ist. Beide Erscheinungen aber können von charakteristischen und deutlichen Störungen im Netz begleitet sein.

Einleitungsvorgang. Der Einleitungsvorgang hängt in gewissem Sinne nur von den Leitungskonstanten in der unmittelbaren Nähe des Schalters ab.

¹¹⁾ Siehe die Studien von W. Linke: „Archiv für Elektrotechnik“, 1912, Seite 16. — A. Schwaiger: „Ueber Einschaltvorgänge in kapazitätsfreien Stromkreisen.“ Elektrotechnik und Maschinenbau, Wien 1909, Seite 633. — K. W. Wagner: „Elektromagnetische Ausgleichvorgänge in Freileitungen und Kabeln“ (1908). — C. P. Steinmetz: „Theory and Calculation of transient phenomena and oscillations.“ (1909.) — R. Rüdenberg: Elektrotechnik und Maschinenbau, Seite 157. — E. Pfiffner: Elektrotechnik und Maschinenbau, No. 47, 48 und 49 (1912 und 1913). — G. Faccioli: „Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers.“ (1911) Seite 1621. — G. Giles: Bulletin de l'Association des Ingénieurs sortis de Montefiore (1912).

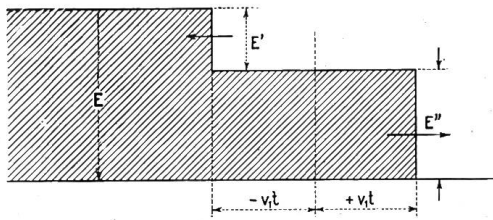


Fig. 3.

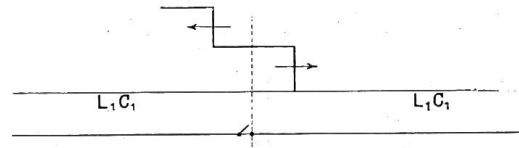


Fig. 4.

Figur 3 zeigt, dass im Moment des Schliessens zwei Wellen auftreten. Die erste dieser Wellen dringt in den nicht geladenen Leiter, während die zweite zurückgeworfen wird, sich also im Sinne der Zuleitung des Schalters fortbewegt und dieselbe entladet. Die Summe dieser beiden Wellen ist gleich der Betriebsspannung E des Netzes. Die Werte E' und E'' sind gegeben durch die Formeln:¹²⁾

$$E'' = \frac{E}{1 + \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \cdot \sqrt{\frac{C_2}{L_2}}}$$

$$E' = \frac{E}{1 + \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \cdot \sqrt{\frac{C_1}{L_1}}}$$

Die Figuren 4, 5 und 6 zeigen diese Verhältnisse für den Schaltvorgang an drei Fällen, die in der Praxis häufig sind. Figur 4 stellt eine Spannungswelle dar, wie sie beim

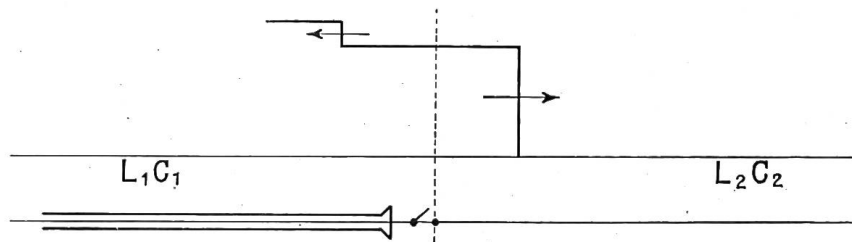


Fig. 5.

Schliessen eines Schalters entsteht, der zwei Leitungen von gleichem Charakter verbindet. Die direkte oder eindringende Welle hat nahezu die gleiche Amplitude wie die zurückgeworfene Welle. Der Wert dieser Amplitude ist ungefähr gleich der halben Betriebsspannung. Figur 5 stellt den Fall dar, wo eine Freileitung durch ein Kabel gespeist wird. Die Reflexion ist dann fast null und die eindringende Welle hat nahezu den gleichen Wert wie die Betriebsspannung. Figur 6 stellt den umgekehrten Fall von Figur 5 dar. Eine Freileitung wird auf ein Kabel geschlossen. Die Reflexion ist hier sehr gross und die Amplitude der eindringenden Welle sehr klein.

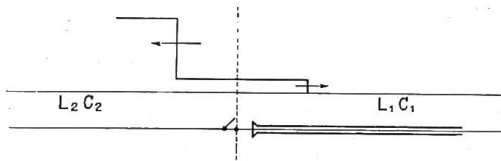


Fig. 6.

Die Wellenwiderstände sind annähernd $\sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = 100$ für die Kabel und $\sqrt{\frac{L_2}{C_2}} = 500$ Ohm für die Freileitungen.

Die erwähnte Erscheinung des Eindringens und des Zurückwerfens einer Welle im Moment wo der Schalter geschlossen wird, kann an den Wicklungen von Maschinen und

¹²⁾ R. Rüdenberg: „Die Einschaltvorgänge bei elektrischen Leitungen.“ Elektrotechnik und Maschinenbau (1912). Seite 159.

Apparaten beträchtlichen Schaden verursachen. Diese längs der Leitung sich fortpflanzenden Wellen weisen anfangs sehr steile Stirnen auf, die an den Spulen ähnliche Durchschläge veranlassen können, wie solche durch Hochfrequenzerscheinungen hervorgerufen werden.

Figur 7 zeigt uns die verschiedenen Phasen der Reflexionsvorgänge an einer Maschine, die auf ein Kabel arbeitet. Im Augenblick, wo der Schalter geschlossen wird, dringt eine Welle von sehr geringer Amplitude in das Kabel, während die zurückgeworfene Welle umgekehrt fast gleiche Amplitude wie die Betriebsspannung aufweist. Es ist also nicht das Kabel, welches gefährdet ist. Die zurückgeworfene Welle gelangt an die Maschinenklemmen und in die Wicklungen, die einen grossen Wellenwiderstand haben, sie wirken daher wie eine an einem Ende offene Leitung, so dass in diesen Wicklungen die Welle zu doppelter Grösse anwachsen kann. Man hat also wieder zwischen zwei benachbarten Punkten ein und derselben Spule eine Potentialdifferenz, die hier dem doppelten Betrag der Normalspannung entspricht. Diese Erscheinung wird sehr häufig im Moment der Inbetriebsetzung von Hochspannungsmotoren beobachtet.

