

Überspannungen und Überspannungsschutz.

Von

W. Petersen, Darmstadt.



Sonderabdruck aus der
ELEKTROTECHNISCHEN ZEITSCHRIFT

Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH W. 9.

1913. Heft 7, 8, 9, u. 10

ISBN 978-3-662-22880-7 ISBN 978-3-662-24822-5 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-24822-5

Überspannungen und Überspannungsschutz.¹⁾

Von **W. Petersen**, Darmstadt.

I. Einführung.

Mit der stetigen Entwicklung der Hochspannungstechnik und dem fast überraschend hat der Überspannungsschutz nicht gleichen Schritt gehalten. Von den Überspannungsschäden dringt allerdings verhältnismäßig wenig über die davon betroffenen Kreise hinaus. Wer aber Gelegenheit hat, auf diesem Gebiete praktisch tätig zu sein, der weiß, welche Unsummen von moralischen und finanziellen Schädigungen entstehen, der weiß, welche Unsumme von zum Teil fruchtloser Arbeit aufgewendet wird, um in vielen Betrieben Ruhe zu schaffen.

Ich male hierbei durchaus nicht zu schwarz. Zwar gibt es manche Betriebe, welche nie von diesen Schädigungen heimgesucht werden und welche mit vollkommener Sicherheit arbeiten. Hierbei denke ich in erster Linie an die meisten Kabelnetze. Dagegen haben ganz besonders Freileitungsanlagen zu leiden; der Ansicht, die sich allmählich herausgebildet hat, daß gegen die atmosphärischen Störungen nicht aufzukommen ist, möchte ich schon hier mit aller Bestimmtheit entgegenreten.

Wie jede technische Frage, muß auch die Überspannungsfrage eine Lösung haben. Der beste Beweis dafür, daß wir von dieser Lösung teilweise noch weit entfernt sind, ist wohl auf der einen Seite die Tatsache, daß es bis vor kurzem für jemand, der auf diesem Gebiet tätig war, zum guten Ton gehörte, die Mitwelt mit einer eigenen Überspannungstheorie zu beglücken, auf der andern Seite

die Tatsache, daß es kaum eine Gesellschaft gibt, die mit gutem Gewissen vollständige Gewähr für einen überspannungssicheren Betrieb leisten kann.

Der Grund für die mangelhafte Erkenntnis der Überspannungserscheinungen ist wohl hauptsächlich darin zu suchen, daß die theoretischen Grundlagen noch viel zu wenig bekannt sind. Für die theoretische Behandlung war der Versuch ein Unsegen, die Überspannungserscheinungen mit Hilfe von Stromkreisen zu erklären, in welchen Kapazität und Induktivität wie in einem Thomsonschen Schwingungskreis getrennt für sich nebeneinander bestehen. Erst das vollständige Verlassen dieser Methode hat zu einem Wandel in der theoretischen Auffassung geführt und wird auch jedenfalls die endgültige Lösung der Überspannungsfrage in sich bergen. Ein weiterer Grund für die ungenügende Erforschung dürfte wohl der beklagenswerte Brauch sein, daß die meisten Überspannungsfälle unbekannt bleiben und in den Akten der Betroffenen begraben werden.

Es ist das viel zu wenig bekannte und gewürdigte Verdienst K. W. Wagners, die Grundlagen für die Behandlung einer großen Reihe von Überspannungsfragen gegeben zu haben. Obgleich seine mathematischen Entwicklungen von einer ausgezeichneten physikalischen Darstellung begleitet sind, haben die Ergebnisse seiner Arbeiten nicht den verdienten Eingang in die Praxis gefunden. Seine Arbeiten, insbesondere sein Buch,²⁾ sind um so höher einzuschätzen, als sie eine in sich abgeschlossene Darstellung eines Gebietes gegeben

¹⁾ Nach einem im Elektrotechnischen Verein am 21. I. 1913 gehaltenen Vortrag. Vgl. „ETZ“ 1913, S. 220.

²⁾ K. W. Wagner, „Elektromagnetische Ausgleichsvorgänge.“ Leipzig. Verlag von B. G. Teubner.

haben, welches bis dahin der technischen Welt so gut wie unbekannt war.

Mit ganz vereinzelter Ausnahmen dürfen wir die Überspannungserscheinungen nur als Vorgänge behandeln, welche sich auf Leitergebilden mit verteilter Induktivität und Kapazität abspielen. Erst die vollkommene Erkenntnis des Verhaltens der Wanderwellen und der in dieses Gebiet fallenden Schwingungserscheinungen und deren Folgen kann uns das ersehnte Licht bringen.

Als größtes Hemmnis für eine zweckentsprechende Entwicklung des Überspannungsschutzes müssen wir den Grundsatz der Ableitung von Überspannungen bezeichnen. Ein großer Teil der vorhandenen Überspannungsschutzmaßnahmen sind unter dieser, ich will den scharfen Ausdruck benutzen, Zwangsvorstellung entstanden. Im Gegensatz hierzu stellen wir uns auf den Standpunkt, daß die Ableitung von Überspannungen zunächst etwas ganz nebensächliches ist. Der Überspannungsschutz soll schon in der Hauptsache durch die vorbeugenden Maßnahmen bei dem Entwurf eines Netzes dadurch geschaffen werden, daß in einem Netze jede trennende Schranke beseitigt wird. Ein großer Teil der Überspannungen entsteht dadurch, daß einzelne durch Induktivitäten abgetrennte Netzteile auf übermäßig hohe Spannungen gebracht werden. Die hierzu nötige Energie wird anderen Netzteilen entnommen. Unterbinden wir diese Möglichkeit, so verhindern wir auch die Möglichkeit der Abwanderung der Energiebeträge einzelner Netzteile auf eng begrenzte andere Netzteile.

Während durch diese Vorkehrungen die einzelnen Netzteile und das Netz als Ganzes gegen Überspannungen geschützt werden, bedürfen die an das Netz angeschlossenen Apparate eines besonderen Schutzes, nämlich des Schutzes gegen Spannungssprünge. Die Schutzapparate sollen in erster Linie diesem Zwecke dienen, sie sollen den schroffen Anstieg auftretender Wanderwellen in einen sanften umbilden. Gleichzeitig können diese Schutzapparate auch noch der Aufgabe gerecht werden, die Höhe von auftretenden Wanderwellen wenigstens in beschränktem Maße herabzusetzen. Sie erfüllen schließlich noch eine dritte Aufgabe grundsätzlicher Natur, nämlich die Aufgabe, auftretende Wellen in das Netz zurückzuwerfen. Für den Überspannungsschutz stellen wir mit als wichtigsten Grundsatz auf, nicht die Überspannungen abzuleiten, sondern auftretende Wellen in ihrer Wirkung für angeschlossene

Apparate unschädlich zu machen und diese Wellen in das Netz zurückzuwerfen. Die Energie dieser Überspannungen kann sich im Netze allmählich in Wärme verwandeln.

Als Rest von atmosphärischen Überspannungen verbleiben statische Ladungen, welche gleichmäßig über das ganze Netz verteilt sind. Diese statischen Ladungen sind ebenso wie die sich in Freileitungsanlagen langsam ausbildenden statischen Ladungen durch im Verhältnis sehr langsam wirkende Ableiter abzuführen. Erst an dieser Stelle wird der vorher angegriffenen Ableitung eine bescheidene, aber darum nicht weniger wichtige Aufgabe zugewiesen.

Es handelt sich allerdings nicht mehr um die Ableitung von eigentlichen Überspannungen, sondern um die Abführung von überflüssigen Ladungen, zu denen in der Regel nur sehr geringe Spannungserhöhungen gehören.

II. Überspannungen.

Nur in zwei Fällen ist es gestattet, die Kapazität eines Netzes durch eine Ersatzkapazität darzustellen, während ein Teil der Induktivität des Netzes zu der Induktivität der Stromerzeuger und der Transformatoren geschlagen wird, wenn überhaupt die Berücksichtigung der im Netze verteilten Induktivitäten bei der Unsicherheit der Schätzung der Maschineninduktivitäten Sinn hat. Diese beiden Fälle, nämlich Resonanzüberspannungen infolge von Maschinenharmonischen und Unterbrechungsüberspannungen, nehmen wir hier vorweg, um uns später nicht mehr mit ihnen zu beschäftigen.

Die Resonanzüberspannungen infolge von Maschinenharmonischen werden wohl in den seltensten Fällen auf eine ungradzahlige Harmonische in der Maschinenspannung zurückzuführen sein. Seit den Arbeiten von Zenneck, Strasser¹⁾ und Rogowski²⁾ wissen wir, daß unsere normalen Wechselstrommaschinen in der Regel eine ausgeprägte gradzahlige Harmonische mit Wellensprung als Nutenüberschwingung aufweisen. Das schwingungsfähige System, welches aus der Kapazität des Netzes und der Induktivität des Stromerzeugers dargestellt wird, ist in der Lage, unter dem Einfluß einer z. B. sechsfachen Harmonischen mit Phasensprung mit einer Frequenz zu schwingen, die einer dreifachen, fünffachen, siebenfachen usw. Harmonischen

¹⁾ Zenneck u. Strasser, „Annalen der Physik“, Bd. 20, 1906, S. 759.

²⁾ Rogowski, a. d. a. Stelle, S. 766. Vgl. auch Petersen, „Wechselstrommaschinen“, S. 53.

entsprechen würde. Das Netz führt unter dem Einfluß der gradzahligen Harmonischen Schwingungen aus, die man rechnerisch als erzwungene behandeln kann, die man aber gerade so gut als Eigenschwingungen auffassen darf.

Für die Nachrechnung der Resonanzfähigkeit ist die der Potierschen Charakteristik entnommene Induktivität mit etwa 90 bis 50 % ihres Wertes einzuführen. Je höher die Resonanzfrequenz ist, desto niedriger ist die einzuführende Induktivität. Liegen zwischen Netz und Maschine Transformatoren, so ist die Maschineninduktivität mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses der Transformatoren multipliziert auf die Oberspannungsseite umzurechnen. Für die Induktivität der Transformatoren kann die aus dem Kappschen Diagramm (Kurzschlußversuch) ermittelte Induktivität eingeführt werden. Wir bezeichnen mit:

L_g die Streuinduktivität (Potier) eines Generators,

L_t die auf die Oberspannungsseite bezogene Streuinduktivität des zwischen Generator und Netz liegenden Transformators,

$\frac{E_s}{E_n}$ das Verhältnis zwischen Sammelschienen- und Netzspannung.

Die Eigenfrequenz des Netzes mit der Gesamtkapazität C_n läßt sich dann nach der Formel

$$\nu' \sim \frac{1}{2\pi \sqrt{\left(L_g \left(\frac{E_n}{E_s}\right)^2 + L_t\right) C_n}} \quad (1)$$

schätzen.

Die Dämpfung eines derartigen Resonanzschwingungskreises ist sehr gering, so daß schwache Oberschwingungen sehr hohe Spannungen verursachen können. Die Gefahr einer derartigen Resonanzüberspannung ist jedoch außerordentlich klein, da nur in Netzen, in welchen ein schreiendes Mißverhältnis zwischen Generatorleistung und Ausdehnung des Netzes besteht, die Induktivität der Generatoren genügend hohe Werte erreichen kann. Unter etwa 300 Überspannungsfällen sind mir nur zwei Fälle bekannt, welche zweifellos auf derartige Resonanzerscheinungen zurückzuführen sind.

Mit Ableitern beliebiger Form ist gegen Resonanzüberspannungen nichts auszurichten, insbesondere können Funkenableiter eher noch mehr Unheil anrichten, als Schutz gewähren. Ist nicht die Möglichkeit gegeben, Generatoren mit wesentlich geringerer Induktivität aufzustellen, so hilft im äußersten Fall der Einbau

von verhältnismäßig großen Drosselspulen, zu denen parallel Ohmsche Widerstände zu schalten sind. Für den normalen Betriebswechselstrom wird diese Schutzanordnung (Abb. 1) so berechnet, daß die Verluste im

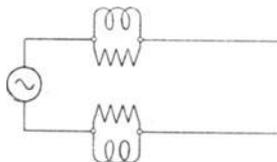


Abb. 1.

Parallelwiderstand nicht zu groß werden. Für die gefährliche z. B. fünffache Harmonische bietet diese Anordnung hauptsächlich einen effektverzehrenden Widerstand, da die fünfmal so große Induktanz der Drosselspule die höhere Harmonische dazu zwingt, in der Hauptsache über den induktionsfreien Widerstand zu fließen. Es ist unter allen Umständen möglich, in dieser Art eine für die Verhinderung von Resonanzüberspannungen ausreichende Dämpfung zu schaffen.

Bei der Berechnung von Unterbrechungsüberspannungen ist es wenigstens bei der Ermittlung von deren Höchstwert gestattet, wie bei den Resonanzüberspannungen mit dem Thomsonschen Schwingungskreis zu arbeiten. Es gelten die gleichen Grundsätze für die Berechnung der Induktivität. Nach bekannten Entwicklungen ist die höchstmögliche Überspannung

$$E_{\text{ü}m} = i \sqrt{\frac{L_g \left(\frac{E_n}{E_s}\right)^2 + L_t}{C_n}} \quad (2)$$

Hierin ist i die unterbrochene Stromstärke. Hinsichtlich der Bedeutung der anderen Buchstaben vgl. Gl. (1).

Die Unterbrechungsüberspannungen nehmen in der technischen Literatur einen ziemlich breiten Raum ein; sie sind meiner Überzeugung nach viel mehr gefürchtet, als sie es verdienen. Bei genauer kritischer Sichtung der auf Unterbrechungsüberspannungen zurückgeführten Überspannungsschäden kommt man zu dem Ergebnis, daß die Unterbrechungsüberspannungen in den seltensten Fällen die Störursache sind. Nur die Unkenntnis der durch Wanderwellen verursachten Resonanzüberspannungen von ungewöhnlicher Höhe ist der Grund dafür, daß den Unterbrechungsüberspannungen eine übertriebene Bedeutung beigemessen worden ist.

Schon kleinere Netze weisen in der Regel eine so große Kapazität auf, daß die Unterbrechungsüberspannungen sich in durchaus mäßigen Grenzen halten müssen. Unter vielen hunderten von Fällen von Überspannungen sind mir nur drei Fälle bekannt geworden, bei denen sich tatsächlich als Störungsursache die Unterbrechungsüberspannung feststellen ließ. In einem dieser Fälle handelte es sich um ein Werk von etwa 8000 KVA-Leistung, dessen ganze Netzkapazität durch die Kapazität einer 7 km langen Freileitung dargestellt war. Wenige Kilometer Kabel oder wenige Kilometer Freileitung mehr würden vollständig ausgereicht haben, um die Unterbrechungsüberspannungen in mäßigen Grenzen zu halten.

Wenn sich der unterbrochene Strom und die Spannung in Phase befinden, so ist die Gefahr einer überraschen Unterbrechung bei Ölschaltern überhaupt und bei Luftschaltern und abschmelzenden Sicherungen so gut wie ausgeschlossen. Nur die Abschaltung stark phasenverschobener Ströme erfolgt stets rascher als es dem normalen Verlauf der Stromwelle entspricht, so daß insbesondere leerlaufende Transformatoren, Induktionsmotoren usw. bei ihrer Abschaltung zu Unterbrechungsüberspannungen Anlaß geben. Die sehr hohen theoretischen Werte für die Unterbrechungsüberspannung auf einer Leitung mit dem Wellenwiderstande W

$$e = i \sqrt{\frac{L}{C}} = i W$$

dürften wohl nur auf dem Papier stehen bzw. nur bei der Unterbrechung relativ schwacher Ströme mit dieser Höhe auftreten. Während sich z. B. die ganzen Wanderwellenüberspannungen sehr leicht experimentell wiedergeben lassen, und während die experimentell ermittelten Überspannungen gut mit den rechnerisch vorausbestimmten übereinstimmen, ist es bis jetzt noch nicht gelungen, Unterbrechungsüberspannungen bei höheren Stromstärken als etwa 20 bis 40 Amp auch nur annähernd in der Höhe, wie es die Formeln verlangen, darzustellen.¹⁾ Es ist wohl anzunehmen, daß uns heute noch die Erkenntnis der Bedingungen fehlt, unter denen die Entstehung von Unterbrechungsüberspannungen bei höheren Stromstärken möglich ist. Vielleicht wird es gelingen, diese Bedingungen aufzudecken. Auf der anderen Seite wissen wir jedoch mit Bestimmtheit, daß die meisten der Unterbrechung von Kurzschlußströmen

zugeschriebenen Überspannungen nichts mit der Unterbrechung der Ströme zu tun haben, sondern auf Resonanzerscheinungen im Gefolge von Entladewellen zurückzuführen sind.

Wenn tatsächlich Unterbrechungsüberspannungen, wie es die theoretische Formel verlangt, auftreten, so pflanzen sich diese Überspannungen als Rechteckwellen mit schroffer Stirn fort und bergen dieselbe Gefahr in sich wie die später zu besprechenden Lade- und Entladewellen, denn diese Unterbrechungsüberspannungen sind nichts weiter als Ladewellen. Die bei der momentanen Unterbrechung des Stromes i auftretende Unterbrechungsüberspannung e

$$e = i \sqrt{\frac{L}{C}} = i W$$

wird am Ende der betreffenden Leitung, wo sie auf die Stromerzeuger oder auf Transformatoren trifft, im ersten Augenblick des Auftreffens auf den doppelten Wert gebracht und läuft über die vorhandene Spannung e der Leitung zurück. Die am Ende der Leitung angeschlossenen Apparate werden also von Spannungssprüngen mit der Höhe $2e$ getroffen. Alle längs der Leitung angeschlossenen Apparate erhalten dagegen nur Spannungssprünge von der halben Höhe. Die staffelförmige Ausbildung der Überspannung bis zu ihrem höchstmöglichen Werte interessiert uns hier nicht weiter, da die größte Gefährdung für die Wicklung angeschlossener Apparate durch den Kopf der Unterbrechungswelle geschaffen wird, falls Unterbrechungsüberspannungen dieser Art tatsächlich auftreten. Soweit man bis jetzt aus experimentellen Untersuchungen schließen darf, liegt die äußerste Grenze des Wertes e bei etwa 10 KV, so daß die Höhe der größten Unterbrechungssprünge, welche auf Wicklungen treffen können, bei etwa 20 KV liegt.

Da in ausgedehnteren Leitungsnetzen die Kapazität vollkommen ausreicht, um die Höhe der Unterbrechungsüberspannungen zu begrenzen, ist in solchen Netzen ein Schutz gegen diese überflüssig. In Sonderfällen, für die unsere obigen Ausführungen ein Beispiel gaben, ist man jedoch gezwungen, zu Schutzmaßnahmen zu greifen. Da sich sowohl praktisch wie auch theoretisch in diesen Fällen ein Schutz mit Funkenableitern nur sehr unsicher gewährleisten läßt, würde die Vergrößerung der Netzkapazität durch die Kapazität besonderer Kondensatorbatterien einen zweckentsprechenden Schutz darstellen.

Die Wanderwellen, welche nach unserer heutigen Auffassung die hauptsächlichsten Störungen in Hochspannungsanlagen verursachen, kann man in zwei große Gruppen teilen,

¹⁾ Bei Unterbrechungen in Luft. Schwächere Ströme geben bei ihrer plötzlichen Unterbrechung die theoretisch verlangten Werte.

nämlich die Entladewellen und die Ladewellen. Die Entladewellen werden ausgelöst:

1. durch Schaltvorgänge,
2. durch Kurzschlüsse,
3. durch Erdschlüsse.

Die Gefahr atmosphärischer Störungen ist in erster Linie auf Isolatorenüberschläge, also gleichfalls auf Erdschlüsse zurückzuführen, welche beim Freiwerden atmosphärischer Ladungen oder bei unmittelbaren Blitzschlägen auftreten.

