Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 13 (1922)
Heft: 10

Artikel: Ueber Sprungwellenbeanspruchung von Transformatoren
Autor: Courvoisier, G.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058313

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

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

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

Download PDF: 22.08.2025

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

verschiedener Beschaffenheit, spezifische Erdgewichte und Baugrundziffer verschiedener Bodenarten und in verschiedener Tiefe müssen durch *Versuche* abgeklärt werden, für welche ein ausführliches Programm vorliegt. Leider erfordert deren Durchführung erhebliche Geldopfer.

Als letzte Aufgabe ist ein Vorschlag für die *Formulierung der* in die *neuen Vorschriften* aufzunehmenden Bestimmungen über Tragwerksfundierungen zu erwähnen. Da die Vorschriften kurz und klar und auf sehr verschiedenartige Verhältnisse passend sein müssen, so wird es wohl nötig sein, darin nur allgemein und kurz die einzuhaltenden Bedingungen anzugeben, dagegen in den geplanten Erläuterungen zu den Vorschriften näher auf die zweckmässige Ausführung der Fundamente und deren Berechnung einzutreten.

Ueber Sprungwellenbeanspruchung von Transformatoren.

Von *G. Courvoisier,* dipl. Ing., *Baden.*

Der Verfasser erläutert einleitend, was man heute unter Sprungwellen versteht und wie man sich die Entstehung derselben denkt. Er geht darauf auf die Beanspruchung der Transformatorenwicklungen durch Sprungwellen über und behandelt die Wirkung von Schutzmitteln, wobei er sich auf Versuche der Firma Brown, Boveri & Cie., Baden stützt. Als wichtigstes Ergebnis der Untersuchungen redet er einer verstärkten Isolation der ganzen Transformatorenwicklung (nicht nur der Eingangswindungen) durch Anwendung von hochwertigem Isolationsmaterial das Wort und verlangt ausser den normalen Prüfungen der Transformatoren auch eine Prüfung mit künstlich erzeugten Sprungwellen. Den Schluss der Arbeit bilden allgemein gehaltene Betrachtungen über Wanderwellenvorgänge auf Leitungen.

L'auteur explique ce qu'il entend par ondes pertubatrices et comment elles sont produites. Se basant sur des expériences faites dans les ateliers Brown, Boveri, Baden il démontre l'effet de ces ondes sur les enroulements des transformateurs et explique l'action des moyens de protection. Il préconise surtout l'emploi d'isolants de meilleure qualité pour l'ensemble des bobines (pas seulement les bobines extrêmes) et recommande l'essai des transformateurs à l'aide de courants à haute fréquence. L'auteur termine avec quelques considérations sur la propagation des ondes à haute fréquence dans les lignes.

Einleitung:

Die elektro-magnetischen Ausgleichvorgänge und ihre Einwirkungen auf Wicklungen, besonders solche von Transformatoren, bilden schon seit einer Reihe von Jahren den Gegenstand eingehender Untersuchungen. Wie die verschiedenen bisher erschienenen Veröffentlichungen aber zeigen, stellen sich den Versuchen, theoretisch unter Berücksichtigung technischer Verhältnisse zu genauen Lösungen zu gelangen, grosse Schwierigkeiten entgegen. Der Versuch, durch direkte Messungen einige Klarheit über die Beanspruchungen von Transformatoren durch Sprungwellenvorgänge zu gewinnen, dürfte daher wohl einiges Interesse besitzen.

Welch hohe praktische Bedeutung solche Erscheinungen haben, geht daraus hervor, dass die Mehrzahl der Defekte, welche heute bei Transformatoren vorkommen, auf sie zurückgeführt werden müssen. Die verhältnismässig häufigen Lagen- und Spulenschlüsse können nur als Folge von Sprungwellenbeanspruchungen verstanden werden. Dies beweist, dass der Aufbau der Wicklungen und die Dimensionierung der Spulenisolation bei vielen Konstruktionen, welche bis heute auf den Markt gekommen sind, nicht so ausgeführt worden ist, dass die Transformatoren auch den Beanspruchungen durch Sprungwellen jederzeit widerstehen konnten. Es ist daher von Bedeutung, in Erfahrung zu bringen, welcher Art und wie hoch die Beanspruchungen sind, welche durch Ausgleichvorgänge hervorgerufen werden; denn nur so wird es möglich sein, bei Neukonstruktionen ihre Wirkungen richtig in Betracht zu ziehen.