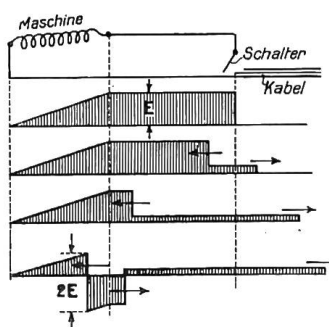


Fig. 7.

Vorübergehende oder Ausgangerscheinung. Unabhängig vom Einleitungsvorgang, den wir soeben studiert haben, macht sich im allgemeinen das Schliessen eines Schalters noch durch eine Schwingungserscheinung bemerkbar: die Ladung des Kondensators, welcher durch die Kapazität der Leitung oder des der Netzspannung ausgesetzten Stromkreises gebildet wird. Die Amplituden der schwingenden Einschaltwellen, die selten den doppelten Wert der Normalspannung erreichen, können nur dann auf eine unbegrenzte Grösse an-

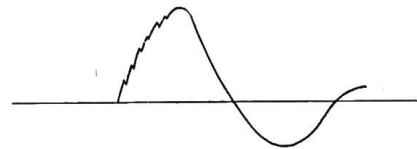


Fig. 8.

wachsen, wenn sich der Einschaltvorgang bei einer Frequenz abspielt, die Resonanz hervorrufen kann. Dann können wohl Durchschläge an Generatoren- und Transformatorenspeulen erfolgen und Lichtbogen zwischen beträchtlich entfernten Punkten entstehen. Oszillographische Aufnahmen des Einschaltvorganges zeigen, dass sich beim Entstehen der vorübergehenden Vorgänge bisweilen der Einfluss der höheren Harmonischen bemerkbar macht (Figur 8). Faccioli¹³⁾ ist der Meinung, dass für Anlagen mit sehr hoher Spannung hierin der Grund von Durchschlägen zwischen den einzelnen Windungen einer Spule zu suchen sei, da diese Wellen kurzperiodig und von sehr hoher Frequenz sind.

5. Vorgänge beim Öffnen eines Schalters und Ueberspannungen bei Belastungsänderungen.

Wenn einer mit Kapazität behafteten Leitung die Stromzufuhr plötzlich unterbrochen wird, oder wenn in der Leitung eine plötzliche Änderung des Gleichgewichtszustandes eintritt, so wird die im magnetischen Feld der Leitung aufgespeicherte Energie in elektrostatische Energie umgewandelt und kann daher Anlass zu sehr starken Ueberspannungen geben. Diese verfügbare Energie macht sich am Unterbrechungspunkt durch einen Lichtbogen bemerkbar und bildet gleichzeitig die Lade-Energie des durch die Leitung gebildeten Kondensators. Da dieser bereits die Netzspannung aufweist, kann die resultierende Spannung einen sehr hohen Wert annehmen. Der sich seinerseits entladende Kondensator ist bemüht, das verschwundene magnetische Feld wieder herzustellen und leitet dadurch den Ausgleichvorgang von neuem ein. Die so entstehenden Schwingungen haben gleiche Periodenzahl wie die früher behandelten Eigenschwingungen des Stromkreises.

Man kann sich leicht vorstellen, dass die durch die Anwesenheit des magnetischen Feldes erzeugte Ueberspannung um so mehr zu befürchten ist, je geringer die Kapazität

¹³⁾ G. Faccioli: „High Tension Switching phenomena.“ Mémoire à l'exposition de Turin, 1911. — Siehe ebenfalls die Arbeiten von K. W. Wagner: „Die Oberschwingungen elektrischer Schwingungskreise.“ Archiv für Elektrotechnik, 1912, Seite 47.

des durch den Leiter gebildeten Kondensators ist. Wie Sartori ¹⁴⁾ sagt, haben wir hier Analogie mit einem elastischen Sack, der eine gegebene Flüssigkeitsmenge aufnehmen soll, und dessen Wandungen daher einen um so grösseren Widerstand haben sollten, je kleiner das Volumen des Sackes ist. Es geht daraus hervor, dass die Ueberspannungen, die auf das plötzliche Oeffnen von Schaltern zurückzuführen sind, bei Freileitungen mehr befürchtet werden müssen als bei Kabeln.

In einer 8000 Volt Anlage, die wir kennen, und die durch eine Leitung von ca. 500 Meter Länge gespeist wird, gibt das plötzliche Oeffnen der automatischen Schalter häufig zu Lichtbögen Anlass, die zwischen den Phasen über eine Distanz von 30 cm entstehen. Die Leistung des Netzes beträgt rund 20 000 kVA, während die betrachtete Leitung rund 5000 kVA führt.

Lichtbogen nach der Erde und ihre Folgen. (Arhing Ground). — Der plötzliche Erdschluss eines Punktes eines Stromkreises kann in andern Punkten des gleichen Stromkreises charakteristische Ueberspannungen hervorrufen. Wenn der Weg nach der Erde frei ist, so entsteht während des Erdschlusses oft nur eine konstante Erhöhung des Potentials der andern Phasen oder Leiter, bezogen auf das Potential der Erde.

Im allgemeinen aber, und besonders wenn es sich um ein Kabelnetz handelt, erzeugt der Erdschluss, der durch Vermittlung eines Lichtbogens erfolgt, Resonnanzen in Netzteilen, die sich oft in beträchtlicher Entfernung vom Erdschluss befinden.

Der gegen Erde entstehende Lichtbogen wirkt nach Steinmetz ¹⁵⁾, wie ein wirklicher Schwingungserzeuger, der die schwingungsfähigen Teile des Netzes in Resonanz versetzt.