Die Berechnung der Spannung und des Stromes einer Entladewelle geschieht für alle möglichen Verhältnisse nach der allgemeinen Formel (vgl. Abschnitt IV):

Spannung der Entladewelle:¹⁾

$$e_{11} = -E_m \frac{W_1}{R + W_1 + W_2} \quad \dots (3a)$$

Strom:

$$i_{11} = E_m \frac{1}{R + W_1 + W_2} \quad \dots (3b)$$

In dieser Formel ist W_1 der Wellenwiderstand der unter Spannung stehenden Leitung,

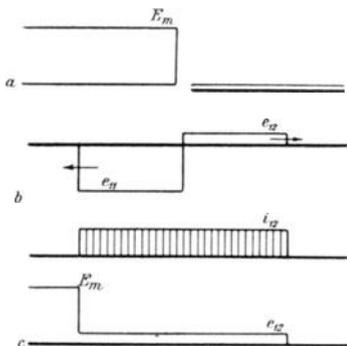


Abb. 2. Einschaltvorgang. Entstehung von Ladewelle und Entladewelle.

welche unter Zwischenschaltung eines Ohmschen Widerstandes R — der selbstredend den Wert null annehmen kann — auf eine Leitung mit dem Wellenwiderstand W_2 geschaltet wird. Da die Einschaltung stets unter Vermittlung eines Funkens ungefähr bei dem Scheitelwert E_m der Betriebswechselspannung erfolgt, müssen wir diesen Wert der Rechnung zugrunde legen. Vom Augenblick des Einschaltens ab zieht von dem Einschaltpunkte aus eine Ladewelle e_{12} in die Leitung 2 ein, während die Entladewelle e_{11} in Leitung 1 zurückläuft.

In Abb. 2 zeigt *a* den Spannungszustand vor dem Einschalten; nach dem Einschalten

(*b*) bilden sich Ladewelle e_{12} und Entladewelle e_{11} aus. Der in Leitung 2 einziehende Ladestrom i_{12} muß nach dem Kirchhoffschen Gesetz die gleiche Höhe haben wie der Entladestrom i_{11} . Der endgültige (augenblickliche) Spannungszustand (*c*) auf den beiden zusammengeschalteten Leitungen ergibt sich durch Über-einanderlagerung von *a* und *b*.

Ist der Wellenwiderstand W_2 sehr groß im Vergleich zu W_1 , schalten wir z. B. bei $E_m = 20$ KV eine Freileitung mit dem Wellenwiderstand 600 über ein Kabel mit dem Wellenwiderstand 60 ein, so ist die Entladewelle mit

$$e_{11} = -1,81 \text{ KV}$$

sehr niedrig und bedeutet z. B. für den Transformator, welcher am Anfang des Kabels das Kabel mit Spannung versorgt, keine Gefährdung. Sind die Wellenwiderstände beider Leitungen gleich groß, so erhalten wir bereits einen Spannungssprung, welcher gleich der halben Einschaltspannung ist. Schalten wir endlich eine unter Spannung stehende Leitung W_1 mit hohem Wellenwiderstand, z. B. $W_1 = 600$, auf ein Kabel mit geringem Wellenwiderstand, z. B. $W_2 = 60$, so erhalten wir eine Entladewelle $e_{11} = -18,1$ KV, welche bereits die größte Gefährdung für alle an der Leitung W_1 hängenden Apparate vorstellt¹⁾. Die größtmögliche Gefährdung ist dann gegeben, wenn $W_2 = 0$ wird, d. h. wenn an Stelle des Kabels 2 ein Kurzschluß vorhanden ist. Die volle Gefahr der Entladewelle ermißt man erst dann, wenn man die Zurückwerfung auf den doppelten Wert berücksichtigt, die an Induktivitäten oder Wicklungen stattfindet, welche am Anfang (oder Ende) einer Leitung liegen.

Handelt es sich statt um die eine Leitung 2 um mehrere Leitungen mit den Wellenwiderständen W_{21}, W_{22}, W_{23} usw., so steigt die Gefährdung der rückläufigen Entladewelle immer mehr und mehr. Die Höhe der Entladewelle ist in diesem praktisch wichtigen Fall durch die gleiche Beziehung gegeben. Für W_2 ist der aus der Gleichung

$$\frac{1}{W_2} = \frac{1}{W_{21}} + \frac{1}{W_{22}} + \frac{1}{W_{23}} \dots$$

berechnete Wert einzusetzen. Wir sehen, daß die Entladewellen in jeder beliebigen Höhe bis zu der vollen Betriebsspannung auftreten können.

In dem Fall, daß über eine Leitung, z. B. drei weitere Leitungen gleichzeitig einge-

¹⁾ Rüdtenberg, Wiener Zeitschrift für „E. u. M.“ 1912, S. 157.

¹⁾ Dieser Sonderfall der Entladewelle ist von Rüdtenberg in der Wiener Zeitschrift für „E. u. M.“, 1912, S. 157, behandelt worden.

schaltet werden, welche den gleichen Wellenwiderstand besitzen, wird

$$e_{11} = - E_m \frac{1}{1 + \frac{1}{3}} = - 0,75 E_m.$$

Es ist nicht unwichtig, darauf hinzuweisen, daß diese Entladewellen nicht nur dann auftreten, wenn Leitungen mit bestimmten Wellenwiderständen eingeschaltet werden. In den allgemeinen Formeln war bereits der Ohmsche Widerstand R eingeführt worden, der vor der eingeschalteten Leitung liegen sollte. Handelt es sich ausschließlich um die Einschaltung eines derartigen Widerstandes, so behält die Formel unveränderte Gültigkeit bei. Sie gestattet also die Berechnung der Spannungssprünge, die dann auftreten, wenn z. B. plötzlich ein Ohmscher Widerstand — man kann hierbei an die Dämpfungswiderstände von Funkenableitern, an die Widerstände von elektrochemischen Öfen usw. denken — eingeschaltet wird. Von großer Wichtigkeit ist auch der Hinweis darauf, daß jede beliebige Kapazität im ersten Moment des Einschaltens den Wellenwiderstand $W_0 = 0$ besitzt. Hiermit erklärt es sich, daß Transformatoren, deren Eingangswindungen nicht für die volle Betriebsspannung isoliert sind, bei der Formierung und dem Ansprechen von Elektrolytableitern, die im ersten Moment des Stromflusses praktisch wie eine widerstandsfreie Kapazität wirken, zugrunde gehen müssen, da die Einschaltung der Ableiter den Anlaß zur Ausbildung von Entladewellen mit der vollen Höhe der Betriebsspannung geben. In der gleichen gefährlichen Weise würde das Einschalten von Kondensatoren ohne Schalter mit Vorkontakt wirken.

Als theoretisch richtiger Wert des Dämpfungswiderstandes R von Funkenableitern ist häufig der Wert

$$R = W$$

empfohlen worden. D. h. der Dämpfungswiderstand sollte so hoch wie der Wellenwiderstand der zu schützenden Leitung sein, da unter diesen Bedingungen die Entladung der von einer Überspannung betroffenen Leitung schwingungslos erfolgt.

Im ungünstigsten Falle, daß der Ableiter am Ende einer Leitung hängt, löst der ansprechende Ableiter eine Entladewelle

$$e_{11} = - e_{\ddot{u}} \frac{W}{R + W} = - \frac{e_{\ddot{u}}}{2}$$

aus. Da die Entladewelle am Anfang der Leitung, z. B. an einem Transformator reflektiert wird, wird dessen Wicklung von dem

Spannungssprung $e_{\ddot{u}}$, dessen Höhe gleich der vollen Überspannung ist, getroffen. Diese einfache Überlegung erklärt uns, weshalb so häufig trotz ansprechender Funkenableiter Überspannungsschäden auftreten.

Mit der Einführung der Zurückwerfung von Entladewellen am Ende von Leitungen, an Maschinen und an Transformatoren wird deren Darstellung erst abgerundet. Während alle längs einer Leitung liegenden Apparate nur den Spannungsstoß e_{11} erhalten, werden die am Ende einer Leitung hängenden Apparate von dem doppelten Spannungsstoß $2e_{11}$ betroffen.

Auch die Wirkung atmosphärischer Störungen (abgesehen von langsam sich ausbildenden statischen Ladungen) ist wohl hauptsächlich auf Entladewellen zurückzuführen. Ich verstehe es durchaus, daß sich die Praxis dagegen gesträubt hat, die Gefahr der Wellenstirn von freiwerdenden statischen

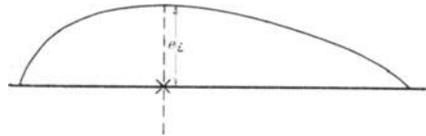


Abb. 3. Mutmaßliche Form der nach einem Blitzschlage frei gewordenen Ladung.

Ladungen einzusehen. Das Aussehen einer derartigen statischen Ladung auf einer Freileitung, d. h. ihre örtliche Verteilung, dürfte sich durch die Abb. 3 darstellen lassen. Von einer Schroftheit der Wellenstirne einer solchen Ladung kann sicher nicht die Rede sein. Zweifellos wird auch bei Blitzschlägen eine derartige Ladung nicht immer momentan, sondern in elektrischem Sinn allmählich in Gang gesetzt, da der Blitzschlag entweder einen aperiodischen Vorgang oder einen stark gedämpften periodischen Vorgang vorstellt. Zweifellos zeigen die nach Blitzschlägen entstehenden Wellenverteilungen ganz sanfte Übergänge, die nichts mit der Rechteckform gemein haben und die jedenfalls keine schroffen Spannungssprünge aufweisen.

Die alles beherrschende Störungen, welche nach Blitzschlägen durch das Freiwerden von Ladungen auftreten, dürften erst auf die Isolatorenüberschläge zurückzuführen sein, deren außerordentlich häufiges Auftreten dem Praktiker hinlänglich bekannt ist. Durch diese Isolatorenüberschläge entstehen Entladewellen, welche die volle Überspannung der Isolatoren haben und welche mit schroffster Wellenstirn nach beiden Seiten

vom Überschlagnpunkte aus abziehen. Wir nehmen an, daß an der durch ein Kreuz gezeichneter Stelle der freiwerdenden Ladung Abb. 4, von welcher nur die linke Seite gezeichnet worden ist, der Isolatorenüberschlag bei der Spannung e_i gleichzeitig mit

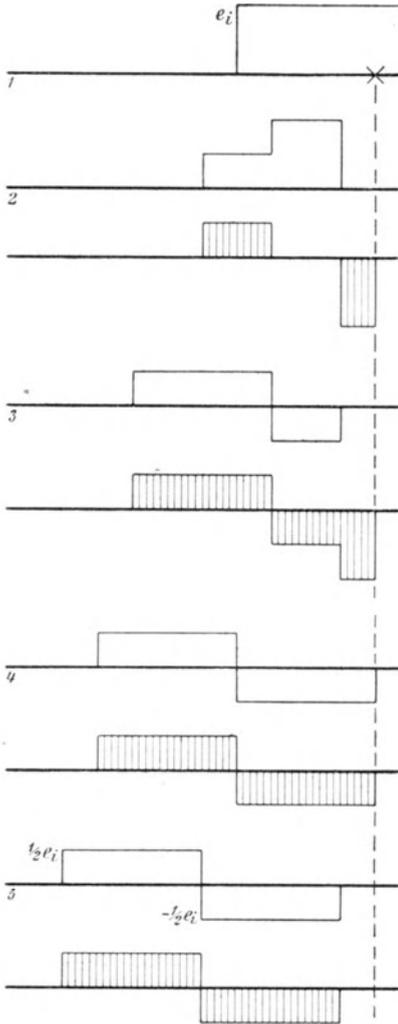


Abb. 4. Entstehung einer Wanderwelle mit Spannungssprung in der Mitte.

dem Ingangsetzen der Wanderwelle erfolgt. Über die Zwischenstufen 2, 3, 4 entwickelt sich die abziehende Wanderwelle 5. Es ist absichtlich, um die Zeichnung zu vereinfachen, im Gegensatz zu unseren Ausführungen von einer rechteckigen Form der Ladung ausge-

gangen worden. Das Bild lehrt jedoch, wie dieser der örtlichen Verteilung der Ladung entsprechende Kopf nicht in dem Maße störend wirken kann, wie der schroffe, durch den Isolatorenüberschlag entstandene Spannungssprung in der Mitte der Welle. Bedenkt man, daß diese Entladungswelle mit der vollen Isolatorenüberschlagsspannung in den üblichen Sammelschienensystemen ein schwingungsfähiges System vorfindet, in welchem Resonanzüberspannungen entstehen können, welche doppelt und viermal so hoch sind, wie die Überschlagsspannung, dann versteht man es, daß in besonders gewitterreichen Gegenden Überschläge an Durchführungen und an den Stützisolatoren der Sammelschienensystemen vorkommen.

So lange die durch Blitzschläge in Gang gesetzten Wanderwellen bei ihrer Entstehung nicht zum Isolatorenüberschlag führen, ist die Gefährdung der Anlage ziemlich gering, da bei ihrem Auftreffen auf das Werk ihre Spannung höchstens gleich der halben Isolatorenüberschlagsspannung ist, und da ihr Anfang und Ende wie in Abb. 3 zweifellos einen sanften Anstieg zeigt. Sowie jedoch ein Isolatorenüberschlag stattfindet, haben wir es mit einem

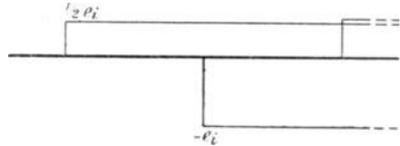


Abb. 5. Ersatz der in Abb. 4 (S. 169) gefundenen Doppelrechteckwelle durch drei unendlich lange Wellen.

Gemisch von Ladewelle und Entladungswelle zu tun. Die Ladewelle wäre für sich allein ziemlich ungefährlich wegen ihrer geringen Höhe und ihrem sanften Anstieg, die Entladungswelle dagegen bringt erst wegen ihres schroffen Sprunges und ihrer doppelten Höhe die Gefährdung. Wir betonen, daß sich ein unmittelbarer Blitzschlag in eine Leitung hinsichtlich Überspannungsgefahr kaum von einer durch einen entfernten Blitzschlag ausgelösten Wanderwelle unterscheidet. In beiden Fällen ist ja die höchste Spannung durch die Isolatorenüberschlagsspannung gegeben. Selbstredend wird es durchaus anerkannt, daß ein Blitzschlag unmittelbar an der Einschlagstelle ganz andere Zerstörungen auslösen kann als eine frei gewordene Ladung.

Für die rechnerische Behandlung der Wanderwelle 5, Abb. 4, ersetzen wir die beiden Rechtecke durch drei Wanderwellen $\frac{1}{2} e_i$, $-e_i$ und $\frac{1}{2} e_i$ unendlicher Länge, Abb. 5. Die erste Welle löst in dem schwingungsfähigen

System, gebildet aus Kapazität der Sammelschienen und den vorgeschalteten Induktivitäten von Schutzdrosselspulen, Auslösespulen usw., welches wir uns am Ende einer Leitung denken (vgl. Abb. 11), eine Eigenschwingung *a* (Abb. 6) aus, welche dem Grenzwerte e_i zustrebt; die Eigenschwingung *b* der zweiten Welle strebt dem Grenzwerte $-2e_i$, die der dritten (*c*) endlich dem Grenzwerte $+e_i$ zu.¹⁾ Deckt sich die geometrische Länge der Wanderwelle (Abb. 5) mit der Wellenlänge des Sammelschienensystems, so herrscht die in Abb. 6 zur Darstellung gebrachte Resonanzbedingung, welche an den Sammelschienen hinter den Induktivitäten im Grenzfall die vierfache Isolatorenerschlagsspannung liefert.

Berührt die Welle (Abb. 5) ein Sammelschienensystem, welches nicht am Ende einer Leitung hängt, so fehlt die Verdopplung der auftretenden Wellen. Doch ist hinter der Induktivität immerhin noch die doppelte Isolatorenerschlagsspannung zu erwarten.

Wenden wir uns jetzt der in der Natur möglichen Form einer sich in Gang setzenden Ladung auf einer Freileitung zu, so erhalten wir, wenn z. B. der Isolatorenerschlag an der

durch ein Kreuz gekennzeichneten Stelle der Abb. 3 (S. 6) auftritt, nach einiger Zeit eine abziehende Wanderwelle Abb. 7. Sie zeigt genau so wie die rechteckige Form der Wanderwelle in ihrer Mitte den Spannungssprung um die volle Isolatorenerschlagsspannung e_i . Es gebraucht keines eingehenden Beweises, daß diese Welle, deren zweite Hälfte das umgeklappte Spiegelbild der ersten Hälfte ist, hinsichtlich

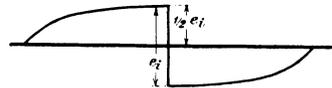


Abb. 7. Mutmaßliche Form einer Wanderwelle mit Spannungssprung in der Mitte.

der Ausbildung der vierfachen Resonanzüberspannung eben so gefährlich ist wie die der Einfachheit halber an erster Stelle betrachtete Doppelrechteckwelle. Aus der Doppelrechteckwelle ergibt sich ohne besondere Schwierigkeit die Form der allgemeinen Welle Abb. 7 dadurch, daß der in Frage kommende Teil der freiwerdenden Ladung in einer Reihe übereinander geschichteter Rechtecke zerlegt wird. Man untersucht das Verhalten der einzelnen Rechtecke und lagert

zum Schluß alle Teilwellen übereinander.

Auf Grund unserer Entwicklungen dürfen wir den allgemeinen Satz aufstellen, daß jeder Isolatorenerschlag die Ursache für die Ingangsetzung einer Wanderwelle ist, welche in der Mitte einen Spannungssprung mit der vollen Isolatorenerschlagsspannung aufweist und welche die volle Periode einer Schwingung vorstellt.

Eine wesentlich geringere Bedeutung haben die bei Einschaltungen entstehenden Ladewellen. Die Höhe ihrer Spannung ist durch die

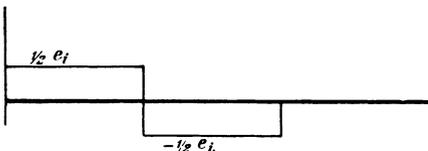
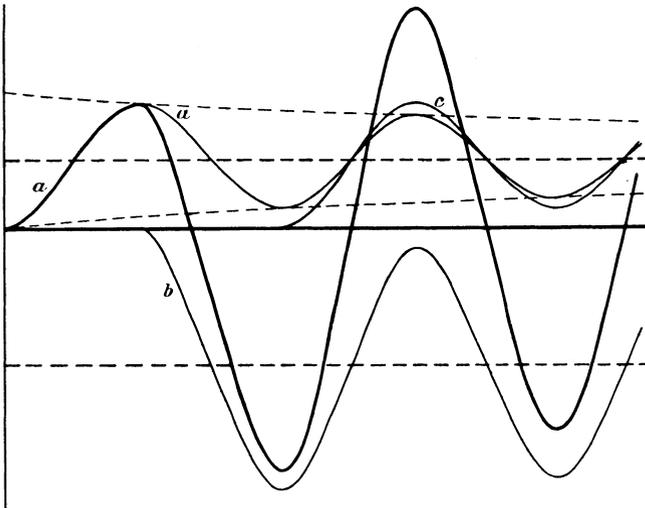


Abb. 6. Eigenschwingungen, ausgelöst durch die Doppelrechteckwelle Abb. 28.

¹⁾ „Archiv f. El.“, Heft 6, S. 245.

Beziehung

$$e_{12} = E_m \frac{W_2}{R + W_1 + W_2} \quad (4a)$$

ihr Strom durch

$$i_{12} = i_{11} = \frac{E_m}{R + W_1 + W_2} \quad (4b)$$

gegeben (Abb. 2, S. 5). Wie immer, rechnen wir mit dem ungünstigsten Fall, daß die Einschalt-

tung im Scheitelwert E_m der Betriebsspannung erfolgt.