Von der Firma Brown Boveri & Cie. sind nun Versuche an einem Grosstransformator durchgeführt worden, welche den Zweck hatten, durch Messungen über die gestellten Fragen Klarheit zu gewinnen. Die Nordostschweizerischen

Kraftwerke haben dazu eine Leitung von elf Kilometer Länge zur Verfügung gestellt; dafür sei ihnen hier noch besonderer Dank ausgesprochen.

Der vorliegende Aufsatz hat die Aufgabe, über die Ergebnisse dieser Versuche einige Mitteilungen zu machen und einige Schlussfolgerungen daraus zu ziehen.

I. Die Entstehung von Sprungwellen.[1])

Sprungwellen sind eine besondere Form von Wanderwellen. Solche gehen aus von Stellen, an denen sich im stationären Betriebe plötzlich die Strom- und Spannungsverhältnisse ändern. Als Ursache dieser Zustandsänderungen kommen vornehmlich Erdschlüsse, indirekte und direkte Blitzschläge, Schaltvorgänge usw. in Betracht. Unter den Wanderwellen müssen erfahrungsgemäss als gefährlich jene bezeichnet werden, welche bei Erdschlüssen insbesondere im Gefolge indirekter Blitzschläge entstehen; dies sind die eigentlichen Sprungwellen. Die Wanderwellen sind entweder Entladewellen oder Ladewellen; ihre Entstehungsart und ihre Eigenschaften sind kurz folgende:

a) Entladewellen.

Besitzt ein Leiter eine Spannung E gegen Erde, so wird dadurch auf ihm eine bestimmte Ladung gebunden. Kommt er an der Stelle A (siehe Fig. 1) plötzlich in leitende Verbindung mit der Erde, so fällt dort die Spannung gegen Erde auf Null; die Ladung der Stelle A wird frei und fliesst nach Erde ab. Das Verschwinden der Spannung an einer Stelle hat zur Folge, dass dieselbe unmittelbar darauf an den benachbarten Stellen und fortschreitend nach beiden Richtungen der Leitung hin auch auf Null absinkt und entsprechende Ladungen frei werden; diese fliessen über die Erdschlusstelle nach Erde ab, d. h. zwischen den beiden Stellen, wo die Spannung zusammenbricht, und der Erdschlusstelle fliesst jeweils ein Strom.

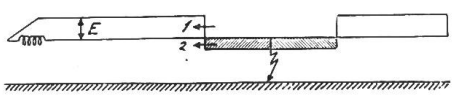

Fig. 1

Entstehung von Sprungwellen bei Erdschluss.
1 = Stromwelle
2 = Wanderwelle.

Das fortschreitende Verschwinden der Spannung gegen Erde auf der Leitung bezeichnet man als Entlade-Spannungswelle. Jener Teil derselben, in dem die Spannung vom Wert E auf Null absinkt, heisst Stirn der Entladewelle; dehnt sich diese nur über eine kurze Strecke aus, so nennt man sie steil[2]); die Welle selber wird dann Sprungwelle genannt.

Als Entlade-Stromwelle bezeichnet man die Ausbreitung des Stromzustandes auf der Leitung, welcher gleichzeitig mit der Entladespannungswelle über diese wandert.

Die Wanderwellen pflanzen sich bei Freileitungen mit Lichtgeschwindigkeit fort, bei Kabeln etwas langsamer.

Das Verhältnis zwischen der Höhe der Spannungswelle (Spannungssprung um den Wert E) und der Höhe der Stromwelle (Stromstärke hinter der Wellenstirn) heisst Wellenwiderstand der Leitung; dieser ist angenähert gegeben durch die Beziehung $\sqrt{\frac{L}{C}}$ worin L die Induktivität der Leitung und C ihre Kapazität, beides pro Längeneinheit und gegen Erde bedeuten, soweit diese als konstant betrachtet werden können, ist der Wellenwiderstand eine Leitungskonstante.