Um dem Leser ein Bild von der Ordnungsgrösse der Ueberspannungen zu machen, die auf diese Weise erreicht werden können, wollen wir nachstehend die Beobachtungen erwähnen, die wir selbst im Freileitungsnetz von Altdorf (Schweiz) machen konnten. Von der Zentrale Amsteg (Gotthard) geht eine Drehstrom-Kraftübertragung ab gegen die Zentrale Rathausen (Luzern). Die Leitung besteht aus 6 Drähten und wird mit der Spannung von 42 000 Volt betrieben. Die Entfernung zwischen den beiden genannten Zentralen beträgt 70 Kilometer. Wenn in einer Entfernung von 40 oder 50 Kilometer von der Zentrale Amsteg durch einen überspringenden Lichtbogen ein Erdschluss erfolgt, werden häufig in der Zentrale selbst Lichtbögen von 50 cm Länge zum Auslösen gebracht und zwar zwischen den einmündenden Drähten und einer Eisenkonstruktion der Schaltanlage. Findet der oben erwähnte Erdschluss in einer Entfernung von nur 15 oder 20 Kilometer von der Zentrale Amsteg statt, so sind in derselben in keiner Weise die genannten Wirkungen zu konstatieren. Dagegen machen sie sich nun auf gleiche Art am andern Ende der Leitung, in der Zentrale Rathausen bemerkbar.

Wie man weiss, können diese Erdungs-Lichtbögen an Freileitungen auf verschiedene Weise über die Isolatoren hinweg ansprechen. Aehnliche Erscheinungen werden durch den Bruch von Isolatoren, Drähten oder Kabeln hervorgerufen, diese gehören, wenn wir sachlich sein wollen, zu den gefährlichsten Vorgängen in elektrischen Verteilungsnetzen. Vorgänge, die analog sind den Wasserschlägen in hydraulischen Druckleitungen.

Es können auch hohe Ueberspannungen hervorgerufen werden, ohne dass in einem Punkt der Leitung eine vollständige Unterbrechung eintritt. Es genügt eine plötzliche Belastungsänderung. Die hiedurch veranlasste Ueberspannung ist eine natürliche Folge der Störungen in der Verteilung der elektromagnetischen Energie der Leitung.

Die maximale Ueberspannung, die auf diese Art erzeugt wird, hat, wie man weiss, einen theoretischen Wert von ¹⁶⁾

¹⁴⁾ G. Sartori: „La Technique Pratique des Courants Alternatifs.“ (1913).

¹⁵⁾ C. P. Steinmetz: „Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers.“ (1905.) In einem Kabelnetz von 11 000 Volt, mit 3700 kVA belastet, wurde nach derartigen Vorgängen auf Grund von erfolgten Durchschlägen das Vorhandensein von Ueberspannungen der Ordnungsgrösse 80 000 Volt nachgewiesen.

¹⁶⁾ Formel von Kennelly: E. T. Z. 1906, Seite 897.

$$E_{\max} = I_0 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

L und C bedeuten dabei die Selbstinduktion und die Kapazität des betrachteten Stromkreises pro Längeneinheit.

Es geht daraus hervor, dass die theoretische maximale Ueberspannung unabhängig von der angenommenen Normalspannung ist, nehmen wir für $\sqrt{\frac{L}{C}} = 500$, so würde beim plötzlichen Abschalten von 100 Amp. eine Ueberspannung von 50 000 Volt entstehen. Vorstehender Wert stellt den ungünstigsten Fall dar und würde etwa einem heftigen Kurzschluss in der Leitung entsprechen. Die Ueberspannungen, die durch genannte Vorgänge erzeugt werden, erreichen also nur selten den oben angegebenen Wert. Zudem kommt noch der Einfluss der Dämpfungsfaktoren hinzu, von denen wir sofort sprechen werden. Immerhin müssen die Werte, die solche Ueberspannungen erreichen können, für die Isolierungen gleichwohl als gefährlich betrachtet werden.

6. Kapazitätserscheinungen.

Die Kapazität der Leitungen oder der Wicklungen kann eine Quelle von Ueberspannungen sein; nicht nur der eventuellen Resonanzgefahr wegen; wir denken vielmehr an die charakteristischen Wirkungen, die an die Kapazität gebunden sind.

Eine der ersten und bekanntesten dieser Wirkungen ist die Spannungserhöhung am Ende von leerlaufenden Freileitungen und langen Kabeln, eine Folge der durch den Ladestrom bedingten ungleichmässigen Potentialverteilung längs des Leiters.¹⁷⁾

Der Einfluss der Kapazität der Wicklungen kann ebenfalls bewirken, dass in gewissen Punkten eines sekundären Stromkreises Spannungen entstehen können, die der primären Spannung gleich sein können. So war es uns möglich, an Transformatoren von 60 000/15 000 Volt, die nur mit einer Phase an das Netz angeschlossen waren, auf der sekundären Seite eine dauernde Ueberspannung von 26 000 Volt zwischen Phasen und Erde zu beobachten. (Fig. 9.)

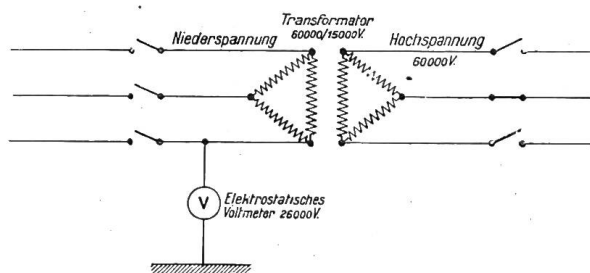


Fig. 9.

7. Allgemeine Bestimmung und Klassifizierung der Ueberspannungen und deren Grössenordnung.

Die vorstehenden Betrachtungen erlauben uns, die Ueberspannungen zu bestimmen, die in einem von einer Wanderwelle durchflossenen Stromkreis entstehen.

Wir haben zwei Arten von Ueberspannungen; die ersten mit grosser Amplitude im radialen Sinn des Leiters rufen aus diesem Grunde eine grosse Potentialdifferenz zwischen Leiter und Erde oder zwischen den einzelnen Leitern hervor. Die zweite Art Ueberspannung wirkt im axialen Sinne des Leiters und ist dadurch charakterisiert, dass man im Stromkreis zwei sehr benachbarte Punkte vorfindet, zwischen denen eine erhebliche Potentialdifferenz vorhanden ist.¹⁸⁾

Wir werden also nach Pfiffner¹⁹⁾ mit dem Ausdruck „Ueberspannung“ jede Aenderung bezeichnen, die der Wert des Potentials in einem beliebigen Punkt der Anlage erleidet

¹⁷⁾ Rössler: E. T. Z. 1905. No. 31.

¹⁸⁾ G. Giles: „Les accidents dans les réseaux électriques.“ Vortrag gehalten im Verein der aus der Schule von Montefiore hervorgegangenen Ingenieure. (1912.)