Die größte Spannung ist zu erwarten, wenn W_2 groß und W_1 klein ist. Schalten wir z. B. in einem Knotenpunkt mit drei ankommenden Leitungen mit den unter sich gleichen Wellenwiderständen W_{11} , W_{12} , W_{13} eine weitere Leitung mit gleichem Wellenwiderstand ein, so wird

$$\frac{1}{W_1} = \frac{1}{W_{11}} + \frac{1}{W_{12}} + \frac{1}{W_{13}},$$

und die Ladewelle erreicht bereits die Höhe

$$e_{12} = E_m \frac{1}{\frac{1}{3} + 1} = 0,75 E_m.$$

Am ungünstigsten liegen die Bedingungen, wenn parallel zum Einschaltepunkte eine Quelle unendlicher Ergiebigkeit liegt. Ein Kondensator z. B. kann im Augenblick des Einschaltens als Quelle unendlicher Ergiebigkeit betrachtet werden, so daß $W_1 = 0$ zu setzen ist. An ihrem Kopfe weist die Ladewelle in diesem Fall die volle Spannung E_m auf, so daß Apparate am Ende der Leitung W_2 von dem Stoße $2 E_m$ getroffen werden. Die Reflexion unter Verdopplung des Sprunges tritt unter den gleichen Bedingungen wie bei der Entladewelle auf.



Abb. 8. Reihenschaltung von Freileitung und Kabel.

Daß sowohl die Lade- wie die Entladescheinungen als Schwingungen verlaufen, ist eine längst bekannte Tatsache. Untersucht man die Erscheinungen, welche durch diese Rechteckschwingungen ausgelöst werden, so erhält man eine übergroße Fülle von Überspannungsmöglichkeiten, welche Überspannungen nie geahnter Höhe liefern. An anderer Stelle¹⁾ habe ich mich eingehend mit diesen Fragen beschäftigt; ich kann mich deshalb hier darauf beschränken, die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchung wiederzugeben.

Wir unterscheiden Lade- und Entladeschwingungen, von denen wieder die Entladeschwingungen, insbesondere die Kurzschluß- und Erdschlußschwingungen, die wichtigsten sind.

Als Beispiel betrachten wir den Verlauf der Entladeschwingung, welche dann auftritt, wenn eine im Anfange A z. B. von einem

Transformator gespeiste Freileitung mit dem hohen Wellenwiderstand W_1 (Abb. 8) auf ein langes Kabel mit dem kleinen Wellenwiderstand W_0 geschaltet wird.

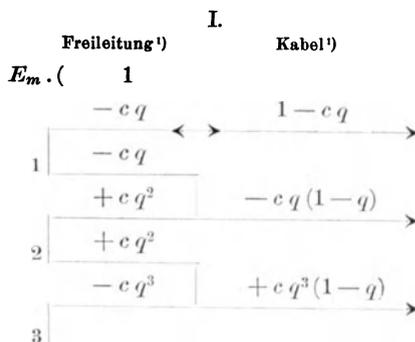
Nach „Arch. f. El.“, Heft 6, S. 236 u. 244, führen wir den Reflexionsfaktor

$$q = \frac{W_1 - W_0}{W_1 + W_0}$$

und den Übergangsfaktor

$$q' = \frac{W_1}{W_1 + W_0} = c q$$

ein und erhalten das Reflexionsschema



Vom Augenblick des Einschaltens ab dringt die Ladewelle

$$e_{12} = E_m \frac{W_0}{W_1 + W_0} = E_m (1 - c q)$$

[vgl. Gl. (4)] in das Kabel ein und geht für die weitere Betrachtung verloren; die Entladewelle

$$e_{11} = - E_m \frac{W_1}{W_1 + W_0} = - E_m c q)$$

[vgl. Gl. (3)] dagegen läuft in die Freileitung zurück, wird an deren Anfang A zurückgeworfen, und die zurückgeworfene Welle $- E_m c q$ trifft auf den Übergangspunkt. Infolge der unvollkommenen Reflexion — hier gewissermaßen unvollkommener Kurzschluß — wird der Betrag $+ c q^2 = - c q \cdot - q$ in die Freileitung zurückgeworfen, während $- c q (1 - q)$ in das Kabel einzieht usw.

Am Anfang der Freileitung tritt eine Spannung auf, die sich durch Übereinander-

¹⁾ Die kurzen Pfeile in Schema I sollen die Richtung der vom Einschaltepunkte ausgehenden Lade- und Entladewellen andeuten, während die am Ende der waagrechten Striche sitzenden Pfeile darauf hinweisen, daß die betreffenden Wellen in die Leitung 0 einziehen.

¹⁾ Petersen, „Archiv f. El.“, 1912, Heft 6.

lagerung der unendlich langen, im Abstände $2l$ folgenden Wellen

$$E_m c \cdot (-2q, +2q^2, -2q^3 \dots)$$

über die vorhandene Spannung E_m darstellen läßt. Die Welle ist durch Abb. 9a gegeben.

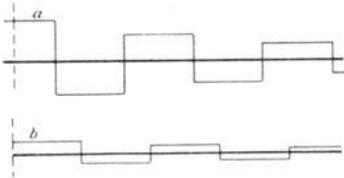


Abb. 9. Entladeschwingung beim Einschalten des Kabels
Abb. 8.

Eine Maschine oder ein Transformator, der die Freileitung im Punkte A speist, hat einen so hohen Wellenwiderstand W_2 , daß die entwickelte Schwingung nur ganz unwesentlich beeinflußt wird, d. h. etwas mehr gedämpft wird.

Tritt an Stelle des Kabels mit dem Wellenwiderstand W_0 ein Ohmscher Widerstand $R = W_0$, so hat die Entladeschwingung die gleiche Form.

Während in Abb. 9a den zeitlichen Verlauf der Entladeschwingung im Punkte A

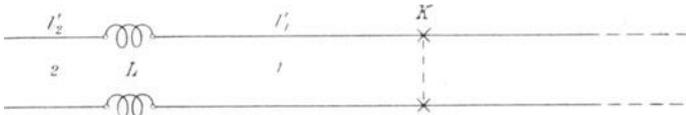


Abb. 10. Kurze Leitung hängt als schwingungsfähiges System an einer (langen) Leitung

darstellt, gibt Abb. 9b den zeitlichen Verlauf der Spannung im Punkte B (Kabelanfang), im dreifachen Ordinatenmaßstab.

Berühren diese Schwingungen irgendeine schwingungsfähige Anordnung, so führt diese unter dem Einflusse der auftreffenden oder vorbeilaufenden Schwingungen Eigenschwingungen aus.

Jede durch eine Induktivität abgetrennte Leitungsstrecke, jedes Sammelschienensystem mit den üblichen Induktivitäten zwischen ankommenden Leitungen und Schienen führt ein elektrisches Sonderdasein bei derartigen Schwingungen. Stimmen die Wellenlängen der ankommenden Schwingungen auch nur annähernd mit der Wellenlänge eines abgetrennten Systemes überein, so entstehen Überspannungen, die um so bedeutender sind, je kleiner die Kapazität der abgetrennten Teile ist.

Bei der einfachen Form Abb. 10, welche eine Leitung mit einem Kurz- oder Erdschlusse

im Punkte K darstellen soll, schwingt der Abschnitt 1, welchen wir betrachten wollen, mit der Wellenlänge

$$\lambda = 4l_1' \sqrt{\epsilon \mu} \dots \dots (5)$$

mit.

- l_1' der geometrischen Länge,
- ϵ der Dielektrizitätskonstanten,
- μ der Permeabilität

des die Leitung umgebenden Mittels.

Durch die Induktivität L wird die Leitung für diese Schwingungen in zwei, im Beispiel ungleich lange Strecken l_1' und l_2' zerlegt.

Die Anordnung Kapazität und Induktivität Leitung l_2' und Induktivität der vorgeschalteten Auslösespulen eines Ölschalters z. B. stellt ein schwingungsfähiges Gebilde vor. Stimmt dessen Wellenlänge mit der Wellenlänge λ überein, so entstehen auf der kürzeren Leitung ganz bedeutende Überspannungen.

Bei dieser Schwingungserscheinung wandert in der ersten Zeit ein großer Teil der auf der Leitung 1 aufgespeicherten elektrischen Feldenergie auf die Leitung 2 ab, u. zw. ist diese Verlagerung der elektrischen Energie um so vollkommener, je größer der Unterschied zwischen den Kapazitäten der beiden

Leitungen ist. Im Grenzfall wird die Überspannung

$$e_{\ddot{u}} = k \cdot E_m \sqrt{\frac{C_1}{C_2}} \dots \dots (6)$$

mit C_1 der Kapazität von Leitung 1,

C_2 „ „ „ „ 2.

und E_m dem Scheitelwert der Spannung, bei welcher der Erd- oder Kurzschluß eingesetzt hat. Der Koeffizient k hat die Größenordnung 1.

Die Spannungserhöhung verteilt sich nicht gleichmäßig über die Leitung 2; am Ende der Leitung erreicht sie höhere Werte als am Anfange unmittelbar hinter der Auslösespule.

Ungleich höhere Überspannungen entstehen, wenn statt der Leitung 2 in Abb. 10 ein Sammelschienensystem (Abb. 11) am Ende der Leitung hängt. Auch hier wandert die elektrische Feldenergie nach Einsetzen der Kurzschluß- oder Erdschlußschwingung von der Kapazität C_1 der Leitung 1 auf die durch

Induktivitäten L abgetrennte Kapazität C_s der Sammelschienen. Wenn man bedenkt, daß die Kapazität C_s nur klein im Vergleich zu C_1 ist, so begreift man, daß die nach Formel (6) berechnete Überspannung ganz bedeutende Werte annehmen kann.

Wir wiederholen nochmals, daß jeder durch Induktivitäten abgetrennte Netzteil das Bestreben hat, die elektrische Feldenergie oder Spannungsenergie der an ihn grenzenden Netzteile beim Einsetzen irgendeines ganz beliebigen Ausgleichsvorganges an sich zu reißen, und ergänzen unsere Ausführung in der Richtung, daß es durchaus nicht nötig ist, daß dieser abgetrennte Netzteil, wie es die Abb. 10 und 11 darstellen, am Ende der fraglichen Leitung sitzt, sondern daß diese Resonanzüberspannungen gerade so gut auftreten, wenn der durch Induktivitäten abgetrennte Netzteil im Zuge z. B. eines Ringes liegt oder von der durch Ausgleichsvorgänge in Schwingung versetzenden Leitung — selbstredend natürlich nicht unmittelbar an einem Kurzschlußpunkte — abzweigt.

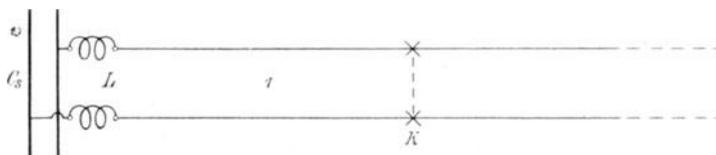


Abb. 11. Sammelschienensystem als schwingungsfähiges System am Ende einer Leitung.

Dieses Aufsaugen der in Schwingungen geratenen Spannungsenergie erfolgt nicht nur dann, wenn ein Netzteil durch Induktivitäten abgetrennt ist, sondern man hat auch stets mit dieser Erscheinung zu rechnen, wenn auf eine Leitung eine andere Leitung mit abweichendem Wellenwiderstand folgt. Ist dieser Wellenwiderstand wesentlich kleiner als der Wellenwiderstand der Leitung, in welcher die Änderung des bestehenden Spannungszustandes eingeleitet worden ist, so verwandelt sich die in Schwingung versetzte Spannungsenergie in der Hauptsache in magnetische Energie (Überströme), welche auf der Leitung mit kleinerem Wellenwiderstand aufgespeichert wird. Dieser Fall hat für uns, soweit man die Verhältnisse bis jetzt übersehen kann, noch kein besonderes Interesse. Ist andererseits der Wellenwiderstand der fraglichen Leitung wesentlich größer, so verwandelt sich die in Schwingung versetzte Spannungsenergie der ersten Leitung in der zweiten Leitung wiederum in Spannungsenergie.

Mit diesem Fall haben wir u. a. auch bei Transformatoren zu rechnen, die bei der Betrachtung dieser Schwingungserscheinungen als Leitungen mit sehr hohen Wellenwiderständen eingeführt werden müssen. Transformatoren können als Seibtsche Spulen in der mannigfaltigsten Form schwingen. Obgleich die hierbei auftretenden Spannungsunterschiede zwischen Windung und Windung verhältnismäßig klein sind, gibt das Ausschlagen von Transformatoren infolge von sekundären Folgen der übermäßigen Spannungserhöhung (unvollkommener Durchbruch des Isoliermittels) zu Windungsschlüssen Anlaß. Auch Stromerzeuger können als Seibtsche Spulen mit der verschiedenartigsten Verteilung von Spannungsbäuchen und -knoten auf der Wicklung schwingen. Die gewöhnliche Folge dieser Erscheinung sind Gestellschlüsse.

Aus der Erkenntnis der Ursache dieser durch Wanderwellen verursachten Resonanzüberspannungen folgert sich ohne Schwierigkeit die Abwehrmaßregel: Jede Abtrennung von Netzteilen oder von Sammelschienen durch Induktivitäten ist

grundsätzlich zu vermeiden, und da die Induktivitäten von Auslösespulen und von Stromwandlern für die Sicherung des Netzes und für die laufende Beobachtung unentbehrlich sind, müssen diese Apparate in der Art und Weise überbrückt werden, daß Wanderwellen über sie hinweggleiten können. Für diese Überbrückung genügen nach unseren heutigen Erfahrungen in Kabelnetzen Widerstände von 3 Ohm, in Freileitungsanlagen Widerstände von 30 Ohm. Je geringer jedoch diese Widerstände werden, desto sicherer wird der gedachte Zweck erfüllt.

Es ist übrigens nicht unbedingt nötig, daß für die Erreichung dieser verderblichen Spannungen die Resonanzbedingung scharf erfüllt wird; ganz im Gegenteil, man darf sich außerordentlich weit von der Resonanzbedingung entfernen und erhält trotzdem noch Überspannungen von ganz unzulässiger Höhe.

Abb. 12 gibt die Kurve I die Überspannungen an einem Sammelschienensystem beim Einschalten der das Sammelschienensystem

speisenden Leitung, Kurve *II* die Überspannungen beim Kurzschluß der Speiseleitung im Einschaltzeitpunkt in Abhängigkeit von der Induktivität der dem Sammelschienensystem vorgeschalteten (Auslöse)spulen wieder. Die beiden Kurven, welche bei einer Betriebsspannung von 10 KV aufgenommen worden sind, zeigen zur Genüge, wie weit man sich von der Resonanzbedingung entfernen darf, ohne daß man in technischem Sinne von einer Abnahme der Gefahr sprechen kann. Die Versuche wurden durchgeführt mit einem 25 KV-Kabel von 118 m Länge. Das Sammelschienensystem hatte mit einer Leiterlänge von etwa 5 m ungefähr die Kapazität einer Transformatorstation. Die Überspannung ist mit Hilfe von Kugelfunkenstrecken gemessen wor-

Dank dafür auszusprechen, daß sie es mir in richtiger Erkenntnis der großen Bedeutung dieser Resonanzüberspannungen durch Überlassung von etwa $\frac{1}{4}$ km 25KV-Kabel ermöglicht haben, Versuche auszuführen, die nicht mehr den mit Recht etwas zweifelhaften Charakter sogenannter Laboratoriumsversuche tragen.

Es ist gelungen, mit Hilfe dieser Kabel die Resonanzerscheinungen und Überspannungen, welche in der mehrfach genannten Arbeit behandelt worden sind, experimentell darzustellen. Wer Gelegenheit gehabt hat, zu sehen, mit welcher Sicherheit diese Überspannungen entstehen, wer die Wirkungen der die 500 KV überschreitenden Überspannungen beobachtet hat, der kann nicht mehr an ihrer Bedeutung zweifeln.

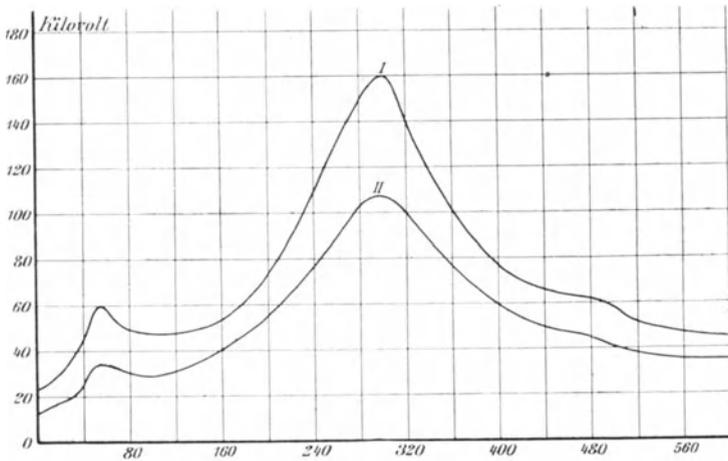


Abb. 12. Experimentell aufgenommene Überspannungen an einem Sammelschienensystem nach Abb. 11.
I Einschaltüberspannungen. *II* Kurzschlußüberspannungen.

den; die Anwendung einer höheren Betriebswechselspannung als 10 KV war nicht möglich, da in der Nähe der Resonanz selbst an sehr großen Krümmungshalbmessern Glimmerscheinungen, d. h. Funkenübergänge, in die Luft auftraten. Bei noch höheren Betriebsspannungen nehmen die Überspannungen einen Charakter an, der für den Beobachter ohne weiteres die katastrophale Wirkung von Kurzschlüssen oder Erdschlüssen verständlich macht.

Die Abb. 12 gibt nur eine von den vielen Versuchsreihen wieder, welche zur experimentellen Prüfung der Resonanzüberspannungen durchgeführt worden sind, über welche ich später an anderer Stelle eingehend berichten werde. Es sei mir gestattet, auch an dieser Stelle den Siemens-Schuckertwerken, Kabelwerk Nonnendamm, meinen besten

Ganz im Gegensatz zu früheren Versuchen, übertreffen die experimentellen Ergebnisse in mancher Hinsicht die an das Experiment geknüpften Erwartungen.

Im Zusammenhang mit den schädigenden Wirkungen der Wellensprünge und der Resonanzüberspannungen ist es von Wichtigkeit, auf die Windungskurzschlüsse an Transformatoren und Maschinen einzugehen. Der Durchschlag in Luft bedarf zu seiner Ausbildung einer ganz bestimmten Zeit, die zwischen 10^{-6} und 10^{-7} Sek liegt. Der Durchschlag isolierter und in Öl eingebetteter Windungen erfordert dagegen eine wesentlich größere Zeit. Trifft eine Welle mit vollkommen senkrechter Stirn auf eine Wicklung, so kann diese Welle die Wicklung ohne jeden Schaden passieren, da die Zeit, welche die volle Span-

nung zwischen Windung und Windung herrscht, viel zu klein ist, um zur Ausbildung eines Windungsschlusses zu führen. Es gibt für jede Wicklung eine ganz bestimmte kritische Form der Wellenstirn, bei welcher die maximale Gefährdung auftritt, so daß eine ungebildete Wellenstirn bei ungenügender Umbildung viel gefährlicher wirken kann als eine schroffe Wellenstirn.

Der Ausgleichsvorgang z. B. bei einem Kurzschlusse ist stets oszillatorischer Natur. In eine Wicklung wird deshalb ein Wellenzug einzichen, welcher durch Abb. 13 gegeben ist.

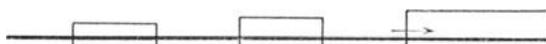


Abb. 13. Rechteckiger Wellenzug, ausgelöst durch einen Kurzschluß.

Besitzt ein ähnlicher Wellenzug keine schroffe Stirn, ist dieser Zug (Abb. 14 a) beispielsweise eine abklingende Sinuswelle, so kann er trotz des Fehlens des Spannungssprunges zu Windungsschlüssen führen, wenn der Abstand zwischen negativer und positiver Amplitude, d. h. wenn die halbe Wellenlänge $\frac{\lambda_0}{2}$ zu kurz ist.