Für die Beanspruchung von Wicklungen durch Wanderwellen ist auch der Reflexionsvorgang von Bedeutung. Erreicht z. B. eine Entladewelle ein offenes Leitungsende, so ist damit das betreffende Leitungsstück spannungsfrei; auf seiner ganzen Länge fliesst in diesem Augenblick ein Strom. Sowie nun die letzten

[1]) Im „Anhang" wird eine genauere Behandlung der Beziehungen, welche hier in Betracht fallen, gegeben.

[2]) Da die Wellenstirn wandert, kann man ebensogut sagen: ist die Zeit, in der an einer bestimmten Stelle der Leitung die Spannung vom Wert E auf Null absinkt sehr kurz, so hat die Welle eine steile Stirn.

Ladungen gegen die Erdschlusstelle abfliessen, verschwindet auf der Leitung fortschreitend von ihrem Ende aus der Stromzustand; da aber jedes Stück der Leitung eine bestimmte Induktivität besitzt, entsteht nach dem Induktionsgesetz im Masse, wie der Strom verschwindet, auf ihr wieder eine Spannung gegen Erde. Die Aenderung des Stromes verläuft jetzt in umgekehrter Richtung als bei seiner Entstehung (beim Einziehen der Stromwelle), daher muss die hier entstehende Spannung das entgegengesetzte Vorzeichen von jener haben, welche beim Einziehen der Entladewelle verschwunden ist. Zwischen (verschwindender) Stromwelle und (entstehender) Spannungswelle muss wieder die Beziehung des Wellenwiderstandes der Leitung gelten, daher ergibt sich als Höhe der letztern der Wert E. Gelangt diese rückläufige Spannungswelle gegen die Erdschlusstelle, so hat der ganze betrachtete Leitungszweig die Spannung E gegen Erde; an der Erdschlusstelle selber fällt sie auf Null herunter und eine neue Entladewelle wandert in die Leitung hinein; auch sie wird am Leitungsende reflektiert usw. Die Welle pendelt auf der Leitung hin und her, dabei wird ihr durch ohmschen Widerstand und Ableitung in den Isolatoren, im Anfang auch durch elektromagnetische Strahlung und unter bestimmten Voraussetzungen durch Koronaerscheinungen Energie entzogen; infolge dieser Dämpfung verschwindet die ganze Erscheinung nach einiger Zeit und im Endzustand ist die Leitung spannungsfrei.

Aehnlich sind die Vorgänge, wenn die Entladewelle am Ende der Leitung auf ein Gebilde mit höherem Wellenwiderstand als diese selbst, z. B. eine Drosselspule trifft. Die Höhe der Spannungswelle ist gegeben und gleich E, die Stromwelle muss aber entsprechend der Zunahme des Wellenwiderstandes kleiner werden als auf der Leitung. Infolgedessen muss auch die Stromstärke auf der Leitung von ihrem Ende aus fortschreitend auf den Wert der zweiten Stromwelle absinken. Die gleichen Gründe, welche bei Reflexion am offenen Leitungsende zur Entstehung einer Spannung E auf der Leitung geführt haben, bewirken hier, dass eine negative Spannungswelle, deren Wert aber kleiner als E ist, über die Leitung zurückwandert. Erreicht diese rückläufige Welle die Erdschlusstelle, so spielen sich dieselben Vorgänge ab, wie sie im vorhergehenden Abschnitt behandelt wurden. Es stellt sich ein Pendeln der Welle ein, welches wegen der nur teilweisen Reflexion am Leitungsende, wie auch wegen des Einflusses von ohmschem Widerstand und Ableitung, gedämpft verläuft.

Von Interesse ist der Spannungsverlauf an der Reflexionsstelle selber, z. B. an der Klemme eines dort angeschlossenen Transformators. Kommt eine Entladewelle an, so fällt die Spannung gegen Erde vom Werte $+E$ auf Null und schwingt bis zu einem Wert $-E_1$, dessen absoluter Wert kleiner als E ist, entsprechend der nur teilweisen Reflexion. Diese Spannung bleibt an der Reflexionsstelle bestehen, währenddem die reflektierte Welle zur Erdschlusstelle läuft und die darauffolgende Entladewelle den gleichen Weg in entgegengesetzter Richtung zurücklegt. Erreicht letztere die Reflexionsstelle, so schwingt dort die Spannung von $-E_1$ auf $+E_2$; dabei ist E_2 im gleichen Verhältnis kleiner als E_1, wie E_1 kleiner ist als E. In Fig. 2 sind die geschilderten Vorgänge dargestellt.