¹⁹⁾ E. Pfiffner: Elektrotechnik und Maschinenbau. Wien. 1912, No. 47, Seite 48 und 49.

und die darauf ausgeht, den dem normalen oder dem stationären Zustand zugehörigen Wert des Potentials im radialen oder axialen Sinne des Leiters zu übersteigen. Wir müssen also nicht nur die Amplitude der Wanderwelle berücksichtigen, sondern auch ihre Form, d. h. ihre Verteilung über die von ihr durchflossenen Stromkreise.

Grössenordnung der Ueberspannungen. Die Amplitude der in den Verteilungsnetzen beobachteten Ueberspannungen ist sehr veränderlich; sie hängt von einer beträchtlichen Anzahl Faktoren ab und es ist schwierig, diesbezüglich absolute Gesetze aufzustellen. In gewissen Fällen erreichen die Ueberspannungen so hohe Werte, dass über ihr Zustandekommen von gewissen Autoren Zweifel geäussert werden, und von gewisser Seite hartnäckig die Existenz dieser Ueberspannungen verneint wird.²⁰⁾ Im übrigen muss man bekennen, dass man sich fast überall vollständig falsche Vorstellungen machte über die Grössenordnung der in den verschiedenen Fällen aufgetretenen Ueberspannungen. Der beste Beweis hierfür ist, dass man bei der Konstruktion des sämtlichen elektrischen Materials heutzutage viel höhere Sicherheitskoeffizienten annimmt, als ehemals.²¹⁾

Man trifft in elektrischen Anlagen Ueberspannungen, die ausnahmsweise bis auf 150 000 und 200 000 Volt steigen können.²²⁾ Wir haben weiter oben als Beispiele einige Fälle angegeben, wo wir selbst das Vorhandensein von Ueberspannungen dieser Ordnungsgrösse kontrollieren konnten. Wir wollen diese Beispiele mit einigen Worten wieder auffrischen: In einer 8000 Volt-Anlage sprachen infolge atmosphärischer Vorgänge Hörner an, die für die dreifache Normalspannung eingestellt waren;²³⁾ in einer Gleichstromleitung von 1500 Volt, die ein sehr gebirgiges Gelände durchläuft, wurde eine Ueberspannung von 40 000 Volt bemerkt²⁴⁾; ein Lichtbogen von 30 cm Länge bildete sich infolge von Resonanzerscheinungen in einer Freileitung von 45 000 Volt; beim Abschalten einer Leitung, die mit einem Isolationsdefekt behaftet war, entstanden Lichtbogen von 50 cm Länge. Neben diesen extremen Fällen der Ueberspannungen darf jedoch der Leser nicht vergessen, dass es möglich ist, die Wicklungen eines für Anschluss an eine Leitung von 40 000 oder 50 000 Volt gebauten Transformators mit einer sehr geringen Ueberspannung, 300 oder 400 Volt, durchzuschlagen, wenn sich infolge ungleichmässiger Verteilung des Potentials in einer Spule das Maximum und das Minimum der Welle zwischen zwei benachbarten Windungen der Wicklung befinden.

Fassen wir unsere Ausführungen zusammen, so können wir sagen, dass man in den Verteilungsnetzen Ueberspannungen findet, deren absoluter Wert die Normalspannung um ein mehrfaches übersteigt. Daneben müssen jedoch noch die Wanderwellen mit sehr steiler Stirne oder hoher Frequenz und geringer Amplitude in Berücksichtigung gezogen werden, da dieselben ebenfalls zerstörende Wirkungen hervorrufen. Schliesslich trifft man zwischen diesen beiden Grenzfällen noch Ueberspannungen, deren Amplitude durch Dämpfungsfaktoren beträchtlich vermindert wurde, die aber trotzdem noch im Stande sind, in den Anlagen gefährliche Betriebsunfälle zu verursachen.

8. Charakteristische Betriebsunfälle, die durch die Vorgänge der Wanderwellen hervorgerufen werden.

Es würde über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen, wollten wir die Vorgänge der Fortbewegung elektrischer Wellen an Leitungen theoretisch erläutern, wir müssen hier auf die wohlbekannten Arbeiten von K. W. Wagner, Petersen, Rüdenberg, Pfiffner u. a.

²⁰⁾ Siehe die Studien von Schrottke in der Elektrotechnischen Zeitschrift 1910, Seite 443 und folgende.

²¹⁾ Der Leser kann dies konstatieren, wenn er die früheren Vorschriften des Verbandes Deutscher Elektrotechniker mit den am 1. Januar 1914 in Kraft getretenen vergleicht. Siehe auch Elektrotechnische Zeitschrift vom 23. Januar 1913: „Vorläufige Richtlinien für die Konstruktion und Prüfung von Wechselstrom-Hochspannungsapparaten, von einschliesslich 1580 Volt nach aufwärts.“

²²⁾ Siehe die bereits weiter oben zitierten Arbeiten von C. P. Steinmetz.

²³⁾ Siehe „La Technique Moderne, Band V, No. 11 (vom 1. Dezember 1912), Seite 385.

²⁴⁾ Vortrag an der Universität von Grenoble (1913).

verweisen, nicht zuletzt auch auf die sehr eingehende Arbeit von Prof. Landry, Lausanne, die z. Z. in dieser Zeitschrift erscheint. Wir haben weiter oben schon dargetan, welchen Einfluss die elektrischen Konstanten des Leiters auf die Erscheinungsform der elektrischen Welle haben; es bliebe noch die Behandlung der Reflexions- und Dämpfungserscheinungen bei plötzlichen Aenderungen der Konstanten des Systems durch den Einbau von Widerständen, Induktivitäten und Kapazitäten. Diese Erscheinungen lassen sich bei sinngemäss vorgenommenen Annäherungen in so einfache Formeln kleiden, dass wir deren Inhalt wohl bereits als bekannt voraussetzen dürfen. Wir beschränken uns daher auf die Erläuterung einiger typischer aufgetretenen Störungserscheinungen.