Schalten wir parallel zu einem Transformator einen Kondensator, und lassen wir auf den abgehenden Leitungen in nicht allzu großer Ferne einen Kurzschluß entstehen, so wird die einsetzende Schwingung praktisch diesen sinusartigen Charakter besitzen. In die Wicklung des Transformators zieht eine Welle von der in Abb. 14 a dargestellten Form ein,

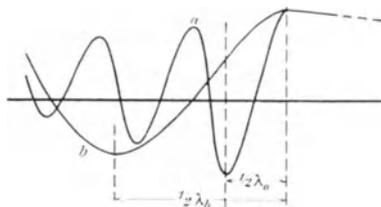


Abb. 14. Sinusartige Wellenzüge, welche in eine Wicklung einzichen.

da sich das System Kondensator und einige Meter Leitung wie ein Thomsonscher Schwingungskreis entladen wird. Ein nicht ganz hervorragend gut isolierter Transformator wird nach kurzer Zeit durch Windungsschluß zugrunde gehen, da die Frequenz des betrachteten Schwingungskreises zu hoch ist. Setzt man

die Frequenz des Schwingungskreises dadurch herab, daß man Induktivitäten einbaut (Abb. 15), so wird der Abstand zwischen Wellental und Wellenberg $\frac{\lambda_0}{2}$ bei richtiger Wahl der Verhältnisse so weit vergrößert, daß keine Windungsüberschläge mehr vorkommen können (Abb. 14, Kurve b). Da Transformatorstationen z. B. in der durch Abb. 15 wiedergegebenen Art gegen Überspannungen geschützt werden

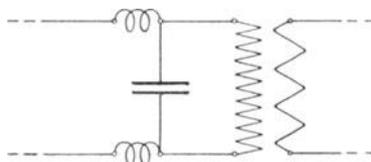


Abb. 15. Schutzschaltung für Transformatoren.

soller, und die Schutzkondensatoren ziemlich klein sind, besteht bei Kurzschlüssen und Erdschlüssen in unmittelbarer Nähe der Station eine Gefährdung der Wicklung durch die hochfrequente Entladeschwingung. Bei passender Wahl der Induktivitäten der Schutzdrosselspulen wird diese Gefahr beseitigt.

Beiläufig bemerkt, stellt die Anordnung Abb. 15 bei genügend hoher Induktivität die beste Art des Schutzes von Laboratoriumstransformatoren gegen Entladewellen (Windungsschlüsse) vor. Der Einbau von kleinen Spulen zwischen Transformator und Kondensator ist zwecklos.

Noch auf einen weiteren Punkt, der von Bedeutung bei Windungsschlüssen ist, möchten wir hier hinweisen. Der Wellenwiderstand der Hochspannungswicklung eines Transformatorschenkels läßt sich in Abhängigkeit von der Schenkellänge durch Abb. 16 wiedergeben. Der Wellenwiderstand ist am Anfang der Wicklung klein, um im Innern der Wicklung

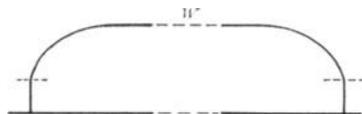


Abb. 16. Verlauf des Wellenwiderstandes eines Transformators.

auf wesentlich höhere Beträge anzuwachsen. Eine in den Transformator einziehende Welle wird in der Nachbarschaft der Eingangswindungen, falls sie keine übermäßige Dämpfung erleidet, unter Umständen auf den 1,5-fachen Wert heraufreflektiert werden können. Diese experimentell gefundene Tatsache

gibt die Erklärung für manche eigenartigen Windungsdurchschläge.

Das Gebiet der Windungsdurchschläge wird zu seiner eingehenden Erforschung noch recht viel Arbeit erfordern.

III. Überspannungsschutz.

Bei der Gliederung des Überspannungsschutzes verlassen wir die häufig übliche Gliederung in Grob-, Mittel- und Feinschutz, welche durchaus nicht den tatsächlichen Bedingungen gerecht wird. Es ist eigentlich fast selbstverständlich, wenn wir die Schutzmaßnahmen nach der Art der Aufgabe, welche ihnen zugewiesen wird, gliedern. Dementsprechend ergibt sich die folgende Zusammenstellung:

I. Wanderwellenschutz.

Dieser zerfällt in:

- a) Schutz gegen Spannungssprünge.
- b) Schutz gegen die absolute Höhe der Spannungen.
- c) Vorbeugender Schutz: Schutz gegen die durch Wanderwellen verursachten Resonanzüberspannungen.

II. Schutz gegen atmosphärische Störungen.

- a) Soweit durch diese Wanderwellen ausgelöst werden, decken sich die Schutzmaßnahmen mit I.
- b) Abführung sich langsam ausbildender statischer Ladungen.
- c) Vorbeugender Schutz: Blitzseile, Leitungsführung.

III. Schutz gegen Unterbrechungsüberspannungen.

Alle Maßnahmen für den Überspannungsschutz zerfallen in die vorbeugenden Maßnahmen und die abwehrenden Maßnahmen; und auch beim Wanderwellenschutz haben die vorbeugenden Maßnahmen das gleiche Gewicht wie die abwehrenden Maßnahmen. Der wichtigste vorbeugende Wanderwellenschutz ist die Durchführung der vollkommenen Einheitlichkeit einer Hochspannungsanlage. Es muß mit peinlichster Sorgfalt darauf geachtet werden, daß es jedem, auch dem kleinsten Netzteile, unmöglich gemacht wird, für sich Eigenschwingungen auszuführen, u. zw. hat sich die Durchführung dieses Grundsatzes sowohl auf die einzelnen Netzteile wie auch insbesondere auf die Sam-

melschienen-systeme des Werkes und der Unterwerke (Transformatorstationen) zu erstrecken. Jede Induktivität, ob es die Induktivität einer Schutzrosselspule, der Auslösespule eines Öl Schalters oder eines Stromwandlers ist, schneidet diejenigen Teile, welche auf diese Induktivität folgen, von dem übrigen Netze ab und gibt diesen Teilen die Eigenschaft, mit einer von dem Netze fast unabhängigen Eigenschwingung zu schwingen. Diese Tatsache von ungemainer Bedeutung ist mit aller Deutlichkeit erst durch die Aufdeckung der Resonanzüberspannungen im Gefolge von Wanderwellen klargelegt worden. Ebenso wie Sammelschienen mit den vorgeschalteten Induktivitäten für sich schwingen können, ist auch jede beliebige Leitungsstrecke in stande, Eigenschwingungen auszuführen, und mit diesen Eigenschwingungen ist auch fast immer die Möglichkeit der Ausbildung von übermäßigen Spannungserhöhungen gegeben, welche, abgesehen von Ausnahmefällen, bei Kurz- und Erdschlüssen die dreifache Höhe der zum Schluß führenden Spannung bereits kurz nach Auftreffen der ersten Entladungswelle erreichen¹⁾.

Eine sehr starke Störung der Einheitlichkeit eines Netzes bedeutet die in Abb. 17 dar-

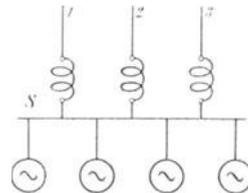


Abb. 17. Falsche Anordnung. Durch die Induktivitäten werden ankommende Wellen unter Spannungserhöhung zurückgeworfen und an dem Übergang auf die anderen Leitungen gehindert.

gestellte Art des Anschlusses von Leitungen an das Sammelschienen-system S. Diese falsche Anordnung muß durch die Anordnung nach Abb. 18 ersetzt werden. Aus eigener Erfahrung weiß ich, daß ein Sammelschienen-system nach Abb. 18 in seiner Durchbildung häufig ganz bedeutende technische Schwierigkeiten im Vergleich zu dem Sammelschienen-system Abb. 17 bietet. Gegenüber diesen Schwierigkeiten, die nur das eine Mal beim Entwurf der Schaltanlage auftreten, stehen so große Vorteile, daß sich jedenfalls die Anordnung Abb. 18 als einzig richtige einbürgern wird. Man muß es auf die Rechnung der ungenügenden Erforschung der Überspannungen setzen, daß

¹⁾ „Archiv f. El.“, Heft 6, 1912, S. 248.

nicht früher gegen die grundsätzlich falsche Anordnung Abb. 17 eingeschritten worden ist. Denn bei dieser Anordnung begibt man sich des Vorteils, eine Überspannung, die beispielsweise auf Leitung 1 kommt, am Werke vorbeileiten zu können. Eine Wanderwelle auf Leitung 1 wird an den Schutzdrosselspulen auf den doppelten Wert reflektiert, verlangt eine ganz besonders gute Isolation dieser Schutzdrosselspulen und verursacht durch die Verdopplung der Spannung, die zum Isolatorenüberschlag im oder in nächster Nähe des Werkes führen kann, noch zudem eine ganz unnötige Gefährdung. Im Gegensatz hierzu wird bei der richtigen Anordnung Abb. 18 eine ankommende Wanderwelle ohne Spannungserhöhung am Werke vorbeilaufen. Handelt es sich um mehrere Leitungen, die an die Hilfssammelschienen angeschlossen sind, so wird im Gegen-

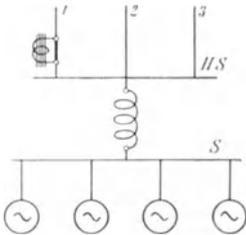


Abb. 18. Richtige Anordnung. Ankommende Wellen laufen ohne Spannungserhöhung am Werke vorbei.

satz zu der falschen Anordnung sogar eine Herabsetzung der Spannung auftreten, die sich an der Hand der nachstehenden Formel berechnen läßt.

$$e_{12} = \frac{2e_1}{n} \dots \dots \dots (6a)$$

$$e_{11} = -e_1 \frac{n-2}{n} \dots \dots \dots (6b)$$

In dieser Formel ist n die Zahl der von den Hilfssammelschienen abgehenden Leitungen, e_1 die Höhe der Spannung der auftretenden Welle vor dem Auftreffen auf die Hilfssammelschienen, e_{12} die Höhe der Spannung der in die $n-1$ Leitungen einziehenden gleich hohen Wellen, e_{11} die in die alte Bahn zurückgeworfene Welle.

Bei der richtigen Anordnung ist bereits ganz von selbst eine der wichtigsten Forderungen des Überspannungsschutzes erfüllt, welche verlangt, daß Überspannungen nach Möglichkeit entweder an der Zentrale oder den Unterwerken vorbeigeleitet werden

und z. T. an diesen zurückgeworfen werden, so daß diese Überspannungen sich im wahrsten Sinne des Wortes im Netze austoben können. Meiner Überzeugung nach hat sich das Prinzip der Ableitung von Überspannungen überlebt. Abgesehen von den Resonanzüberspannungen beliebiger Entstehungsart, die sich sämtlich vermeiden lassen, ist die Höhe der Überspannungen in den allerseltensten Fällen die Störungsursache. Die Spannungssprünge dagegen richten das meiste Unheil an. Den Schutzapparaten und den richtig entworfenen Anordnungen weisen wir die Aufgabe zu, die Spannungssprünge zu beseitigen sowie die Wanderwellen auseinanderzureißen und in die Länge zu ziehen. Den Dämpfungswiderständen des Netzes müssen wir es überlassen, die Energie der Überspannungen zum größten Teil zu verzehren.

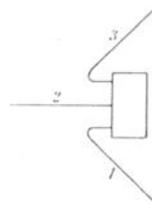


Abb. 19.

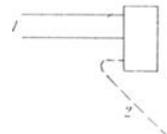


Abb. 20.

Hinsichtlich der Vorbeileitung von Überspannungen sind „Kopfwerke“ viel ungünstiger als „Durchgangswerke“ gestellt. Denn wenn auch mehrere Leitungen auf dem gleichen Gestänge das Werk verlassen, so verhalten sich diese Leitungen bei atmosphärischen Störungen nur wie eine einzige Leitung. Statt daß die Wellen, welche z. B. in Abb. 19 auf Leitung 2 ankommen, z. T. nach 2 zurückgeworfen werden, z. T. jedoch auf Leitung 1 und 3 weiterlaufen können, werden bei Kopfwerken die auf den beiden Leitungen 1 eines Gestänges ankommenden Wellen unter Verdopplung ihrer Spannung zurückgeworfen.

Ist es irgendwie möglich, von einem Kopfwerke eine längere Leitung nach einer andern Richtung abzweigen zu lassen, also ein Durchgangswerk zu schaffen (punktierte Leitung 2 in Abb. 20), so erzielt man eine erhebliche Verbesserung der Überspannungslage. Selbst wenn man einen projektierten Anschluß 2 mit einer wesentlich niedrigeren als der Übertragungsspannung der Leitungen 1 ausführen könnte, sollte man diese Spannung verwenden, um Leitung 2, Abb. 20, an die ausschließlich dem Überspannungsschutz dienenden Hilfs-

sammelschienen *H S*, Abb. 18, anschließen zu können.

Am günstigsten für die Vorbeileitung und Verteilung von Wanderwellen liegen die Verhältnisse in Strahlen- und in Ringnetzen. In Ringnetzen können wir von einem Umlaufprinzip sprechen. Löst sich an irgendeinem Teile des Ringes eine Wanderwelle ab, so wird diese in der Regel nach beiden Seiten hin laufen. Sind die oben gestellten Forderungen in der Art erfüllt, daß die Welle jede Schaltstelle und jedes Unterwerk berühren kann, ohne Induktivitäten auf ihrem Wege zu treffen, so findet die Welle keine Hemmungen und kann den Ring durchlaufen. Beide Wellen werden sich an einem andern Teil des Ringes ungefähr auf der diametral gegenüberliegenden Seite wieder treffen und hier zu einer besonderen Spannungserhöhung Anlaß geben. Jedoch haben beide Wellen in der Zwischenzeit bereits soviel an Höhe verloren, daß sie bei diesem ersten Zusammentreffen wesentlich weniger gefährlich sind als im Augenblick ihrer Entstehung. Das Spiel des in entgegengesetzten Richtungen Herumlaufens wird sich einige Zeit lang wiederholen, bis die Amplitude beider Wellen auf ganz unbedeutende Beträge heruntergesunken ist.

Wer in diese Vorgänge etwas eingedrungen ist, der sieht, wie im Entstehungsgebiet der atmosphärischen Störung zwei Wanderwellen sich lösen, wie die eine auf das Werk trifft und hier, falls das Werk durch Kondensatoren geschützt ist, teils in die alte Bahn zurückgeworfen wird, teils aber, ihrer Schroffheit beraubt und auseinandergezogen, weiterleilt. Auch die zweite vom Störungsgebiet nach der entgegengesetzten Richtung abziehende Welle erfährt diese Umbildung in dem Unterwerke. Was sich im Haupt- und Unterwerk im großen abspielt, das wiederholt sich in den Schaltstellen und Transformatorstationen im kleinen; an jeder dieser Stellen löst sich von der vorbeigleitenden Welle ein Teil, der gegen ihre Richtung läuft, ab. In kürzester Zeit sehen wir an Stelle der beiden ursprünglichen Wellen ein scheinbar regelloses Durcheinander von Wellen und Wellchen, die im entgegengesetzten Sinne umlaufen. Kleine Wellenberge, die ebenso schnell wieder verschwinden, wie sie entstehen, bezeichnen an den verschiedensten Punkten des Netzes die Stellen, an denen zwei gegeneinander laufende Wellen zusammentreffen. Selbst wenn wir keine Dämpfung voraussetzen, werden unsere beiden gefahrdrohenden Flutwellen so auseinandergerissen und verlängert, daß sie unserem Netze nichts mehr anhaben können. Die Dämpfung vollendet das Werk, so daß nach

kurzer Zeit die ganze Ladung der beiden Wellen gleichmäßig auf dem Ringe lagert. Nur noch eine leichte, rasch abklingende Kräuselung in der gleichmäßigen Verteilung der Ladung läßt die ursprüngliche Wucht der Flutwellen ahnen.

Wenn erst die Vorstellungen über die Wanderwellen technisches Allgemeingut geworden sind, dann wird man sich darüber wundern, daß dieser Grundsatz nicht schon früher erkannt worden ist. Der Überspannungsschutz hat viel zu lange unter der Vorstellung der Ableitung gestanden. Dieses Verfahren hatte manches für sich. Es sind jedoch mit den Bedingungen, unter welchen Überspannungsableiter in der Praxis arbeiten, in den seltensten Fällen auch wirklich die Bedingungen für eine Ableitung von Überspannungen gegeben. Wie wir nachher noch sehen werden (Abschnitt IV), vermögen die üblichen Dämpfungswiderstände der Überspannungsableiter die auftretenden Überspannungen nur um geringe Beträge herabzusetzen. Es bleibt dem Zufall überlassen, daß das Prinzip, welches wir jetzt als grundlegendes Prinzip des Überspannungsschutzes betrachten müssen, mehr oder weniger vollkommen erfüllt wird.

Die Ringbildung von Netzen bildet ganz besondere Vorteile hinsichtlich des Überspannungsschutzes und in vielen Fällen war für den Entschluß, ein Netz als Ringnetz auszubilden, der Überspannungsschutz ein ausschlaggebender Beweggrund. Dadurch aber, daß in Unterwerken und in Schaltstellen das Netz durch die Auslösespulen und die Schutzdrosselspulen in verschiedene Abteilungen zerschnitten wurde, verlor das Netz seine Eigenschaft, als Ring zu wirken, denn es kann nicht genug betont werden, daß jede, auch die kleinste Induktivität für Wanderwellen eine scharfe Schranke, eine Störung der geforderten Einheitlichkeit bedeutet. In Ringnetzen mit Maschen liegen die Bedingungen hinsichtlich der Verteilung der Wanderwellen noch günstiger. Jeder Knotenpunkt wirkt im gleichen Sinne [Gl. (6)] wie das Werk.

An dieser Stelle darf der Hinweis nicht vergessen werden, daß jede Transformatorstation, die am Ende einer Stichleitung hängt, in ganz besonderem Maße gefährdet ist. Diese Tatsache ist jedem Praktiker zur Genüge bekannt. Nur der Vollständigkeit halber sei auch hier darauf hingewiesen, daß derartige Transformatorstationen nach Möglichkeit mit in den Ring hereinzu beziehen sind. Ist keine Möglichkeit nach dieser Richtung hin gegeben, so muß eine dortige Transformatorstation genau doppelt so gut geschützt werden wie

eine normale im Zuge eines Ringes am Ring hängende Transformatorstation.

Die Abb. 21 zeigt das heute noch fast allgemein übliche Schema eines Ring-

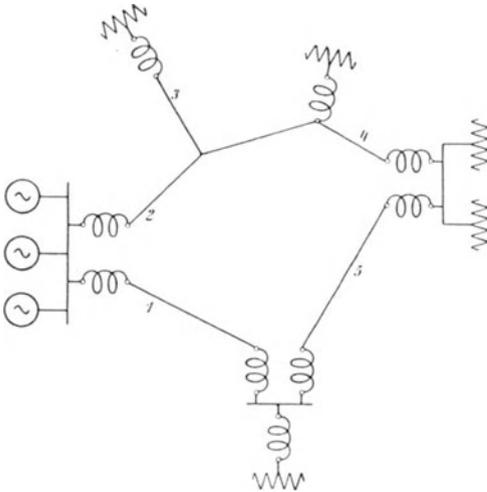


Abb. 21. Falsche Anordnung eines Netzes. Durch die Induktivitäten wird das Netz in verschiedene Abschnitte zerlegt.

netzes. Durch die Induktivitäten der Schutzdrosselspulen, Stromwandler usw., welche in den Abbildungen schematisch durch je eine Induktivität angedeutet sind, wird es in mehrere scharf voneinander geschiedene Abschnitte zerlegt. Bei Erd- und Kurzschlüssen auf der Ringseite 2, 3, 4 sind Spannungserhöhungen auf den Strecken 1 oder 5 möglich.