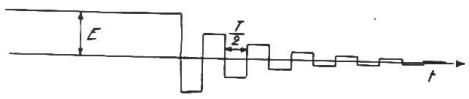

Fig. 2

Theoretischer Verlauf der Spannung gegen Erde an der Klemme eines Transformators bei Erdschluss auf der betreffenden Phase.

Ist $\frac{T}{2}$ die Zeit zwischen zwei Spannungswechseln an der Reflexionsstelle, v die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen auf der Leitung (Lichtgeschwindigkeit) und l die einfache Weglänge, so lässt sich aus obiger Beschreibung ohne weiteres die Beziehung verstehen:

$$\frac{T}{2} = \frac{2\,l}{v} \text{ Sekunden}$$

die Frequenz des Spannungsverlaufs an der Reflexionsstelle ist dann:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v}{4l} = \frac{75\,000}{l} \text{ Perioden/Sekunde,}$$

wobei T in Sekunden und l in km einzusetzen sind.

Ist z. B. eine Erdschlusstelle 300 m von einer Transformatorklemme entfernt, so ist die Frequenz des Spannungsverlaufs an der Klemme:

$$f = \frac{75\,000}{0{,}3} = 250\,000 \text{ Per./sek.}$$

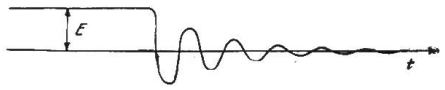

Fig. 3

Verlauf der Spannung gegen Erde an der Klemme eines Transformators bei Erdschluss auf der betreffenden Phase.

Im Gegensatz zu den Verhältnissen bei andern Entstehungsarten von Wanderwellen ist die Stirn der Wellen bei Erdschlüssen meist steil; es handelt sich hier um eigentliche Sprungwellen. Trotzdem hat Fig. 2 nur theoretische Gültigkeit, da sie eine senkrechte Wellenstirn voraussetzt. Die Dämpfung der Leitung bewirkt, dass sich der ganze Vorgang der Gestalt einer gedämpften harmonischen Schwingung nähert, wie es Fig. 3 zeigt.

b) Ladewellen.

Das Aufziehen einer Gewitterwolke über einer Leitung bindet auf dieser, soweit sie im Bereiche des Wolkenfeldes verläuft, nach den Gesetzen der Elektrostatik elektrische Ladungen. Erfolgt ein Blitzschlag in der Nähe der Leitung, so verschwindet dort das Wolkenfeld; die ganze Ladung der Leitung wird plötzlich frei und setzt sich nach beiden Seiten in Bewegung, d. h. nach jeder Richtung der Leitung läuft eine Stromwelle, deren Länge gleich der Länge der ursprünglichen Ladung ist. Mit der Stromwelle muss nach dem Induktionsgesetz eine Spannungswelle entstehen und dabei wieder das Verhältnis von Spannungs- zu Stromwelle gleich dem Wellenwiderstand sein. Wie die Entladewellen werden auch diese Ladewellen an den Leitungsenden reflektiert. Da dort die Ladungen am Weiterfliessen ganz oder teilweise gehindert werden, bildet sich an diesen Stellen eine Stauung und daraus eine rückläufige Bewegung der Stromwelle; proportional mit ihr steigt die Spannungswelle an und läuft zurück. Daraus folgt ein Pendeln der Ladewelle auf der ganzen Leitung, welches durch die Leitungsdämpfung nach einiger Zeit zur Ruhe gebracht wird.

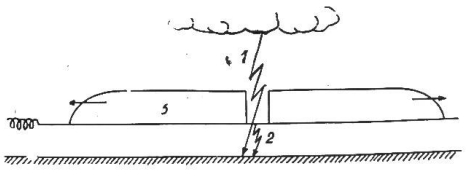

Fig. 4

Entstehung von Sprungwellen bei einem Blitzschlag
1 = Blitz,
2 = Ueberschlag,
3 = Spannungswelle.