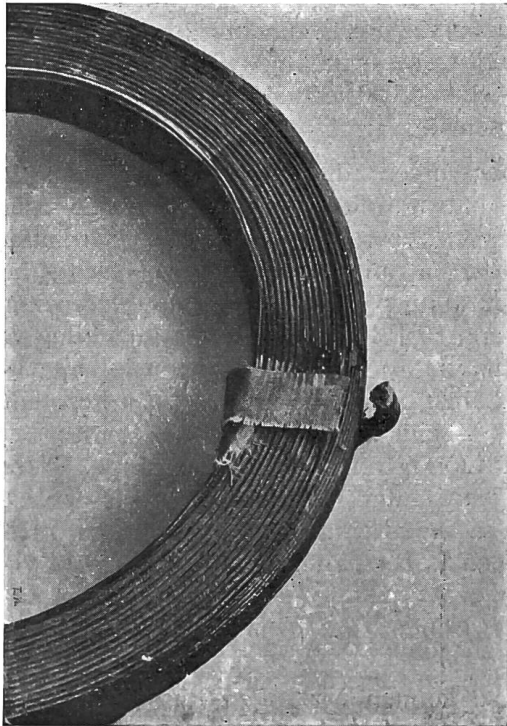


Fig. 10.

Figur 10 zeigt die Spule eines Transformators von 27 000 Volt, die infolge einer atmosphärischen Entladung durchgeschlagen wurde. Wie ersichtlich wurde die Spule durch eine Hochfrequenzerscheinung oder durch eine Welle mit steiler Stirne beschädigt, da zwischen den einzelnen Windungen starke Potentialdifferenzen entstanden sind, die zu Kurzschlüssen zwischen den Drähten geführt haben.

Die Wellenreflexions-Vorgänge verursachen oft das Durchschlagen der Einführungsisolatoren für Hochspannungsschalter und Hochspannungstransformatoren. In Figur 11 ist ein durchschlagener Transformatorenisolator für 10 000 Volt abgebildet. Der Durchschlag erfolgte, wie man sieht, unterhalb des Transformatorendeckels (8 mm Porzellandicke). Es ist noch zu erwähnen, dass die Wicklung des Transformators nicht beschädigt wurde. Als Beweis dafür, dass es sich nicht um einen Ausnahmefall handelt, mag Figur 12 gelten, welche die Porzellaneinführung eines 10 000 Volt Transformators darstellt. Die Konstruktion dieser Einführung ist von derjenigen des soeben erwähnten Isolators verschieden; der Durchschlag erfolgte auf gleiche Weise.

Verschiedene Beispiele lassen erkennen, welche hohe Werte der Ueberspannung bisweilen am Reflexionspunkt der Wanderwellen entstehen. Figur 13 stellt die Porzellaneinführung eines 45 000 Volt Transformators dar, die durch eine Welle von grosser Amplitude durchgeschlagen wurde. Der Lichtbogen musste in diesem Fall folgende Strecken überwinden: 2 cm Porzellan, 5 mm Luft, 8 mm Karton und 3—4 cm Luft. Die Transformatorwicklung wurde, wie in den vorhergehenden Fällen, nicht beschädigt.

Figur 14 stellt eine Porzellaneinführung für einen 5000 Volt-Schalter dar, welche auf interessante Art durchgeschlagen wurde. Das durch Figur 15 dargestellte Schema zeigt die verschiedenen Phasen dieses Betriebsunfalles, über den wir nachstehend noch einige Worte der Erklärung geben wollen:

Ein direkter Blitzschlag fällt in eine Niederspannungsleitung (120 Volt). Der am Ende dieser Linie aufgestellte Transformator von 24 kVA wirkt wie eine Ruhmkorff'sche Spule; die Sicherung „Si“ brennt durch, gleichzeitig explodiert der Kabelendverschluss *a* und der Einführungsisolator des Schalters *I* wird zerbrochen. Schliesslich wird die letzte Transformatorenspule gegen Eisen durchgeschlagen. Immerhin war es schwierig in Bezug auf die Beschädigung des Generators irgendwelche Schlüsse zu ziehen, denn die Wicklung wies Isolationsfehler auf.

Die Vorgänge erhalten ein ganz verschiedenes Aussehen, wenn es sich um eine schwingungserzeugende Entladung mit grosser Amplitude handelt. Figur 16 zeigt den Isolator

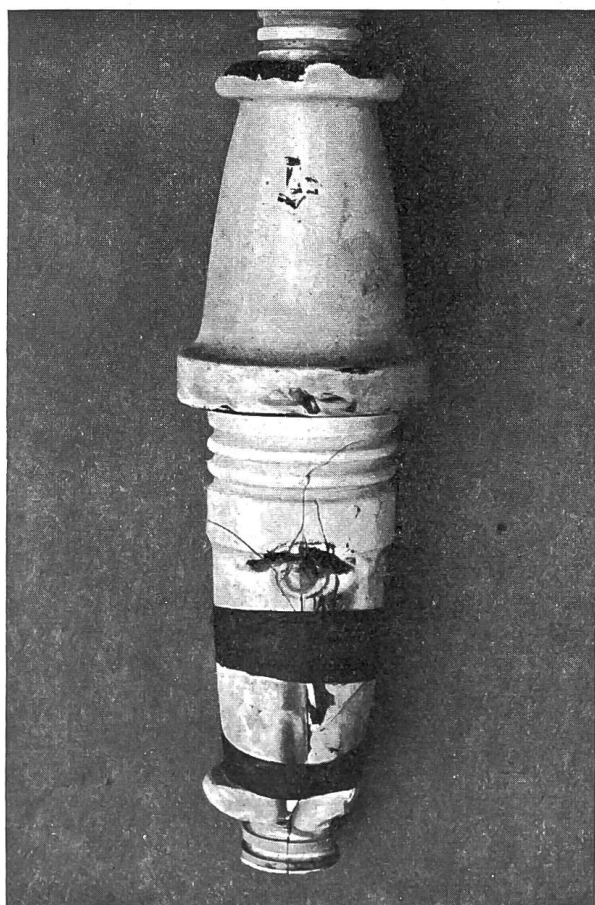


Fig. 11.