Außerdem sind sämtliche Sammelschienen, die ja alle durch Induktivitäten vom Netze abgetrennt sind, durch Wanderwellen-Resonanzüberspannungen gefährdet. Diese nach unseren heutigen Auffassungen grundsätzlich falsche Anordnung muß durch die Anordnung Abb. 22 ersetzt werden, bei welcher sämtliche Induktivitäten in ihrer Wirkung als trennende Glieder zwischen den einzelnen Netzteilen durch Überbrückung mit Ohmschen Widerständen unschädlich gemacht worden sind. Da es sich in erster Linie um die Überbrückung von Spulen mit Eisenkernen handelt, sind die überbrückten Spulen als solche dargestellt worden. Die punktierte Umkreisung der zum Schutze der Sammelschienen dienenden Drosselspulen soll andeuten, daß deren Verwendung nur bedingt, d. h. nur in Verbindung mit Kondensatoren, richtig ist. Die Verwendung der Hilfssammelschienen nach Abb. 18 erfüllt die Forderung der Vorbeileitung.

Die volle Einheitlichkeit eines Netzes hinsichtlich des Wellenwiderstandes läßt sich in Freileitungsanlagen ohne Schwierigkeit durchführen. In Kabelnetzen verbleiben dagegen als Stellen mit einer gewissen Gefährdung die Sammelschienen, welche wie kleine Induktivitäten wirken. Der Wellenwiderstand erfährt bei dem Übergang von Kabel zu Sammelschiene einen Sprung um etwa das Zehnfache. Eine Überspannung annähernd drei- bzw. vierfacher Höhe ist deshalb stets in Kabelnetzen an Sammelschienen besonders größerer Ausdehnung in Rechnung zu ziehen, falls diese Sammelschienen nicht besonders, z. B. durch Kondensatoren, geschützt werden.

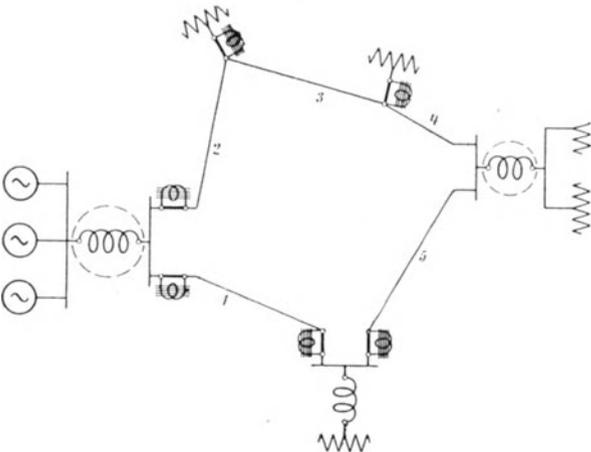


Abb. 22. Richtige Anordnung eines Netzes. Das Netz zeigt vollkommene Einheitlichkeit. Alle von Wanderwellen berührten Induktivitäten sind überbrückt.

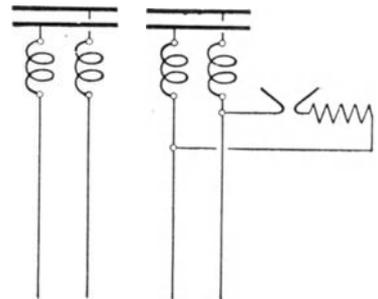


Abb. 24 a.

Abb. 24 b.

Während diese Erörterungen in gleicher Weise sowohl für Kabel- wie auch für Freileitungsnetze ihre Gültigkeit besitzen, kommt für Freileitungsnetze noch ein weiteres vorbeugendes Schutzmittel hinzu, nämlich das Blitzseil. Gegen die Blitzseile sind von verschiedener Seite Einwände erhoben worden. Einer im Anschluß an diesen Aufsatz in der

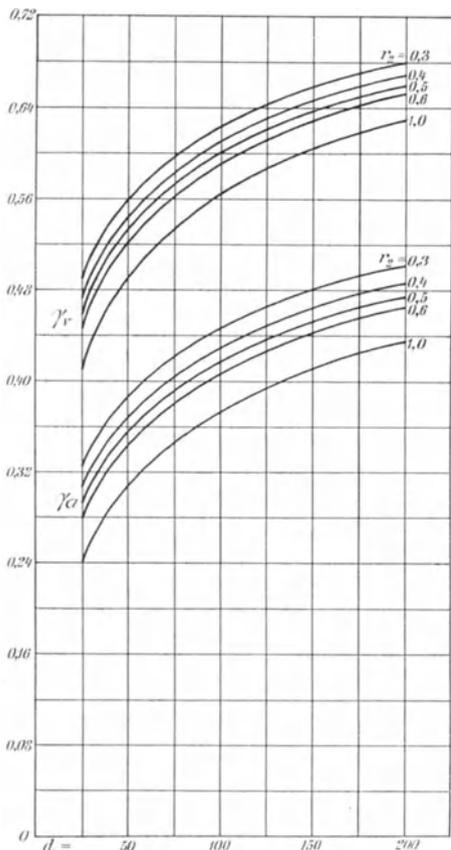


Abb. 23. Verhältnis der Spannungen γ_v und der Energieinhalte γ_e einer durch Blitzseil geschützten eindrängigen Leitung zu den Spannungen und Energiebeträgen der ungeschützten Leitung.

„ETZ“ erscheinenden Arbeit „Der Schutzwert von Blitzseilen“ entnehmen wir die Abb. 23, aus welcher man ersehen kann, daß man bei der üblichen Anordnung von Blitzseilen hinsichtlich der Höhe der Überspannungen durchschnittlich mit einer Herabsetzung um 40 %, hinsichtlich des Energieinhaltes der in Gang gesetzten Wanderwellen mit einer Verminderung um durchschnittlich 60 % zu rechnen hat. Ich kann es ruhig dem Urteile überlassen, ob

man diesen Schutzwert als ungenügend bezeichnen darf oder nicht. Für meine Person würde ich ein Werk mit wesentlich größerer Ruhe betreiben, wenn ich wüßte, daß die bei einem Gewitter in Gang gesetzten Wanderwellen nur mit der halben Stoßkraft auf mein Werk auftreffen. Selbstredend ist dieser Schutz kein vollkommener, aber die 60 % dürften als genügende Rechtfertigung für die Verwendung von Blitzseilen gelten. Die mit Blitzseilen gemachten Erfahrungen können übrigens recht gut als experimenteller Beweis für diese auf theoretischem Wege gewonnenen Zahlen gelten.

Wenn wir jetzt von den vorbeugenden Schutzmaßnahmen zu den eigentlichen Schutzapparaten übergehen, so müssen wir zunächst die Frage beantworten, auf welche Weise die Ladungen, welche als Reste der Wanderwellen verbleiben, aus einem Netze herauszuschaffen sind. Ich darf es wohl als bekannt voraussetzen, daß sich die ursprünglich auf einen kleinen Bezirk zusammengedrängte Ladung einer Wanderwelle, die durch eine atmosphärische Störung ausgelöst worden ist, mit zunehmender Dämpfung und infolge der getroffenen Maßnahmen immer größere Leitungstrecken als Sitz beansprucht, bis dann schließlich, nachdem sich die Wanderwelle ausgetobt hat, die Ladung sich gleichmäßig über das ganze Netz verteilt. Mit der Abführung dieser Ladungen haben wir keine allzu große Eile. Sie bedingt allerdings eine bestimmte Überspannung, die aber durchweg bedeutungslos ist gegenüber der ursprünglichen Höhe der Überspannung. Wir können für deren Abführung, abgesehen von Funkenableitern, welche man in diesem Falle vollkommen außer Betracht ziehen sollte, die Wasserstrahlerder und die Erdungsdrosselspulen oder die Erdung des neutralen Punktes über Erdungsdrosselspulen oder Ohmsche Widerstände anwenden. In der ersten Entwicklungszeit der Hochspannungsanlagen haben die Wasserstrahlerder ganz gute Dienste geleistet. Daß diese Erder aber heutzutage noch verwendet werden, das kann ich mir nur damit erklären, daß die Praxis häufig höchst konservativ ist, und daß vor allen Dingen den Wasserstrahlerdern geheimnisvolle Eigenschaften angedichtet worden sind, welche sie gar nicht besitzen. Die Bedeutung eines hohen Sicherheitsfaktors hat besonders in den letzten Jahren nach den Arbeiten Kuhlmanns und Vogelsangs allgemeine Geltung in der Hochspannungstechnik erhalten; trotzdem werden in Anlagen, die in jeder Hinsicht mit der größten Vorsicht gebaut sind, diese recht unzuverlässigen Apparate eingebaut. Irgendeine Rechtfertigung

für ihre weitere Beibehaltung besteht nicht. Die Erdungsdrosselspulen sind in der gleichen Weise geeignet, statische Ladungen abzuführen, und es besteht auch hinsichtlich des Preises kein in Betracht kommender Unterschied zwischen den beiden Apparaten. Die Sage, daß der Wasserstrahler in der Lage ist, hochfrequente Schwingungen oder gar andere kurzzeitige Überspannungen zu beseitigen, wird im Abschnitt IV an der Hand eines Beispiels recht ungläubhaft gemacht. Doch steckt in dieser Ansicht ein richtiger Kern. In Übereinstimmung mit dahingehenden zahlenmäßigen Rechnungen sind Wasserstrahler mit geringem Widerstand in Anlagen bis zu etwa 10 KV in der Lage, Wanderwellen-Resonanzüberspannungen an Sammelschienen unschädlich zu machen. In dieser Hinsicht sind sie den Erdungsdrosselspulen überlegen. Mit der Einführung der gegen diese Überspannungen gerichteten Maßnahmen wird jedoch diese Schutzwirkung überflüssig.

Zum Schutze von Maschinen und Transformatoren gegen Spannungssprünge dienen Drosselspulen für sich, Kondensatoren für sich oder beide in beliebiger Vereinigung. Daß die Anordnung Abb. 24a, bei welcher Schutzdrosselspulen vor einem Sammelschienensystem liegen, statt die an die Sammelschienen angeschlossenen Apparate zu schützen, durch die Möglichkeit der Ausbildung von Resonanzüberspannungen, die Mitursache der schwersten Gefährdung für das Sammelschienensystem bilden kann, habe ich im Archivheft 6, (November 1912) nachgewiesen und die Erklärung dafür gegeben, weshalb die Stützisolatoren, z. B. der Sammelschienen, überschlagen werden können, selbst wenn ein empfindlich eingestellter Hörnerableiter Abb. 24b. vor den „Schutz“ drosselspulen vollkommen ruhig bleibt. Die Drosselspule ist wohl in der Lage, den ersten Stoß zu mildern und dementsprechend auch Wicklungen gegen Spannungsstöße einigermaßen zu schützen. Man kann aber mit Recht bezweifeln, ob auch tatsächlich die praktisch verwendeten Drosselspulen dieser Aufgabe immer gerecht werden, da die Eigenfrequenz des Systems Drosselspule—Sammelschiene unter Umständen noch so hoch ist, daß trotz der sinusartigen Form der Eigenschwingung in Wicklungen die im Abschnitt II besprochenen Spannungsunterschiede auftreten. Nach der jetzigen Sachlage müssen wir den schärfsten Kampf gegen diese Art von Drosselspulen führen, sie sind für sich allein wohl ab und zu von Nutzen, in viel häufigeren Fällen jedoch von Schaden für die zu schützenden Apparate.

Sollen Drosselspulen den gleichen Schutzwert besitzen wie Kondensatoren, so müssen sie ganz erheblich größer bemessen werden, als es heutzutage allgemein üblich ist. Nur die Drosselspulen mit sehr großem Kupferaufwand, z. B. die der Siemens-Schuckertwerke können hinsichtlich ihrer Schutzwirkung einen Vergleich mit den Kondensatoren aushalten.

Während die Schutzdrosselspulen auf den Wellenwiderstand der z. B. zu schützenden Transformatoren abgestimmt werden müssen, und beim Fehlen dieser Abstimmung nach Auswechslung eines Transformators z. B. versagen, schützen Kondensatoren eine Transformatorstation unabhängig von der Größe der Wellenwiderstände der angeschlossenen Transformatoren, da deren den Schutz noch verbessernde Wirkung überhaupt nicht berücksichtigt wird. Wir wiederholen nochmals: die Drosselspule kann nur in Verbindung mit dem Wellenwiderstand der angeschlossenen Apparate schützend wirken, der Kondensator schützt, ohne sich auf diese Wellenwiderstände stützen zu müssen.

Die Schutzwirkung von Kondensatoren ist in ganz unzweideutiger Weise theoretisch in der obengenannten Arbeit nachgewiesen worden. Jede auftretende Welle mit rechteckiger Stirn wird in der durchgreifendsten Weise umgebildet. An Stelle des plötzlichen Spannungssprunges, der ohne Kondensator die Eingangswindungen treffen würde, erscheint eine sanft ansteigende Exponentialkurve als Form des Anstieges der Spannung. Abb. 25 gibt diesen Anstieg der Spannung wieder unter der Voraussetzung, daß auf einem derartigen Kondensator eine rechteckige Wanderwelle von der in der Abbildung eingezeichneten Länge trifft. Die obere Kurve I gilt für einen kleineren Kondensator, während die untere Kurve II den Verlauf der Spannung für einen Kondensator mit fünffacher Größe wiedergibt. Durch Wahl der Schutzkapazität hat man es vollkommen in der Hand, auftretenden Wellen ihre Schroffheit zu nehmen, d. h. deren Stirn in beliebiger Weise umzubilden, abzuflachen. Wie weit wir hierbei zu gehen haben, das können wir heutzutage noch nicht mit Bestimmtheit sagen, denn dazu fehlen uns ausreichende praktische Erfahrungen an Transformatoren und Maschinen. Es bedarf noch eingehender Versuche nach dieser Richtung hin, um die unter allen Umständen richtige Größe der Schutzkapazität bestimmen zu können.

Neben dieser einen Aufgabe, die Stirn rechteckiger Wellen umzubilden, fällt den Schutzkondensatoren unter Umständen noch die weitere Aufgabe zu: die Höhe einer auf-

treffenden Welle herabzusetzen. Sie erfüllen endlich von selber die an die Spitze unserer Betrachtungen gestellte Aufgabe, auftretende Wellen zurückzuwerfen und in die Länge zu ziehen. Die Abb. 25 zeigt uns besonders mit der untern Kurve II, wie nicht nur die Form der Wellenstirn umgebildet wird, sondern wie auch die Höhe der Welle ganz bedeutend bei genügender Größe der Schutzkapazität herabgesetzt werden kann.

Wenn wir ein Kraftwerk W mit Kondensatoren zu schützen haben, so werden wir am besten zu der Schaltung Abb. 26 (links) greifen. Bei dieser Schaltung werden auftretende Wanderwellen unmittelbar den Kondensator berühren und von diesem z. T. auf das Netz zurückgeworfen werden, während der Rest mit umgebildeter, d. h. gefahrloser Wellenstirn und beseitigten Sprüngen auf den anderen an die Hilfsschienen HS angeschlossenen Leitungen weiterläuft. Ohne Drosselspulen können wir jedoch nicht auskommen. Es vergeht nämlich unter allen Umständen eine ganz bestimmte Zeit, bevor der Kondensator in Wirksamkeit tritt. Eine auftretende Wanderwelle wird sich in der Anlage ohne Drosselspulen am Anschlußpunkt des Kondensators so verzweigen, daß der eine Teil über den Kondensator nach Erde läuft, während der zweite Teil auf die Sammelschienen trifft und an den angeschlossenen Apparaten Unheil stiften kann. Von der Existenz des Kondensators merkt, um den Ausdruck zu benutzen, die Wanderwelle bei der ersten Berührung mit dem Kondensator so gut wie gar nichts. Sie durchläuft den Kondensator wie irgendein beliebiges Stück Leitung und gelangt unverändert bis zur Erdplatte. Erst hier, nämlich an der Erdung, wird die Wanderwelle unter Verlust ihrer Spannung zurückgeworfen. Es ist sehr wichtig, auf diesen Punkt hinzuweisen, daß die eigentliche Reflexion zunächst nicht am Kondensator, sondern an der Erde stattfindet. Die Tatsache der Reflexion, die Tatsache des Verschwindens der Wellenspannung wird an den Sammelschienen erst dann bekannt, wenn die reflektierte Teilwelle von der Erdplatte wieder bis zum Abzweigpunkt zurückgelaufen ist. Die Zeit, welche hierfür nötig ist, ist außerordentlich kostbar. In diesen Milliontelsekunden kann der größte Schaden an den Sammelschienen angerichtet werden. Und um diese Gefahr zu beseitigen, müssen wir auf die vorher verworfene Drosselspule zurückgreifen. Hier nutzen wir aber nur

für sehr kurze Zeiten ihre Eigenschaft aus, die Wellenstirn umzubilden. Ihr Ausschwingen in Verbindung mit der Sammelschienenkapazität in der ersterwähnten verderblichen Form wird von dem Augenblick ab, in welchem die über die Schutzkapazität nach Erde gewanderte Welle zurückgekommen ist, unmöglich gemacht, falls die Schutzkapazität groß genug ist. Im Abschnitt IV sind die sehr schwachen Eigenschwingungen, welche ein durch Kapazität geschütztes System ausführen kann, rechnerisch ermittelt.

Im Abschnitt IV dieses Vortrages wird weiterhin der Nachweis erbracht, daß der Schutzwert der Anordnung Abb. 27, in welcher die Schutzdrosselspule vor der Schutzkapazität liegt, gegenüber dem Schutzwert einer Kapazität in der in Abb. 26 gegebenen Schaltung, soweit es den Schutz aller hinter der Kapazität liegenden Teile (Sammelschienen) anbetrifft, nicht sonderlich höher ist. Zwar erfolgt der Anstieg der Spannung bei der Reihenschaltung Drosselspule-Kapazität (Abb. 27) im Anfange, nach dem ersten Auftreffen einer Welle erheblich langsamer als bei der Verwendung einer Schutzkapazität ohne Drosselspule, so daß kurze Wanderwellen nur zu geringer Spannungserhöhung Anlaß geben. Je länger jedoch eine auftretende Welle ist, desto mehr verschwindet dieser Unterschied, bis endlich die Spannung an der Schutzkapazität in der Schaltung Abb. 27 etwas höhere Werte annehmen kann als in der Schaltung ohne vorgeschaltete Schutzdrosselspule.

Faßt man aber die Spannungen an den

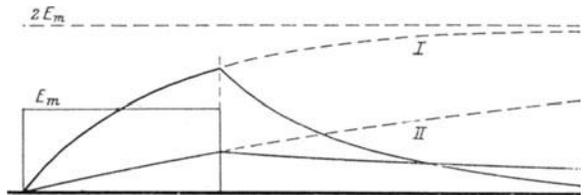


Abb. 25. Anstieg der Spannung an einem von einer rechteckigen Wanderwelle getroffenen Kondensator. Die Kurve II gilt für die fünf-fache Kapazität wie die Kurve I.

Hilfsschienen, die Zurückwerfung der Wellen und deren Vorbeileitung ins Auge, so bietet die Schaltung ohne vorgeschaltete Schutzinduktivität ganz erhebliche Vorteile, welche ihre alleinige Verwendung in Kopferwerken rechtfertigen.

In einem Kopferwerke wird eine ankommende Welle mit senkrechter Stirn an der Reihenschaltung Abb. 27 unter allen Umständen ebenso wie jeder Sprung im ersten Augenblick des Auftreffens unter Verdopp-

lung der Spannung zurückgeworfen, so daß alle vor der Schutzanordnung liegenden Teile des Werkes und die Leitungen unter dieser Spannungserhöhung zu leiden haben. Im schroffsten Gegensatz hierzu verschwindet bei der einfachen Schaltung die Spannung der ankommenden Welle im Augenblicke des Auftreffens, im Werke und in dessen Nachbarschaft, um bei genügender Größe der Schutzkapazität überhaupt unterhalb der Wellenspannung zu bleiben.