Gefährlich werden diese Vorgänge dadurch, dass beim plötzlichen Entstehen der oft sehr hohen Spannung auf der Leitung unter der Wolke ein Isolator gegen Erde überschlägt und daher der *Lade*welle mit ihrer flachen und deshalb nicht sehr gefährlichen Stirn eine *Ent*ladewelle mit steiler und hoher Stirn folgt (siehe Fig. 4); solche Sprungwellen verursachen die stärksten Beanspruchungen, denen die innere Isolation von Wicklungen im Betriebe ausgesetzt wird.

Die Höhe der Stirn von Sprungwellen (Entladewellen) ist gleich der Spannung, welche im Augenblick des Erdschlusses an der Erdschlusstelle herrschte. Bei Erdschlüssen, welche durch Ursachen wie Isolationsdefekte, (Zerspringen durch Temperatureinflüsse, Steinwurf, geworfene Drähte, Vögel usw.) entstehen, kann sie den Maximalwert der Phasenspannung oder bei starker Unsymmetrie des Betriebes (z. B. schon ein fester Erdschluss im Netz vorhanden) höchstens den der verketteten Betriebsspannung des Netzes erreichen. Ist dagegen der Erdschluss Folge eines indirekten Blitzschlages, so entsteht er dadurch, dass ein Isolator im Netz überschlägt; die Sprungwellenhöhe hat daher die Grössenordnung der Ueberschlagspannung der

eingebauten Isolatoren; sie schwankt zwischen dem drei- und mehrfachen Wert der Nennspannung bei niedriger Hochspannung (zirka 5 kV) und dem doppelten Wert in Höchstspannungsanlagen.

II. Die Beanspruchung von Transformatorenwicklungen durch Sprungwellen.

Will man sich eine Vorstellung davon machen, in welcher Weise Sprungwellen auf Spulen z. B. von Transformatoren einwirken, so muss man sich deren Aufbau vergegenwärtigen. Man beachte z. B. zwei gegenüberliegende Stellen zweier benachbarter Windungen einer Zylinderwicklung. Beide besitzen eine gewisse Kapazität gegeneinander, jede für sich hat eine bestimmte Kapazität gegen Erde und zwischen beiden liegt ein Umgang der Wicklung, also eine Induktivität. Diese Verhältnisse gelten für die ganze Länge der Wicklung; man kann eine solche daher näherungsweise durch ein Schema darstellen, wie es Fig. 5 gibt. Trifft ein rasch veränderlicher Vorgang auf ein solches Gebilde, so pflanzt er sich darin zunächst mit Hilfe der Kapazitäten fort, denn die Induktivitäten verhalten sich raschen Zustandsänderungen gegenüber wie Unterbrechungen. Ueber die dargestellte Serienparallelschaltung von Kapazitäten muss sich im ersten Moment eine Spannungsverteilung einstellen, welche Aehnlichkeit hat mit der bei einer Kette von Hängeisolatoren; die Spannungsdifferenz über die erste Kapazität C ist am grössten, dann nimmt sie von Kapazität C zu Kapazität C ungefähr im gleichen Verhältnis ab.

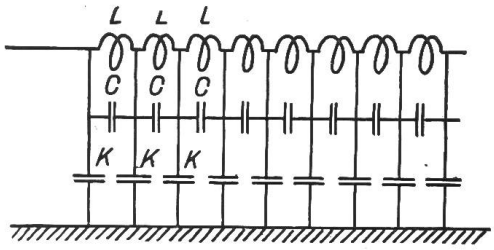

Fig. 5
L = Induktivitäten der Windungen
C = Gegenseitige Kapazitäten der Windungen
K = Kapazitäten der Windungen gegen Erde

Zugleich fangen diese Kapazitäten an, sich über die parallelgeschalteten Induktivitäten zu entladen; welche innere Schwingungen da entstehen und welche Rolle z. B. die gegenseitige Induktivität der Windungen dabei spielt, lässt sich nicht ohne weiteres übersehen. Doch genügt es zum allgemeinen Verständnis der Versuchsresultate, welche im folgenden gegeben werden, nachstehende drei Punkte festzuhalten.

1. Transformatoren bestehen aus einer Reihe hintereinanderliegender schwingungsfähiger Kreise (Serieschaltung von Induktivität und Kapazität).