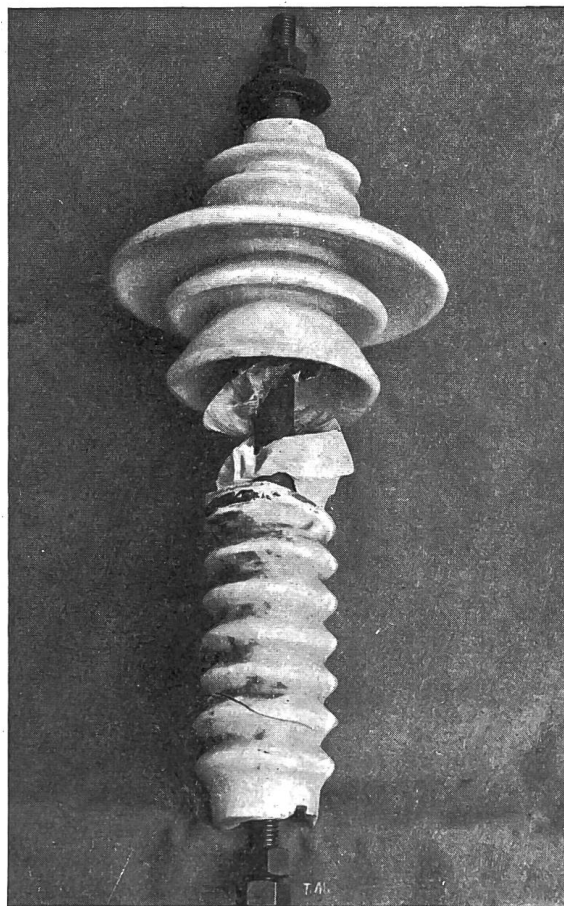


Fig. 12.

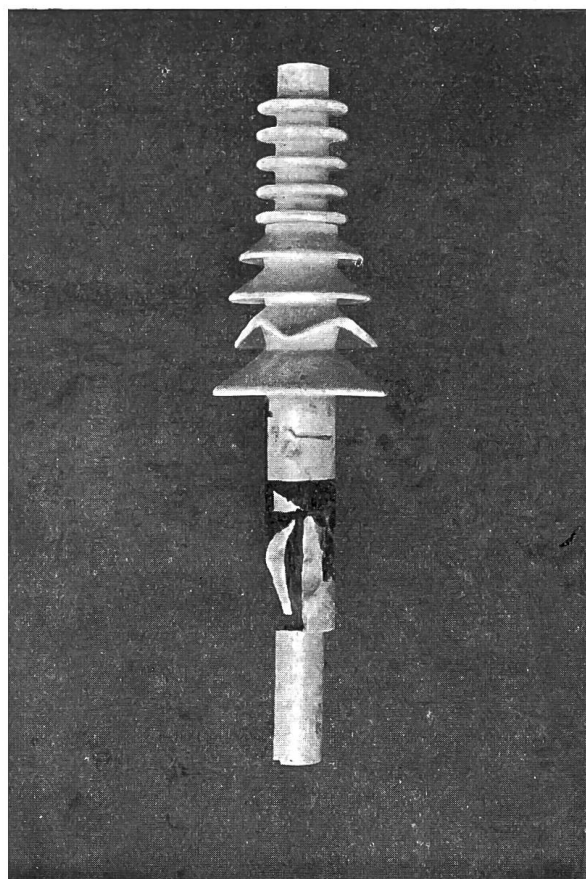


Fig. 13.

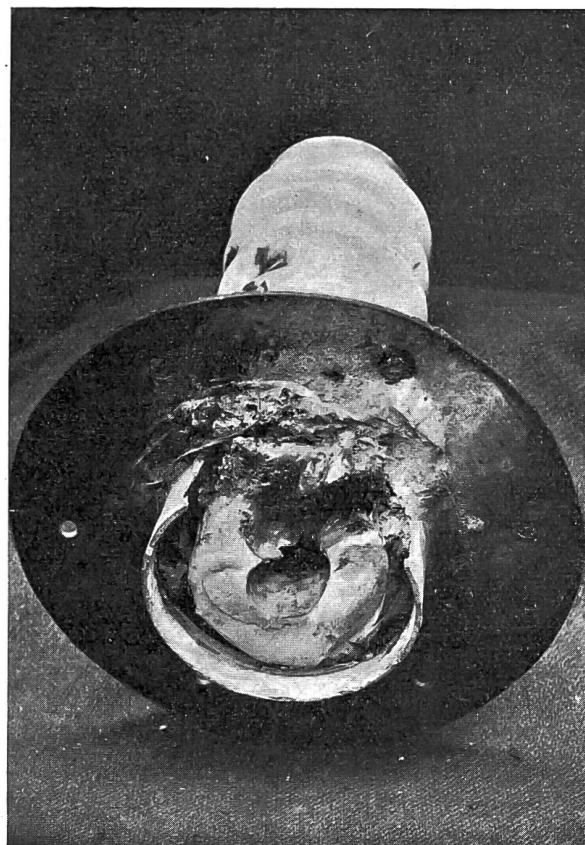


Fig. 14.

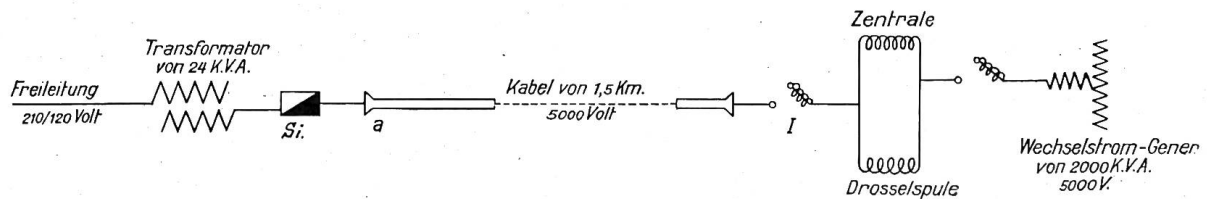


Fig. 15.

eines im Freien aufgestellten Schalters für 10000 Volt. Während eines Gewitters kam zwischen zwei Drähten ein Kontakt zustande und es wurde derart in der Nähe des genannten Schalters ein direkter Kurzschluss der ganzen Anlage erzeugt. Als sich die Drähte plötzlich trennten, fand eine augenblickliche Unterbrechung eines Kurzschlusses statt, was Anlass gab zum Entstehen eines oscillierenden Ausgleich-Vorganges sehr grosser Spannungs-Amplitude.