In „Durchgangswerken“ tritt diese Verdopplung der Spannung oder die Verdopplung von jedem Sprung infolge der durch die andern Leitungen ermöglichten Vorbeileitung der Welle nicht mehr auf. Da aber die Reihenschaltung keinen Spannungssprung im ersten Augenblick umformen kann, durchlaufen diese Sprünge ungeändert das Werk und gehen auf die andern Leitungen über. Bei der ein-

Mit zunehmender Zahl der in das Durchgangswerk mündenden Leitungen ändert sich das Bild insofern, als die Leitungen ohne Mitwirkung irgendwelcher Schutzapparate in der Lage sind, eine ankommende Welle z. T. in die alte Bahn zurückzuwerfen. In einem Werke z. B., von welchem vier einzelne Leitungsstränge strahlenförmig ausgehen, würde — gleicher Wellenwiderstand aller Leitungen vorausgesetzt — eine auf der einen Leitung ankommende Welle so umgeformt, daß jede der drei andern Leitungen Wellen mit der halben Spannung weiterführen, während der Rest der ankommenden Welle mit der halben Spannung und dem vierten Teile des Energieinhaltes in die alte Bahn zurückgeworfen wird. In diesem und in ähnlichen Fällen würde die Schaltung Abb. 26 der Schaltung Abb. 27 gleichwertig sein. Beide haben ihre Vor- und Nachteile, die sich aber wohl gegenseitig die Wage halten. Es würde hier zu weit führen,

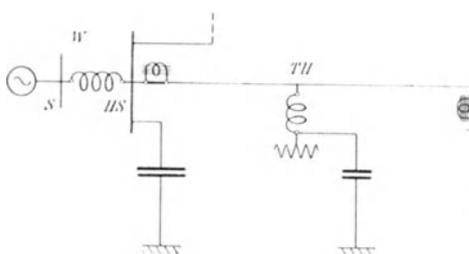


Abb. 26. Überspannungsschutz eines Netzteiles.

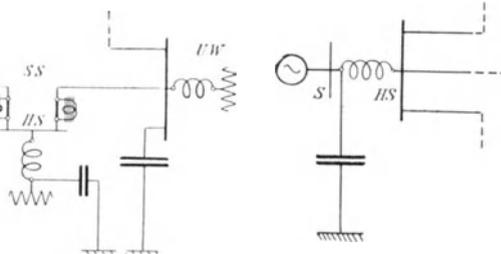


Abb. 27. Reihenschaltung von Drosselspule und Kondensator.

fachen Schaltung wird jeder Sprung umgeformt, so daß alle Leitungen, welche die Weiterleitung einer Wanderwelle übernehmen, sprungfreie Wellen erhalten. Die Schutzkapazität in der einfachen Schaltung schützt nicht nur das Werk, sondern auch die abgehenden Leitungen mit zugehörigen Anhängseln. Nur die in die alte Bahn zurückgeworfene Welle zeigt die Spannungssprünge der ursprünglichen Welle.

Münden im Durchgangswerk nur zwei Leitungsstränge ein, so ist die einfache Schaltung auch deshalb unbedingt am Platze, weil nur die unmittelbar angeschlossene Kapazität sofort in den denkbar stärksten Maße mit der Zurückwerfung eines Teiles der ankommenden Welle in die alte Bahn beginnt. In der Schaltung Abb. 27 würde eine auftreffende Welle zunächst in der vollen Höhe auf der zweiten Leitung weiterlaufen. Erst nach und nach macht sich die Zurückwerfung durch die Reihenschaltung von Selbstinduktivität und Kapazität bemerkbar.

uns mit diesen Einzelheiten des Schutzes näher zu befassen.

Man könnte einwenden, daß durch die Schaltung Abb. 27 die Resonanzgefahr künstlich herbeigeführt wird, welche bisher auf das schärfste bekämpft worden ist. Diese Bedenken sind jedoch leicht zu zerstreuen. In den Schwingungsgleichungen spielt der Wellenwiderstand die Rolle eines Dämpfungswiderstandes. Die Kapazitäten der Sammelschienensysteme und von kürzeren Leitungsstrecken sind so klein, daß die Dämpfung durch den Wellenwiderstand nicht in der Lage ist, das gefährliche Ausschlagen zu verhindern. Dagegen kann die Kapazität und die Induktivität jeder Schutzanordnung so groß gewählt werden, daß das fragliche System entweder überhaupt nicht in der Lage ist, zu schwingen, oder daß es noch Schwingungen ausführt, die aber so stark gedämpft sind, daß keine gefährlichen Überspannungen mehr möglich sind. Es ist eine einfache Aufgabe, diese Verhältnisse mit

vollkommener Zuverlässigkeit rechnerisch festzulegen.

Der Schutz von Transformatoren und Motoren, die an einem Netze hängen, sollte ausschließlich ein Wicklungsschutz sein. Wenn wir deshalb auch bei diesen zu Kondensatoren greifen, so werden wir auf die zurückwerfende Wirkung der Schutzkapazität kein Gewicht legen und dementsprechend die Kapazität dieser Schutz Batterien verhältnismäßig klein wählen. In den Transformatorstationen kommt aus diesem Grunde ausschließlich die Schaltung Abb. 27 in Betracht. Den langsameren Anstieg der Spannung, der besonders bei kürzeren Wellen von Vorteil sein kann, können wir hier ausnutzen. Dann spricht aber noch ein weiterer sehr wichtiger Grund für die Schaltung Abb. 21. Für den Windungsschutz genügen nämlich Kapazitäten von etwa 0,005 bis 0,015 Mikrofarad. Würden diese Kapazitäten in der Schaltung Abb. 26 verwendet, so unterdrücken diese nicht mehr mit voller Sicherheit das Ausschwingen des Systems Schutzdrosselspule—Sammelschienen. Kommt noch der Fall vor, daß einzelne Elemente der Schutz Batterien zugrunde gehen, so kann trotz der vorhandenen Batterie eine übermäßige Spannungserhöhung an den Sammelschienen auftreten. In der Schaltung Abb. 27 ist das Ausschwingen in der befürchteten Weise so gut wie ausgeschlossen.

Im Einklang mit den Überlegungen dieses Abschnittes ist das Netz Abb. 26 im Werke *W* und dem wichtigen Unterwerk *UW* nach der einfachen Schaltung geschützt. Die Transformatorenhäuser *TH* und die Schaltstellen *SS* sind durch kleine Batterien mit vorgeschalteten Schutzspulen gesichert.

Einen sehr beschränkten, allerdings in dieser Beschränkung vorzüglichen Schutz gegen schroffe Spannungssprünge und gegen Resonanzüberspannungen von Wanderwellen bei Schaltvorgängen bilden die Schutzschalter mit Vorkontakten, die durch ihre Wirkung die Spannungssprünge der Wanderwellen zwar nicht ganz beseitigen können, aber doch erheblich herabsetzen. Beschränkt müssen wir den Schutzwert nennen, weil er nur Schutz bei Lade- und Entladewellen, die bei Schaltbewegungen auftreten, bietet. Wenn wir erst unsere Netze systematisch gegen jeden Spannungssprung, der durch Lade- und Entladewellen auftreten kann, geschützt haben, dann ist der Schalter mit Vorkontakt überflüssig. Ich habe die Überzeugung, daß diese Schalter, die sich übrigens ausgezeichnet bewährt haben, nur eine Entwicklungsstufe vorstellen. Sie werden jedenfalls später wieder verschwinden, da in einem Netze mit Wander-

wellenschutz der angeschlossenen Apparate, in welchem die Möglichkeit der Entstehung von Resonanzüberspannungen beseitigt worden ist, ihre Wirkung überflüssig ist. Ihre ungeschmälerte Bedeutung als Schutzschalter gegen Stromstöße werden sie in Verbindung mit allen Apparaten beibehalten, deren magnetischer Stromkreis Eisen enthält, wie z. B. Transformatoren und Asynchronmotoren.

Im Zusammenhang mit diesen Ausführungen über den Überspannungsschutz muß auf die Bedeutung der richtigen Wahl des Sicherheitsgrades hingewiesen werden. Besonders in Freileitungsanlagen mittlerer (Hoch-) Spannung wird insofern gefehlt, als die Überschlagsspannung der Freileitungsisolatoren im Verhältnis zu der Überschlagsspannung der Innenraumisolatoren und der Festigkeit der angeschlossenen Apparate zu hoch gewählt wird.

Die Festlegung des Sicherheitsfaktors bietet insofern Schwierigkeiten, als der gewöhnliche Freileitungsisolator je nach dem Grade seiner Benetzung verschiedene Überschlagsspannungen aufweist. Es grenzt an Verschwendung, wenn man die Trocken-Überschlagsspannung der Festlegung des Sicherheitsgrades im Werk und in Unterwerken zugrunde legt. Und doch müßte man eigentlich diese übermäßig hohen Sicherheitsgrade wählen, da erfahrungsgemäß das meiste Unheil im Anfange von Gewittern angerichtet wird, wenn die Isolatoren noch wenig benetzt sind. Nach dem ersten Regenschauer wird dieser Sicherheitsgrad überflüssig. Nach meiner Ansicht befreit uns der Metaldachisolator aus dieser zweifelhaften Lage; seine Überschlagsspannung ist ja nur wenig von der Benetzung abhängig.

Gegenüber dem gewöhnlichen Isolator weist übrigens der Metaldachisolator noch einen weiteren Vorzug auf. Die kühlenden Flächen des Porzellanisolators begünstigen besonders bei Erdschlüssen die Ausbildung von Partialentladungen; dem ersten am Metaldachisolator erscheinenden Funken folgt in der Regel ein überspannungsfrei verlöschender Lichtbogen nach.

Die Erklärung für das große Geheimnis, daß es der einen Gesellschaft gelingt, störungsfreie Anlagen zu bauen, während die andere in einer unter gleichen äußeren Verhältnissen errichteten Anlage nicht aus den Störungen herauskommt, liegt häufig nur an der rücksichtslosen Durchführung eines einheitlichen Sicherheitsgrades und in der Isolierung am richtigen Platze. Und zwar denke ich hierbei besonders an die Isolierung von Transformatoren. So isoliert z. B. Korndörfer bei der

Allgemeinen Electricitäts-Gesellschaft die Eingangswindungen so hoch, daß sie kurzzeitig die doppelte Betriebsspannung zwischen Windung und Windung aushalten können, während auch der übrige Teil der Hochspannungswicklung mit einer ausgezeichneten Isolation von Windung gegen Windung versehen wird. Derartige Transformatoren kann man im wahrsten Sinne des Wortes mißhandeln, ohne Windungsschlüsse befürchten zu müssen.

IV. Einzelheiten des Überspannungsschutzes.

Einige Regeln für das Rechnen mit Wanderwellen. Ein großer Teil der sich bei der Untersuchung der Überspannungen und des Überspannungsschutzes ergebenden Fragen läßt sich in einfacher Weise mit Hilfe folgender Regel lösen. (Reflexionsregel.)

Trifft eine Wanderwelle beliebiger Form am Ende der Leitung mit dem Wellenwiderstande W_1 auf eine beliebige Kombination von Ohmschen, induktiven, kapazitiven Widerständen und weiteren Wellenwiderständen — d. h. Leitungen, die von diesem Knotenpunkt ausgehen — so sind die Gleichungen dieser Anordnung gegeben durch die Gleichungen eines Stromkreises, in welchem an Stelle der Leitungen beliebiger Länge mit den Wellenwiderständen W_1, W_2, W_3, \dots Ohmsche Widerstände mit den Beträgen $R_1 = W_1, R_2 = W_2, R_3 = W_3 \dots$ treten, und auf welchen über den Ohmschen Widerstand $R_1 = W_1$ die doppelte Wellenspannung (beliebiger Form) in dem Augenblicke geschaltet wird, in welchem die Wanderwelle auf die tatsächlich vorhandene Anordnung trifft. Die hierdurch festgelegte Gleichung besteht so lange unverändert, bis eine aus den Leitungen W_1, W_2, W_3, \dots kommende neue Welle (es wird dies meist eine reflektierte Welle sein) auf den Knotenpunkt trifft. Die Übereinanderlagerung der durch die neue Welle hervorgerufenen Vorgänge über die bereits vorhandenen gibt von Fall zu Fall den herrschenden Schwingungszustand!).

Nach diesem Satze lassen sich die fraglichen Fälle auf einfache Stromkreise mit getrennten Widerständen, Kapazitäten und Induktivitäten zurückführen. Da deren Gleichungen auch für nicht stationäre Vorgänge bekannt sind, erspart man sich besondere Rechnungen.

Im allgemeinen wird man die Gleichungen nach dem Strome in einem der Zweige auflösen und aus diesem den Augenblickswert der Spannung im Knotenpunkt und an einzelnen Bestandteilen des betrachteten Zweiges berech-

nen. Aus dem zeitlichen Verlauf der Spannung im Knotenpunkte ergibt sich ohne weiteres der örtliche Verlauf der in eine abgehende Leitung einziehenden Welle. Die in die ursprüngliche Leitung zurückgeworfene Welle ist durch die Differenz: Augenblickswert der Spannung im Knotenpunkt minus Augenblickswert der Spannung der auftreffenden Welle gegeben. Bezeichnen wir mit w_2 den zeitlich veränderlichen Augenblickswert des Ersatzwellenwiderstandes aller an den Knotenpunkt angeschlossenen Widerstände beliebiger Art mit Ausnahme des Wellenwiderstandes W_1 der Leitung, auf welcher die Wanderwelle herankommt, so können wir die Gleichungen der unvollkommenen Reflexion verwenden und

$$q = \frac{w_2 - W_1}{w_2 + W_1}$$

einführen¹⁾. Die in w_2 einziehende Welle wird dann:

$$e_{12} = i_{12} w_2 = e_1 (1 + q) = 2 e_1 \frac{w_2}{W_1 + w_2} \quad (1a)$$

der zugehörige Strom:

$$i_{12} = \frac{e_1}{w_2} (1 + q) \dots \dots (1b)$$

die zurückgeworfene Welle, die auf der Leitung mit W_1 zurückläuft:

$$e_{11} = e_1 q = e_1 \frac{w_2 - W_1}{w_2 + W_1} \dots \dots (2a)$$

der zugehörige Strom:

$$i_{11} = - \frac{e_1}{W_1} q, \dots \dots (2b)$$

wenn der e_1 Augenblickswert (im Übergangspunkte) der aus der Leitung W_1 kommenden Welle ist.

Neben der Reflexionsregel kommt besonders für Einschaltvorgänge die Übergangsregel in Betracht. Diese lautet:

Wird eine unter der Spannung e_1 stehende Leitung mit dem Wellenwiderstande W_1 plötzlich auf eine beliebige Kombination von Ohmschen, induktiven, kapazitiven Widerständen und weiteren Wellenwiderständen geschaltet, so sind die Gleichungen dieser Anordnung gegeben durch die Gleichungen eines Stromkreises, in welchem an Stelle der Leitungen beliebiger Länge mit den Wellenwiderständen $W_1, W_2, W_3 \dots$ Ohmsche Widerstände mit den Beträgen $R_1 = W_1, R_2 = W_2, R_3 = W_3 \dots$ treten, und auf welchen über den Ohmschen Widerstand $R_1 = W_1$ die einfache auf der

¹⁾ Petersen. „Archiv f. Elektrot.“, 1911, Heft 6. Der gleiche Satz ist ganz unabhängig hiervon 14 Tage später von Piffner, „Wiener Z. f. E. u. M.“, veröffentlicht worden.

¹⁾ „Archiv f. Elektrot.“, 1912, Heft 6, S. 237.

Leitung W_1 herrschende Spannung (beliebiger Form) in dem Augenblicke geschaltet wird, in welchem die Einschaltung erfolgt. Die hierdurch festgelegte Gleichung besteht solange unverändert, bis eine aus den Leitungen $W_1, W_2, W_3 \dots$ kommende neue Welle (es wird dies meist eine reflektierte Welle sein) auf den Knotenpunkt trifft. Die Übereinanderlagerung der durch die neue Welle hervorgerufenen Vorgänge über die bereits vorhandenen gibt von Fall zu Fall den herrschenden Schwingungszustand.

Bezeichnen wir wie vorher mit w_2 den zeitlich veränderlichen Ersatzwiderstand der Kombination beliebiger Widerstände und mit

$$q' = \frac{W_1}{W_1 + w_2}$$

den „Übergangsfaktor“, so wird der inf w_2 einziehende Strom

$$i_{12} = \frac{e_1}{W_1 + w_2} \dots \dots (3a)$$

die Spannung der zugehörigen Welle

$$e_{12} = i_{12} w_2 = e_1 \frac{w_2}{W_1 + w_2} = e_1 (1 - q') (3b)$$

(„Ladewelle“) und die Spannung der rückläufigen oder „Entladewelle“:

$$e_{12} = -e_1 \frac{W_1}{W_1 + w_2} = -e_1 q' \dots (4)$$

Als Beispiel wenden wir den ersten Satz zunächst auf den einfachen Fall an, daß eine rechteckige Wanderwelle mit der Spannung E_m am Ende der Leitung 1 (Abb. 28a) mit dem

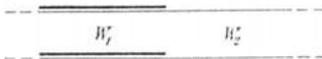


Abb. 28a. Reihenschaltung von zwei Leitungen mit ungleichen Wellenwiderständen.

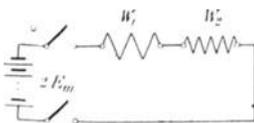


Abb. 28b. Ersatzschema zu Abb. 28a.

Wellenwiderstand W_1 auf eine Leitung 2 mit dem Wellenwiderstand W_2 trifft. Wir können, wenn wir uns das Ersatzschema Abb. 28b zeichnen, ohne weiteres niederschreiben:

Strom der in W_2 einziehenden Welle:

$$i_{12} = \frac{2 E_m}{W_1 + W_2},$$

Spannung der in W_2 einziehenden Welle:

$$e_{12} = \frac{2 E_m W_2}{W_1 + W_2} = E_m (1 + q),$$

Spannung der zurückgeworfenen Welle

$$e_{11} = e_{12} - e_1 = E_m \frac{W_2 - W_1}{W_2 + W_1} = E_m q,$$

Zugehöriger Strom:

$$i_{11} = -\frac{e_{12} - e_1}{W_1} = -\frac{E_m q}{W_1}.$$

Von besonderem Interesse im Vergleich zu der später behandelten Reflexion an einem Kondensator ist die Zurückwerfung in einem Kurzschlußpunkt. In diesem Fall ist in der Gleichung $W_2 = 0$ zu setzen, und wir erhalten:

$$q = -1,$$

daher die Spannung der zurückgeworfenen Welle:

$$e_{11} = -E_m,$$

und den zugehörigen Strom:

$$e_{11} = +\frac{E_m}{W_1}.$$

Die auftreffende Rechteckwelle Abb. 29 wird bei der Zurückwerfung „umgeformt“ und läuft in der Gestalt Abb. 30 zurück.

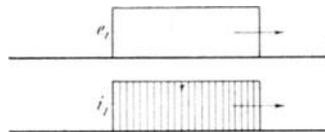


Abb. 29.

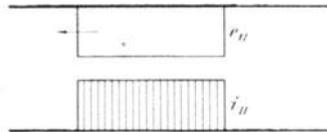


Abb. 30.

Trifft die Rechteckwelle auf ein offenes Leitungsende, so muß $W_2 = \infty$ eingeführt werden, und es wird

$$q = +1.$$

Die Spannung am „Zurückwerfungspunkt“, nämlich dem offenen Leitungsende, ist:

$$e_{12} = 2 E_m,$$

die Spannung der zurückgeworfenen Welle:

$$e_{11} = E_m,$$

der Strom:

$$i_{11} = - \frac{E_m}{W_1}.$$

Diese Stichproben dürfen auch als Beispiel dafür gelten, wie einfach Wanderwellenaufgaben zu bewältigen sind, wenn der oben gegebene Satz angewendet wird.

Schutzwert von Funkenableitern mit Dämpfungswiderständen.