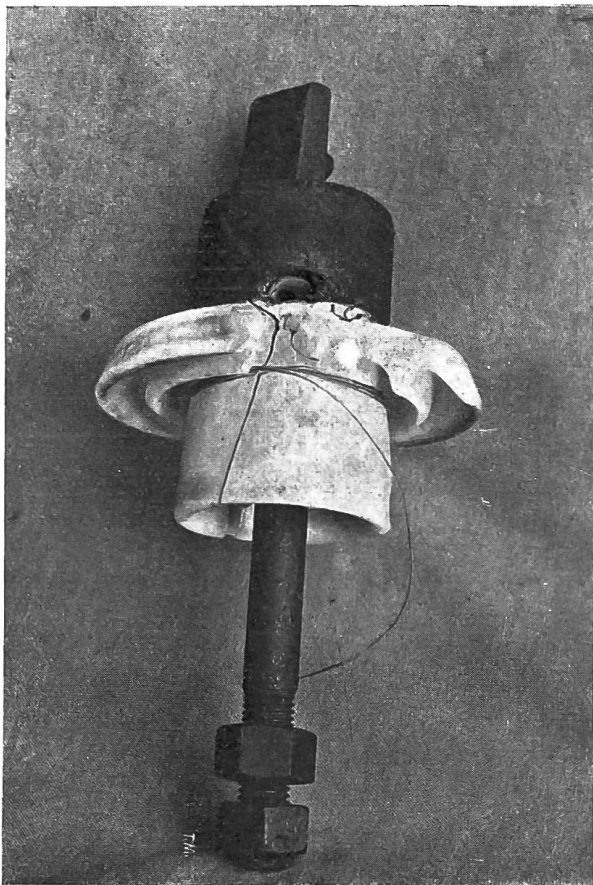


Fig. 16.

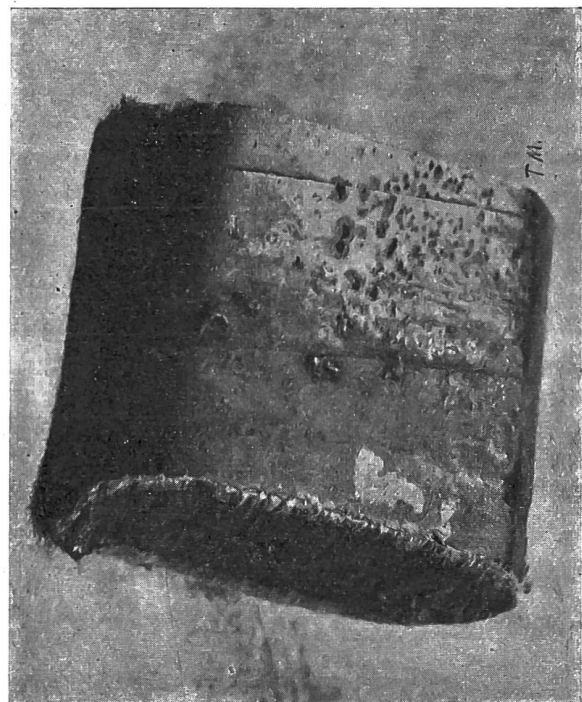


Fig. 17.

Im Anfang des letzten Jahres haben wir den Fall eines Betriebsunfalles veröffentlicht ²⁵⁾ der ziemlich typisch ist. Die Ursache war ein oscillierender Ausgleichsvorgang, der durch ungedämpfte Hörnerblitzableiter hervorgerufen wurde und durch die Generatorentwicklung hindurch einen geschlossenen Stromkreis fand. (Figur 17.)

Die zerstörenden Wirkungen der nach der Erde überspringenden Lichtbogen gehen klar aus der Figur 18 hervor: ein Isolator einer Leitung von 10000 Volt wird in Glas verwandelt, infolge der beträchtlichen Temperaturerhöhung, die an der Kurzschlussstelle auftritt.

²⁵⁾ Bulletin de l'Association Italienne des Electriciens. 1913.

9. Kurze Bemerkungen über den Schutz der Anlagen gegen Ueberspannungen.

Von demjenigen Standpunkt aus betrachtet, der für die Gefährdung der Lebensdauer des Materials massgebend ist, unterscheiden wir zwei Arten von in Verteilungsnetzen entstehenden Spannungswellen; die einen sind gefährlich wegen ihrer grossen Amplitude, d. h. sie geben Anlass zu grossen Potentialdifferenzen zwischen den einzelnen Leitern oder zwischen Leiter und Erde; die andern Wellen sind gefährlich wegen der grossen Potentialdifferenz, die sie zwischen zwei benachbarten Punkten eines Stromkreises hervorrufen können. Gewisse Wellen können gleichzeitig beide vorstehend genannten Merkmale besitzen.

Wenn wir jetzt die erstgenannten Wellen näher betrachten und ihre Wirkungen unschädlich machen wollen, so müssen wir Apparate vorsehen, welche die Amplitude dieser Spannungswelle derart begrenzen, dass sie niemals einen für die Sicherheit des Materials gefährlichen Wert erreichen können. Die zulässige Amplitude wird gleich sein der Netzspannung, multipliziert mit x , wobei x der für das Material angenommene Sicherheitskoeffizient ist.

Diese Wellen mit grosser Amplitude werden im allgemeinen durch heftige Störungen des Gleichgewichtszustandes des Verteilungsnetzes hervorgerufen, wie z. B. Unterbrechung von Kurzschlüssen, falsche Parallelschaltung, Erdschluss, Resonanz etc.

Eine gewisse Anzahl dieser Vorgänge bringen entweder die ganze oder einen Teil der Energie der an das Netz angeschlossenen Zentralen ins Spiel. Es ist also klar, dass ein wirksamer Schutzapparat imstande sein muss, momentan eine Energiemenge gleicher Ordnungsgrösse abzuleiten. Der Widerstand des Schutzapparates muss also einen der Impedanz des Netzes entsprechenden Wert besitzen.

Um diese Bedingungen zu erfüllen, ist man gezwungen, Apparate mit Funkenstrecken zu verwenden, denn dieselben besitzen einen kleinen Widerstand und würden selbst falls sie direkt im Netz eingeschaltet wären, die ganze Energie durchfliessen lassen. Andererseits können solche Apparate wegen ihres geringen Widerstandes nur allmählich in den Stromkreis eingeführt werden, in dem Masse, wie sich die Welle entwickelt (Giles-Ventil), denn im gegenteiligen Fall würden die betreffenden Apparate im Netz die Wirkung eines plötzlichen Kurzschlusses hervorrufen und würden dadurch Anlass geben zu Resonanzerscheinungen oder gefährlichen Ueberspannungen.

Es ist einleuchtend, dass jede Anordnung, die auf der Reihenschaltung einer Funkenstrecke und einer Kapazität beruht, als Schutzapparat zurückgewiesen werden muss, denn derselbe wäre eine Hochfrequenzquelle, analog wie sie zur Erzeugung der für drahtlose Telegraphie in Frage kommenden Wellen verwendet wird. Man würde also damit gerade das Entgegengesetzte von dem erreichen, das wir wollen: die Wellen solcher Natur unterdrücken.

Einen besondern Fall von Wellen grosser Amplitude stellen die Resonanzerscheinungen dar. Sie haben, wie wir gesehen haben, ihre Ursache darin, dass die Kapazitäts- und

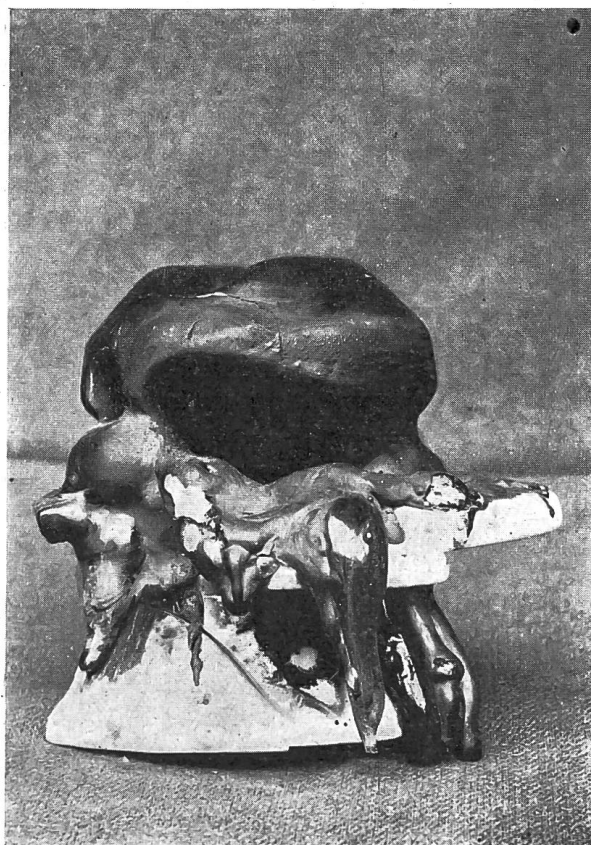


Fig. 18.

Selbstinduktionskonstanten des Netzes oder eines Teiles desselben derart sind, dass sich die verschiedenen Spannungsimpulse aufeinanderlagern. Auf diese Weise kann eine überaus hohe Spannung entstehen, die viele Male die normale Netzspannung übersteigt. Es ist klar, dass, wenn diese Resonanzbedingungen permanent sind, kein Apparat wirksam sein kann, denn derselbe müsste ständig einen Teil der Netzenergie absorbieren, was praktisch undurchführbar ist. Man gelangt hier zu einer Behebung der Störung, indem man die Konstanten des Netzes ändert. Eines der Mittel besteht darin, die Kapazität der Wicklungen mit einem Ohm'schen Widerstand geringer Grösse in Nebenschluss zu schalten. In der Praxis verbindet man den neutralen Punkt mit der Erde, unter Zwischenschaltung eines Ohm'schen Widerstandes von passendem Wert.

Untersuchen wir nun, was mit den an zweiter Stelle erwähnten Wellen geschieht. Wir haben es hier mit Wellen zu tun, die daher gefährlich sind, weil sie eine steile Stirne aufweisen und deshalb zwischen zwei benachbarten Punkten eines Leiters verhältnismässig grosse Potentialdifferenzen hervorrufen können. Diese sind durch den Schutzapparat soweit zu vermindern, dass ihr Wert in richtigem Verhältnis zur Potentialdifferenz steht, mit der die Isolation ohne Schaden zu nehmen noch beansprucht werden kann. Andernfalls läuft man Gefahr, zwischen benachbarten oder übereinandergelagerten Windungen einer Wicklung Spannungsdifferenzen von einigen tausend Volt hervorzurufen, während die Isolation selbst nur für einige hundert Volt vorgesehen ist.

Da die Isolation zwischen den einzelnen Windungen eines Apparates natürlich in keinem Verhältnis zur Netzspannung steht, ist es illusorisch, einen Schutzapparat aufzustellen, der bei seiner Normalspannung, oder bei einer höhern, anspricht. Die Schlussfolgerung ist, dass für Wellen dieser Art jeder Apparat mit Funkenstrecken (Hörner, elektrolitische Blitzableiter) wirkungslos ist, weil ein solcher notwendigerweise für eine höhere Spannung als die Betriebsspannung eingestellt werden muss. Man muss vielmehr ein Mittel finden, das die Potentialdifferenz zwischen benachbarten Punkten des Leiters vermindert, d. h. man muss die Wellenstirne ausstrecken. Der einzige Apparat, der diese Rolle vollständig durchführen kann, ist der Kondensator.

Man kann das Auftreten von Wellen mit steiler Stirne mit den Wasserschlägen in einer hydraulischen Druckleitung vergleichen. Den zerstörenden Wirkungen solcher Wasserschläge beugt man derart vor, dass man in die Leitung ein elastisches Glied einfügt (Wasserschloss), welches die schwingende Energie aufnimmt, um sie dann langsam wieder in die Druckleitung abzugeben.

Der Kondensator spielt die Rolle eines Wasserbehälters mit elastischen Wänden, der die steil ansteigende Welle aufnimmt, um sie mit verflachter Wellenstirne ans Netz zurück zu geben ohne dass dabei Energie vernichtet werden muss. ²⁶⁾

²⁶⁾ Diesbezüglich wollen wir in Erinnerung bringen, dass die Société Générale des Condensateurs Electriques in Freiburg (Schweiz) seit dem Jahre 1904 die Kondensatoren und die elektrischen Ventile als Schutzapparate für Verteilungsnetze verwendet. Die Erfahrungen hatten also die vorstehend zusammengefassten Folgerungen der Theorie bestätigt, und dies sogar bevor die Theorie vollständig aufgestellt war.