Zur Überschätzung der Funkenableiter hat wohl der Umstand mit beigetragen, daß man sich keine Rechenschaft über die zur Ableitung der zu einer Überspannung gehörigen Ladung erforderlichen Zeit abgeleitet hat. Es ist viel zu wenig bekannt, und es wird viel zu wenig damit gerechnet, daß die meisten Überspannungsvorgänge ungemein kurzzeitig sind, und daß zur Ausbildung eines Durchschlages bei der gleichen Spannung wie im Dauerbetrieb eine zwar merkbare aber doch nur sehr kurze Zeit nötig ist. In Luft z. B. liegt die zur Ausbildung des Durchschlages oder Überschlages erforderliche Zeit, je nach der Länge der Funkenbahn, zwischen 10^{-6} und 10^{-7} Sek; in Öl dagegen kann man mit der etwa 10-fachen Zeit rechnen, soweit sich aus Versuchen, die noch nicht abgeschlossen sind, schließen läßt.

Wenn eine Leitung mit der Länge l' und dem Wellenwiderstand W_1 , die unter der Überspannung $e_{\ddot{u}}$ steht, nach Ansprechen eines Funkenableiters über einen Widerstand R entladen wird, so beginnt diese Entladung mit der Entladewelle:

$$e_{11} = - \frac{e_{\ddot{u}} W_1}{W_1 + R} = - e_{11} q'.$$

Den Faktor

$$q' = c q = \frac{W_1}{W_1 + R}$$

haben wir als Übergangsfaktor bezeichnet. Am Ende der Leitung wird die Entladewelle reflektiert. Sie entlädt die Leitung fortschreitend um den Betrag

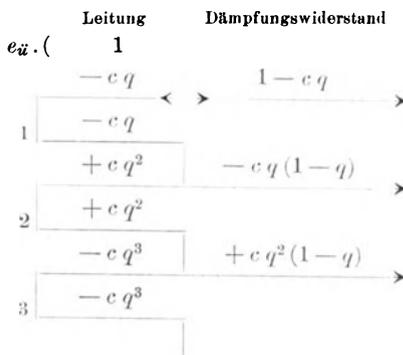
$$(e_{11} + e_{11}),$$

bis die reflektierte Welle auf den Übergangspunkt trifft.

Hiermit ist die erste Staffel des Entladungsvorganges beendet; die zweite Staffel beginnt mit der Reflexion der zurückgeworfenen Welle e_{11} , welche mit dem Betrage $- q \cdot e_{11}$ als erste Hälfte der zweiten Staffel die Entladung fortsetzt; q ist hierbei der Reflexionsfaktor:

$$q = \frac{W_1 - R}{W_1 + R}.$$

Am besten übersieht man die Entladung an der Hand des Reflexionsschemas, das in diesem Falle mit dem Schema I, Abschnitt II, (S. 9) identisch ist. Wie dort, setzen wir $q' = c q$



In der Mitte des Schemas deuten die Pfeile die Richtung der abziehenden Wellen an. Während die in den Ohmschen Widerstand einziehenden Ladungen verschwinden, werden die Entladewellen am Ende der Leitung zurückgeworfen; der senkrechte Strich kennzeichnet diese vollkommene Reflexion. Am Übergangspunkte Leitung — Widerstand findet Staffel für Staffel die im Schema gleichfalls durch einen senkrechten Strich kenntlich gemachte unvollkommene Reflexion statt.

Ist $R < W$,

so ist q und c positiv, und der Entladungsvorgang verläuft als Schwingung.

Ist dagegen $R > W$,

so wird q und c negativ, und die Entladung geht absatzweise vor sich.

Mit dem letzten Fall müssen wir uns eingehender beschäftigen, da die meisten Dämpfungswiderstände der Praxis viel größer sind, als die Wellenwiderstände der geschützten Leitungen.

Fassen wir z. B. die drei ersten Staffeln unseres Schemas ins Auge, so erkennen wir,

daß nach deren Ablauf die Spannung der zu entladenden Leitung auf

$$e_3 = e_{\ddot{u}}(1 - 2c q + 2c q^2 - 2c q^3)$$

gesunken ist. Wir haben nichts weiter zu tun, als die Beträge der Entladewellen Staffel für Staffel zu addieren und von der ursprünglichen Spannung abzuziehen. Nach n Staffeln wäre die Spannung

$$e_n = e_{\ddot{u}}(-q)^n \dots \dots (5)$$

Wollen wir berechnen, wieviel Staffeln erforderlich sind, um die Überspannung auf einen bestimmten, nicht mehr gefährlichen Wert e_n zu bringen, so lösen wir Gl. (5) nach n auf und erhalten:

$$n = \frac{\lg e_n - \lg e_{\ddot{u}}}{\lg(-q)} \dots \dots (6)$$

Aus der Länge und den Eigenschaften der Leitung läßt sich die Zeit bestimmen, in welcher die Spannung um diese n Stufen absinkt.

Da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen in einem Mittel mit der Dielektrizitätskonstante ϵ und der Permeabilität μ

$$v' = \frac{v}{\sqrt{\mu \epsilon}}$$

ist (v ist die Lichtgeschwindigkeit), so braucht die Entladewelle die Zeit

$$\frac{l' \sqrt{\mu \epsilon}}{v} \text{ Sek.}$$

um bis an das Ende der Leitung zu gelangen. Die Zeitdauer eines Hin- und Rücklaufs, d. h. einer Staffel, ist dementsprechend:

$$\frac{2l' \sqrt{\mu \epsilon}}{v}$$

Es vergehen also

$$T_n = \frac{2n l' \sqrt{\mu \epsilon}}{v} \text{ Sek.} \dots (7)$$

bevor die Überspannung unterhalb des kritischen Wertes e_n gesunken ist.

Die „reduzierte“ Länge

$$l = l' \sqrt{\mu \epsilon}$$

ist in Freileitungen gleich der geometrischen Länge. Bei Kabeln kann für $l \sim 1,8 - 2,0 l'$ gesetzt werden.

Beispiel.

Ein 10 KV-Kabel von 5 km Länge wird von einer Überspannung von 60 KV betroffen. Da die Anlage nur mit dreifacher Sicherheit (30 KV) ausgeführt ist, müßte die Überspannung in der kürzesten Zeit auf 30 KV herabgesetzt werden. Es fragt sich nun, wieviel Zeit hierfür erforderlich ist, wenn sich das Kabel mit einem Wellenwiderstand von $W_1=60$ über einen Dämpfungswiderstand von 1000 + 1000 Ohm — 1000 Ohm in jedem Leiter — entladen soll.

Wir rechnen mit

$$q = \frac{60 - 2000}{60 + 2000} = -0,942,$$

und erhalten

$$n = \frac{\lg 30 - \lg 60}{\lg 0,942} = 11,6.$$

Demnach sinkt die Spannung erst in der 12. Staffel unter den Wert von 30 KV. Die Spannung des ganzen Kabels ist erst am Schluß der 12. Staffel unterhalb 30 KV gesunken.

Nach Gl. (7) dauert die Entladung bis auf 30 KV:

$$T_n = \frac{2 \times 12 \times 5 \times 1,8}{300\,000} = 720 \times 10^{-6} \text{ Sek.}$$

Weisen die angeschlossenen Apparate bei 30 KV gefährdete Stellen in Luft oder unter Öl auf, so werden diese mit Bestimmtheit durchschlagen werden, da die Gefahr in der Luft rund die 1000-fache, in Öl rund die 100-fache der zum Durchschlag erforderlichen Zeit besteht.

Nach diesen Zahlen, welche in der Praxis übliche Anordnungen richtig wiedergeben, wird man die Behauptung verstehen, daß Funkenableiter mit Dämpfungswiderständen dieser Höhe nicht den geringsten Schutz bieten können.

Es muß ohne alle Umschweife als Unsinn bezeichnet werden, wenn Kabelnetze mit Ableitern geschützt werden sollen, die Dämpfungswiderstände von 100 000 Ohm und mehr aufweisen. Allerdings sind die Betriebsleiter derartig geschützter Werke sehr zufrieden mit diesen hochohmigen Ableitern, da sie zu keinen Anständen Anlaß geben. Im besten Falle kann man sie aber nur als „Überspannungsanzeiger“ bezeichnen; ihr Schutzwert ist gleich null. Wenn ein Turbinendruckrohr von etwa $\frac{1}{2}$ m lichter Weite gegen Wasserschläge durch ein Ventil mit 1 qcm Durchtrittsquerschnitt geschützt werden soll, so sieht selbst der technisch Un-

gebildete dessen Zwecklosigkeit ein. Genau den gleichen Schutzwert besitzen hochohmige Ableiter; wir sind jedoch von der Erkenntnis der physikalischen Vorgänge in unseren Leitungen noch so weit entfernt, daß wir uns stundenlang über eine derartige Frage streiten können.

Ebensowenig können Wasserstrahlerder mit Widerständen, die bei höheren Spannungen in die Hunderttausende von Ohm hinaufgehen, irgendeine als Welle erscheinende Spannung bewältigen. Ihre Fähigkeit, langsam entstehende statische Ladungen abzuleiten, wird hierdurch nicht berührt.

Kondensator am Ende einer Leitung.

In dem mehrfach erwähnten Aufsatz ist bereits die Lösung des uns am meisten interessierenden Problems der Zurückwerfung einer Wanderwelle an einen Kondensator gegeben worden.

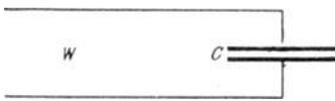


Abb. 31. Schutzkondensator am Ende einer Leitung.

Die schroffe Wellenstirn der auftretenden Welle wird in eine sanft ansteigende Exponentialkurve umgewandelt. Im ersten Augenblicke wirkt eine Parallelkapazität wie ein Kurzschluß

$$\left(\text{Strom z. Zt. } t = 0 \ i_2 = \frac{2 E_m}{W} \right),$$

um allmählich die Eigenschaften eines unendlich großen Widerstandes anzunehmen, wenn die auftreffende Welle genügende Länge hat.

Bricht die Welle vorzeitig ab, so ist dieser Bedingung in der Art Rechnung zu tragen, wie es Abb. 32 zeichnerisch andeutet. Das Rechteck wird dargestellt durch die Übereinanderlagerung von zwei unendlich langen Wellen, die in einem Abstände folgen, welcher gleich der Länge der gegebenen Rechteckwelle ist.

Wir bezeichnen mit T die Dauer („Länge“)

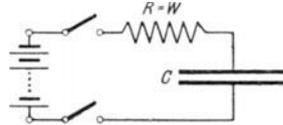


Abb. 32. Ersatzschema zu Abb. 31.

Für die tatsächliche Anordnung Abb. 31, bei welcher am Ende einer Leitung mit dem Wellenwiderstand W eine Kapazität C hängt, führen wir das Ersatzschema Abb. 32 ein und schreiben:

$$i_{12} W + \frac{1}{C} \int i_{12} dt = 2 E_m,$$

hieraus:

$$i_{12} = \frac{2 E_m}{W} e^{-\alpha t},$$

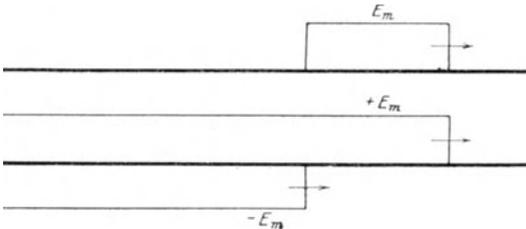


Abb. 33. Ersatz einer rechteckigen Wanderwelle durch zwei unendlich lange Wellen.

Spannung am Kondensator:

$$e_{12} = 2 E_m (1 - e^{-\alpha t}).$$

$$\alpha = \frac{1}{WC}.$$

der Rechteckwelle in Sekunden. Nach dieser Zeit T lagert sich über die unverändert bestehend bleibenden Glieder der Strom:

$$i_{12}'' = - \frac{2 E_m}{W} e^{-\alpha(t-T)},$$

und die Spannung:

$$e_{12}'' = - 2 E_m (1 - e^{-\alpha(t-T)}).$$

Die zurückgeworfene Welle hat in ihrem ersten Abschnitte die Form:

$$e_{11} = E_m (1 - 2 e^{-\alpha t}),$$

um nach der Zeit T nach dem Gesetze:

$$e_{11}' = 2 E_m (e^{-\alpha(t-T)} - e^{-\alpha t})$$

zu verlaufen.

Setzen wir in die Gleichung $t = T$ ein, so erhalten wir den Höchstwert der Spannung in der zurückgeworfenen Welle; der Höchstwert der Spannung am Kondensator ist mit

$$E_{12m} = 2 E_m (1 - e^{-\alpha T}) \dots (8)$$

gerade so hoch.

In Abb. 25 (S. 20) ist der Verlauf der Spannung am Kondensator C dargestellt. Während

bei der Kurve I die Kapazität nicht ausreichte, um auch die Höhe der auftreffenden Welle genügend herabzusetzen, erfüllt ein Kondensator mit fünffacher Kapazität, wie Kurve II zeigt, bei der angenommenen Länge der Rechteckwelle sowohl die Aufgabe der Umbildung

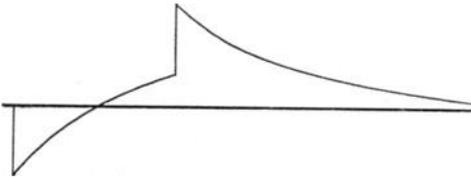


Abb. 34. Form der an einer Kapazität zurückgeworfenen Welle.

der Wellenstirn, wie auch die Aufgabe der Herabsetzung der Spannung. Alle parallel zu der Kapazität liegenden Teile einer Schaltanlage werden in diesem Falle nach jeder Richtung hin geschützt.

Die zurückgeworfene Welle hat die in Abb. 34 gezeichnete eigenartige Form. Selbstredend zeigt sich auch in der Abb. 35,

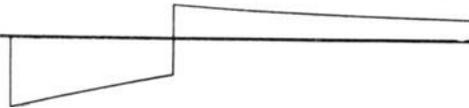


Abb. 35. Form der zurückgeworfenen Welle bei fünffacher Kapazität des Kondensators.

welche für die fünffache Schutzkapazität wie Abb. 34 berechnet ist, der gleiche günstige Einfluß wie in Abb. 25 (S. 20). Die Abbildungen zeigen auch, wie die ursprüngliche Welle in die Länge gezogen wird.

Beispiel.

Eine Wanderwelle von 5 km Länge, rechteckiger Form und 60 KV Spannung, trifft am Ende einer Leitung mit dem Wellenwiderstand $W = 320$ Ohm auf eine Kapazität von $0,1 \cdot 10^{-6}$ Farad.

Nach Gl. (8) ist die maximale Spannung am Kondensator

$$E_{12m} = 120(1 - e^{-\alpha T}) = 48 \text{ KV}$$

mit $T = \frac{5}{300\,000} = \frac{1}{60\,000}$ Sek

und $\alpha T = 0,521$.

Die Wanderwelle von 60 KV verdankt ihre Entstehung einer Ladung, die nach einem

Blitzschlage plötzlich frei geworden ist. Am Entstehungspunkt kann mit einer Spannung von etwa 120 KV gerechnet werden. Die betrachtete Freileitung müßte demnach unter diesen Voraussetzungen mit Isolatoren von etwa 120 KV Überschlagsspannung gebaut worden sein. Diesem Werte entspricht eine Betriebsspannung von 40 bis 60 KV.

Da eine durch atmosphärische Störungen ausgelöste Wanderwelle alle Leiter eines Gestänges benutzt, falls kein Isolatorenüberschlag auftritt, ist mit dem Wellenwiderstand des Leitergebildes, Leiter des Gestänges einerseits — Erdboden andererseits zu rechnen. Den Wellenwiderstand einer Einphasenleitung¹⁾ ist z. B. unter diesen Verhältnissen:

$$W = 30 \ln \frac{2h\sqrt{4h^2 + d^2}}{dr} \quad (9)$$

Hierin ist:

- h der mittlere Abstand der Leiter vom Boden,
- d der gegenseitige Abstand der Leiter,
- r der Halbmesser eines Leiters.

Ist z. B. nach Gl. (9) $W = 320$ Ohm, so ist der Wellenwiderstand jeder der beiden Leiter für sich 640 Ohm. Im Beispiele ist angenommen worden, daß jeder Leiter über eine Schutzkapazität von $0,05 \cdot 10^{-6}$ Farad an Erde angeschlossen ist.

Kondensator in einem Knotenpunkt.

Ungleich günstiger für die Unschädlichmachung einer Wanderwelle liegen die Bedingungen, wenn von einem Werke Leitungen

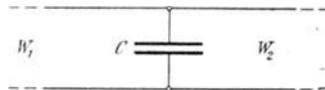


Abb. 36. Schutzkondensator am Übergangspunkt zweier Leitungen.

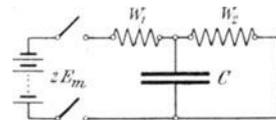


Abb. 37. Ersatzschema zu Abb. 36.

nach verschiedenen Richtungen ausgehen. Der einfachste Fall ist durch die Abb. 36 gegeben.

Am Ende der Leitung W_1 findet die Wanderwelle sowohl eine Schutzkapazität C wie auch die zweite Leitung W_2 vor.

¹⁾ „Hochspannungstechnik“, S. 157.

An der Hand des Ersatzschemas Abb. 37 ergeben sich die Gleichungen dieses Falles zu

$$i_{12} W_2 + (i_{12} + i_c) W_1 = 2 E_m,$$

$$i_{12} W_2 = \frac{1}{C} \int i_c dt,$$

$$\frac{d i_{12}}{dt} W_1 W_2 C + i_{12} (W_1 + W_2) = 2 E_m,$$

Wenn wir bedenken, daß z. Zt. $t = 0$, $i_{12} = 0$ und z. Zt. $t = \infty$

$$i_{12} = \frac{2 E_m}{W_1 + W_2}$$

sein muß — wenn wir bei der Ermittlung dieser Grenzbedingung von einer unendlich langen Wanderwelle ausgehen — erhalten wir den in die Leitung W_2 einziehenden Strom zu

$$i_{12} = \frac{2 E_m}{W_1 + W_2} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (11a)$$

mit

$$\alpha = \frac{W_1 + W_2}{W_1 W_2 C},$$

Die zugehörige Spannung

$$e_{12} = 2 E_m \frac{W_2}{W_1 + W_2} (1 - e^{-\alpha t}) \quad (11b)$$

gibt gleichzeitig den zeitlichen Verlauf der Spannung an der Schutzkapazität.

Der in den Kondensator fließende Strom ist durch:

$$i_c = \frac{2 E_m}{W_1} e^{-\alpha t}$$

gegeben.

Bricht die rechteckig gedachte Welle nach der Zeit T ab, so ergeben sich die neuen Strom- und Spannungsglieder durch die bekannte Übereinanderlagerung.

Von $t = T$ ab wird:

$$e_{12}' = 2 E_m \frac{W_2}{W_1 + W_2} (e^{-\alpha(t-T)} - e^{-\alpha t}).$$

Die in die Leitung W_1 zurückgeworfene Welle ist

$$e_{11} = 2 E_m \frac{W_2}{W_1 + W_2} (1 - e^{-\alpha t}) - E_m$$

bis z. Zt. T ; von dieser ab:

$$e_{11}' = 2 E_m \frac{W_2}{W_1 + W_2} (e^{-\alpha(t-T)} - e^{-\alpha t}).$$

Der größtmögliche Wert der Spannungserhöhung erscheint z. Zt. $t = T$. Er ist an der Kapazität mit

$$E_{12m} = 2 E_m \frac{W_2}{W_1 + W_2} (1 - e^{-\alpha T})$$

gerade so groß wie in der zurückgeworfenen Welle, in welcher diese — abgesehen von der Kopfspannung E_m — höchste Spannung sprunghaft mit der Sprunghöhe E_m erscheint.

Gehen vom Werke außer der Leitung W_1 noch die weiteren Leitungen $W_{21}, W_{22}, W_{23} \dots$ ab, so ist der Ersatzwellenwiderstand W_2 aus der Gleichung

$$\frac{1}{W_2} = \frac{1}{W_{21}} + \frac{1}{W_{22}} + \frac{1}{W_{23}} \dots \quad (12)$$

zu berechnen. Die gegebenen Gleichungen bleiben unverändert gültig.

Beispiel.

Unter im übrigen gleichen Verhältnissen wie im letzten Beispiel nehmen wir an, daß drei Leitungen mit je 320 Ohm Wellenwiderstand vom Werke ausgehen. Wir rechnen dementsprechend mit $W_1 = 320$, $W_2 = 160$ Ohm und erhalten als Höchstwert der Spannung am Kondensator

$$E_{12m} = 120 \frac{160}{480} (1 - e^{-\alpha T}) = 32 \text{ KV.}$$

Eigenschwingungen eines durch Kapazität geschützten Sammelschienensystems.

Dadurch, daß an Stelle der wirklichen Anordnung Abb. 38 die Ersatzschaltung

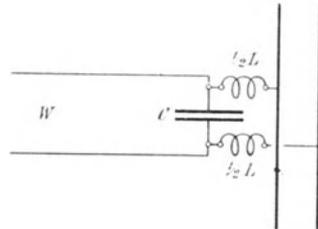


Abb. 38. Sammelschienensystem durch Kapazität geschützt.

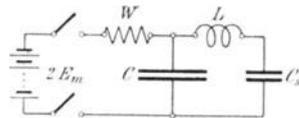


Abb. 39. Ersatzschema zu Abb. 38.

Abb. 39 gesetzt wird, erhalten wir der einfachen Rechnung zugängliche Verhältnisse.

Wir dürfen unter allen Umständen annehmen, daß die Sammelschienenskapazität C_s so klein ist im Vergleich zu der Schutz-

kapazität C , daß der bekannte Anstieg der Spannung

$$e_c = 2 E_m (1 - e^{-\alpha t})$$

mit
$$\alpha = \frac{1}{WC}$$

an der Schutzkapazität nur unmerklich von dem Ladevorgang der Sammelschienen beeinflusst wird. e_c kann deshalb wie eine EMK behandelt werden, die dem System Drosselspulen mit Induktivität L — Sammelschienen mit Kapazität C_s aufgezwungen wird.

Von einer Dämpfung in L und C_s sehen wir ab; dann wird:

$$L \frac{d i_s}{d t} + \frac{1}{C_s} \int i_s d t = e_c = 2 E_m (1 - e^{-\alpha t}),$$

und hieraus:

mit
$$i_s = A \sin m t + B \cos m t + K e^{-\alpha t}$$

$$m = \frac{1}{\sqrt{L C_s}}.$$

Wenn wir bedenken, daß:

1. i_s und
2. $\frac{d i_s}{d t}$ z. Zt. $t = 0$ sind, und
3. e_c , die Spannung an den Sammelschienen, dem Grenzwerte $2 E_m$ zustrebt,

so erhalten wir:

$$e_s = 2 E_m \left(1 - \frac{1}{m^2 + \alpha^2} \times (\alpha^2 \cos m t + \alpha m \sin m t + m^2 e^{-\alpha t}) \right) \quad (13)$$

Am besten lassen sich die ungemein schwachen Eigenschwingungen an der Hand eines Beispielles übersehen.

Die Schutzkapazität am Ende einer Leitung mit $W = 500$ sei $C = 0,05 \cdot 10^{-6}$ Farad.

Die Induktivität der vor den Sammelschienen liegenden Drosselspulen beläuft sich auf $L = 1 \cdot 10^{-3}$ Henry, die Kapazität der Sammelschienen $C_s = 5 \cdot 10^{-10}$ Farad (1 km Freileitung hat $5 \cdot 10^{-9}$ Farad Kapazität!).

Dann wird:

$$\alpha = \frac{1}{WC} = 4 \cdot 10^4$$

und
$$m = \frac{1}{\sqrt{L C_s}} = 1,4 \cdot 10^6.$$

Gegenüber dem Kosinusglied mit dem Scheitelwert

$$2 E_m \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}$$

und dem Sinusglied mit dem Scheitelwert

$$2 E_m \cdot 2,8 \cdot 10^{-2}$$

steht das Exponentialglied

$$2 E_m \cdot 0,999.$$

Selbst unter viel ungünstigeren Bedingungen kommt praktisch das selbständige Ausschwingen der Sammelschienen nicht in Betracht.

Reihenschaltung von Schutzkapazität und Schutzdrosselspule.

Die zweite, insbesondere für Transformatoren und Motoren vorgeschlagene Art des Überspannungsschutzes mit Schutzdrosselspulen, die vor den Kondensatoren sitzen, welche unmittelbar an die Sammelschienen angeschlossen sind, scheint auf den ersten Blick im Widerspruch zu stehen mit den Grundsätzen, die für die Vermeidung von Wanderwellen-Resonanzüberspannungen gelten; denn die Hintereinanderschaltung von Induktivität und Kapazität stellt ein schwingungsfähiges System vor.

Wir nutzen jedoch die Eigenschaft des Wellenwiderstandes, wie ein Dämpfungswiderstand zu wirken, aus, und bemessen die Größen des Schwingungskreises in der Weise, daß ein Schwingen entweder unmöglich gemacht wird, oder daß die Schwingung so stark gedämpft wird, daß sie unschädlich bleibt.

Das Problem, das uns diese Schaltung stellt, ist bereits in anderem Zusammenhange gelöst worden¹⁾.

An Stelle der tatsächlichen Schaltung Abb. 40 setzen wir die Ersatzschaltung Abb. 41.

Die Gleichung dieses Schwingungskreises

$$L \frac{d i_c}{d t} + \frac{1}{C} \int i_c d t + W i_c = 2 E_m$$

ist die bekannte Gleichung des Thomsonschen Kreises.

Verläuft der Vorgang periodisch, so lautet die Lösung der Differentialgleichung

$$i_c = e^{-\alpha t} (A \sin m t + B \cos m t).$$

¹⁾ „Archiv f. E.“, 1912, Heft 6, S. 246.

Die Konstanten müssen folgende physikalische Bedingungen erfüllen:

1. z. Zt. $t = 0$ ist $i_c = 0$;
2. z. Zt. $t = 0$ ist $L \frac{d i_c}{d t} = 2 E_m$;
3. z. Zt. $t = \infty$ ist $e_c = 2 E_m$.

Dementsprechend wird:

$$i_c = \frac{2 E_m}{m L} e^{-\alpha t} \sin m t \dots (14a)$$

$$e_c = 2 E_m \left(1 - e^{-\alpha t} \left(\cos m t + \frac{\alpha}{m} \sin m t \right) \right) \quad (14b)$$

$$\alpha = \frac{W}{2L},$$

$$m = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{W^2}{4L^2}}.$$

Am Anschlußpunkte der Schutzanordnung.
d. h. am Übergangspunkte Leitung Schutz-

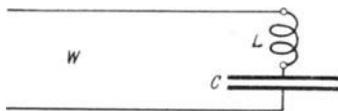


Abb. 40. Reihenschaltung von Drosselspule und Kondensator am Ende einer Leitung.

drosselspule verläuft die Spannung nach dem Gesetz

$$e_{12} = 2 E_m \left(1 - 2 e^{-\alpha t} \frac{\alpha}{m} \sin m t \right). \quad (15)$$

Ist die Länge der auftreffenden Wanderwelle durch ihre Zeitdauer T gegeben, so ist über den unverändert bestehen bleibenden Schwingungsvorgang ein zweiter z. Zt. $t = T$ beginnender zu lagern, der dem ersten bis auf das entgegengesetzte Vorzeichen und bis auf den Gangunterschied gleich ist.

Am Schutzkondensator ist nach dieser Überlegung die Spannung gegeben durch Gl. (14b) bis z. Zt. T , und von dieser ab durch

$$e_c' = 2 E_m \left(e^{-\alpha(t-T)} \left(\cos m(t-T) + \frac{\alpha}{m} \sin m(t-T) \right) - e^{-\alpha t} \left(\cos m t + \frac{\alpha}{m} \sin m t \right) \right). \quad (16)$$

Die nach W_1 zurückgeworfene Welle, gegeben durch

$$e_{11} = e_{12} - e_1$$

hat in ihrem ersten Abschnitt den Verlauf

$$e_{11} = E_m \left(1 - 4 e^{-\alpha t} \frac{\alpha}{m} \sin m t \right). \quad (17)$$

in ihrem zweiten Abschnitt

$$e_{11}' = 4 E_m \left(e^{-\alpha(t-T)} \frac{\alpha}{m} \sin m(t-T) - e^{-\alpha t} \frac{\alpha}{m} \sin m t \right) \dots (18)$$

Verläuft der Ladevorgang aperiodisch, ist

$$\sqrt{\frac{W^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$

reell, so ist die Lösung durch

$$i_c = \frac{2 E_m}{m L} e^{-\alpha t} \sin \text{hyp } m t \dots (19a)$$

gegeben. Hieraus bestimmt sich die Spannung am Kondensator zu

$$e_c = 2 E_m \left(1 - e^{-\alpha t} \left(\cos \text{hyp } m t + \frac{\alpha}{m} \sin \text{hyp } m t \right) \right) \quad (19b)$$

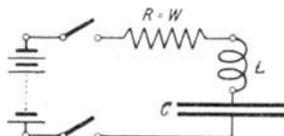


Abb. 41. Ersatzschema zu Abb. 40.

mit

$$\alpha = \frac{W}{2L}$$

und

$$m = \sqrt{\frac{W^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}.$$

Verschwimmt der Wurzelausdruck, so erhält man die Grenze zwischen periodischer

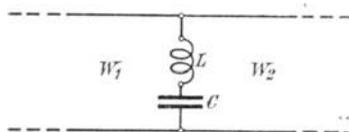


Abb. 42. Reihenschaltung von Drosselspule und Kondensator im Übergangspunkte zweier Leitungen.

und aperiodischer Aufladung. Strom und Spannung verlaufen nach den Gleichungen

$$i_c = \frac{2 E_m}{L} t e^{-\alpha t} \dots (20a)$$

$$e_c = 2 E_m (1 - e^{-\alpha t} (1 + \alpha t)) \dots (20b)$$

Reihenschaltung von Schutzdrossel-
spule und Kapazität¹⁾ in einem Knoten-
punkte.

Wir können ohne weiteres für Abb. 42
die Ersatzschaltung Abb. 43 setzen und für
diese die Gleichungen niederschreiben.

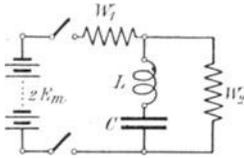


Abb. 43. Ersatzschema zu Abb. 42.

Statt der einen Leitung W_2 können mehrere
mit den Wellenwiderständen $W_{21}, W_{22}, W_{23} \dots$
vorhanden sein. In diesem Fall ist

$$\frac{1}{W_2} = \frac{1}{W_{21}} + \frac{1}{W_{22}} + \frac{1}{W_{23}} \dots$$

Aus

$$L \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} \int i_c dt + (i_c + i_{12}) W_1 = 2 E_m$$

und $L \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} \int i_c dt = i_{12} W_2$

ergibt sich die Gleichung

$$L \frac{(W_1 + W_2)}{W_2} \frac{d^2 i_c}{dt^2} + W_1 \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} \frac{W_2 + W_1}{W_2} i_c = 0.$$

Wir setzen

$$\frac{W_1 W_2}{W_1 + W_2} = W$$

und erhalten als Lösung unserer
Gleichung Ausdrücke, die den
im vorigen Abschnitt gefundenen gleich sind.
Wie dort, setzen wir

$$\alpha = \frac{W}{2L},$$

und im Fall des periodischen Ausgleichs

$$m = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{W^2}{4L^2}}.$$

¹⁾ Die Kapazität C ist unmittelbar an die geschützten
Sammelschienen angeschlossen.

Aus folgenden Überlegungen ergeben sich
die Integrationskonstanten:

1. z. Zt. $t = 0$ ist $i_c = 0$;
2. z. Zt. $t = 0$ ist die Spannung im Knoten-
punkt

$$e_{12} = 2 E_m \frac{W_2}{W_1 + W_2}$$

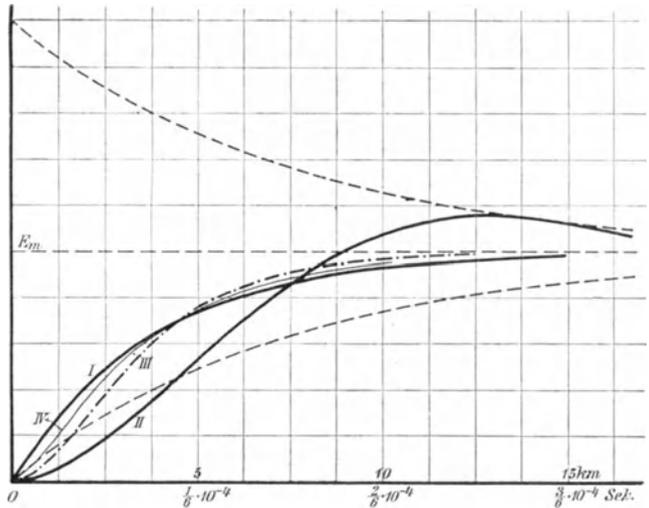
(bei einer Rechteckwelle mit unver-
änderlicher Amplitude E_m);

3. z. Zt. $t = \infty$ (eingeschwungener Zu-
stand) hat die Spannung im Knoten-
punkt den gleichen Wert.

Wir erhalten nach Berücksichtigung dieser
Tatsachen den Strom im Kondensator

$$i_c = \frac{2 E_m}{m L} \cdot \frac{W_2}{W_1 + W_2} e^{-\alpha t} \sin m t \quad (21a)$$

die Spannung am Kondensator



$W = 620 \text{ Ohm}, C = 0,04 \cdot 10^{-6} \text{ Farad.}$

I $L = 0$, II $L = 8,84 \cdot 10^{-8}$, III $L = 0,961 \cdot 10^{-8} \text{ Henry.}$

Abb. 44. Anstieg der Spannung am Kondensator in der Schaltung Abb 42
bei verschiedenen Werten der Schutzinduktivität.

$$e_c = 2 E_m \frac{W_2}{W_1 + W_2} \left(1 - e^{-\alpha t} \left(\cos m t + \frac{\alpha}{m} \sin m t \right) \right) \quad (22a)$$

die Spannung der in die Leitung 2 einziehen-
den Welle

$$e_{12} = 2 E_m \frac{W_2}{W_1 + W_2} \left(1 - 2 e^{-\alpha t} \frac{\alpha}{m} \sin m t \right) \quad (23)$$

die Spannung der zurückgeworfenen Welle

$$e_{11} = e_{12} - E_m \dots (24)$$

Da die Ausdrücke für den aperiodischen Verlauf der Ladung usw. bis auf den Faktor $\frac{W_2}{W_1 + W_2}$ mit dem im vorigen Abschnitt gefundenen gleichlautend sind, können wir uns deren Niederschrift ersparen.

Für den praktisch häufigsten Fall, daß $W_1 = W_2$ ist (ein geschützter Transformator hängt z. B. an einer Leitung) sind die Kurven Abb. 44 berechnet und in Abhängigkeit von der Zeit und der Länge der vorbeilaufenden Rechteckwelle dargestellt worden.

Der Wellenwiderstand der durchgehenden Leitung ist mit $W_1 = W_2 = 620$ Ohm, die Schutzkapazität mit

$$C = 0,04 \cdot 10^{-6} \text{ Farad}$$

sehr reichlich angenommen worden.

Die stark ausgezogene Kurve *I* gibt den Verlauf der Spannung ohne Schutzdrosselspule, die Kurve *II* die Spannung am Kondensator mit Schutzdrosselspule, deren Induktivität $L = 3,84 \cdot 10^{-3}$ Henry 4-mal so groß ist wie die Induktivität $L = 0,961 \cdot 10^{-3}$ Henry, welche die Grenze zwischen aperiodischer und periodischer Ladung (strichpunktierte Kurve *III*) gibt.

Kurve *IV* endlich gilt für aperiodische Ladung, wenn die Schutzinduktivität halb so groß ist wie die Grenzinduktivität.

Ersetzt man in Abb. 44 E_m durch $2 E_m$, so geben die gleichen Schaulinien den Anstieg der Spannung am Kondensator für den Fall der Abb. 40, d. h. für die Schutzanordnung mit der halben Schutzkapazität und den doppelten Induktivitäten am Ende einer Leitung mit dem Wellenwiderstand $W = 620$ Ohm.

Interessant ist die Tatsache, daß man die Schutzinduktivität in weiten Grenzen ändern kann, ohne daß der Anstieg der Spannung stark beeinflußt wird. Bei kurzen Wellen bietet die Verbindung Schutzdrosselspule-Kondensator unstreitig ganz bedeutende Vorteile gegenüber der drosselspulenfreien Anordnung. Mit zunehmender Wellenlänge verwischt sich jedoch dieser Unterschied. Wichtig ist auch der Hinweis, daß man ganz bedeutende Induktivitäten einbauen muß, um eine nennenswerte Besserung der induktivitätsfreien Schutzanordnung zu erzielen.

Die stark gedämpfte Eigenschwingung (Kurve *II*) ist ein gutes Beispiel dafür, daß auch der periodische Ladevorgang bei richtiger Wahl der Größen keine Gefahr in sich birgt.

Zusammenfassung.

Die Behandlung der Überspannungsfragen muß sich auf der von K. W. Wagner geschaffenen Grundlage aufbauen. Die größten Fortschritte in der Klärung dieser Fragen verdanken wir der Beschäftigung mit den „Wanderwellen“.

Lade- und Entladevorgang werden kurz berührt, und die große Bedeutung der durch Lade- und Entladeschwingungen hervorgerufenen Resonanzüberspannungen betont. Für die durch atmosphärische Störungen ausgelösten Wanderwellen wird eine eigenartige Form entwickelt, welche ihre bekannten schädigenden Wirkungen verständlich macht.

Ein untrennbares Glied des Überspannungsschutzes ist der richtige Entwurf des Netzes, der richtige Entwurf auch der kleinsten Schaltanlage. Im Netze entstehende Wellen sollen im Netze nach jeder Richtung hin freie Bahn vorfinden, die Überspannungen sollen sich im Netze austoben können.

Überspannungen, welche auf ein Werk oder Unterwerk treffen, sollen an diesen ohne Spannungserhöhung vorbeigeleitet oder in das Netz zurückgeworfen werden. Am erstrebenswertesten ist die Verbindung von Vorbeileitung und Zurückwerfung. Der beste Überspannungsvernichter ist das nach diesen Gesichtspunkten durchgebildete Netz. Jede beliebige in der Wellenbahn liegende Induktivität stellt eine Störung der geforderten Einheitlichkeit vor. Ihre Überbrückung durch Ohmsche Widerstände nimmt ihr die Eigenschaft, als hemmende Schranke zu wirken. Die aus der Forderung der widerstandslosen Vorbeileitung sich ergebende Überbrückung erstickt gleichzeitig jede Wanderwellen-Resonanzüberspannung im Keim.

Eine in dieser Art gebaute Anlage mit technisch richtiger Isolierung leidet in der Hauptsache nur unter der Form der Wanderwellen, nämlich unter der Schroffheit von Spannungssprüngen. Die Höhe der Überspannung ist in den allerseltensten Fällen die Störungsursache. Aus diesem Grunde sollen Schutzapparate in erster Linie zur Umformung der Spannungssprünge dienen. Die Begrenzung der Spannung kommt erst in zweiter Linie in Frage. Die Umformung von Spannungssprüngen kann in gleich vollkommener Weise sowohl durch Kondensatoren wie auch durch Drosselspulen erreicht werden. Bei den üblichen Spannungen sind Drosselspulen mit dem gleichen Schutzwerte wie Kondensatoren kostspieliger als Kondensatoren. Außerdem spricht gegen die Verwendung von Drosselspulen für sich allein die Möglichkeit der Entstehung von Resonanzüberspannungen. Die Verbindung von Kondensator und Drosselspule erfüllt die Forderung der Wellenumbildung in der vollkommensten Weise. Im letzten Abschnitte des Aufsatzes werden Unterlagen für die Berechnung der Schutzwirkung gegeben, und es wird die Zwecklosigkeit hochohmiger Ableiter dargelegt.