2. Schnell veränderliche Vorgänge, wie Sprungwellen, pflanzen sich zunächst in einer Wicklung mit Hilfe des Systems von gegenseitigen Kapazitäten und Erdkapazitäten ihrer Spulen fort. Dabei stellt sich, ähnlich wie bei Kettenisolatoren, eine derartige Verteilung der Spannungen zwischen gegenüberliegenden Stellen benachbarter Spulen ein, dass sie am Wicklungseingang am grössten sind und von da fortlaufend abnehmen.

3. Die Kapazitäten entladen sich über die Induktivitäten ihrer zugehörigen Wicklungsteile. Falls die erregenden Vorgänge mit einer bestimmten Frequenz auftreten (Spannungsverlauf an einem Leitungsende bei Reflexion von Spannungswellen) und diese mit der Eigenfrequenz innerer Schwingungskreise übereinstimmt, ist demnach zu erwarten, dass im Innern des Transformators Resonanzerscheinungen sich einstellen und solche zu hohen Spannungsdifferenzen zwischen benachbarten Wicklungsteilen führen.

Diese Betrachtungsweise wird durch die Erfahrung bestätigt. Bei mehr als der Hälfte von uns beobachteter Spulenschlüsse, welche als Folge von Sprungwellenbeanspruchungen anzusprechen sind, liegt die Defektstelle im Anfang der Wicklung. Ebenso sind aber auch Spulenschlüsse an beliebiger Stelle der Wicklung anzutreffen. In den wenigsten Fällen genügt dabei die Annahme, dass es sich um das Ueberschlagen vereinzelter schwacher Stellen könne gehandelt haben, sondern man muss innere Schwingungen als die Ursache der gefährlichen Spannungen zwischen den betroffenen Lagen oder Spulen annehmen. Dies scheint auch durch die Versuchsresultate, welche in Fig. 6*a* dargestellt sind, bestätigt zu werden. Diese Kurven

wurden bei Erdschlussversuchen aufgenommen. Auf einer Freileitung, an die ein Transformator angeschlossen war, erzeugte man künstliche Erdschlüsse, in verschiedenen Entfernungen vom Transformator aus. An den Erdschlusstellen war jeweils eine Kugelfunkenstrecke mit bestimmter Kugeldistanz eingebaut. Die Spannung des Systems wurde solange erhöht, bis ein Ueberschlag und damit ein Erdschluss erfolgte. Die Sprungwellenhöhe war dann gleich der Ueberschlagsspannung der eingestellten Kugelfunkenstrecke. Mittels einer Funkenstrecke, welche von einer Quecksilberdampflampe bestrahlt wurde, mass man zwischen Anzapfungen die Sprungspannungen über einzelne Spulen des Transformators (zwei Lagen); die Ordinaten obiger Kurven sind die gemessenen Sprungspannungen in Prozenten der Sprungwellenhöhe; die Abszisse ist nach den Spulen der betreffenden Transformatorentwicklung unterteilt und numeriert.

Die Kurven zeigen deutlich, dass bei den meisten Entfernungen der Erdschlussstellen vom Transformator die Sprungwellenbeanspruchung der Spulen vom Anfang der Wicklung an gegen ihre Mitte zu abnimmt, um nur ganz am Ende unter Umständen wieder eine kleine Erhöhung zu erfahren. Von welcher Bedeutung aber

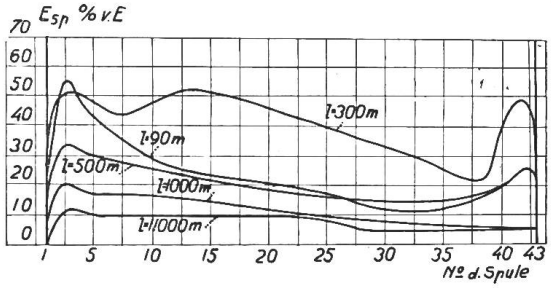

Fig. 6*a*

Verteilung der Sprungspannung E_{sp} pro Spule über die Wicklung einer Transformatorensäule bei Erdschlüssen in der Entfernung l vom Transformator.
E ist die Höhe der Sprungwelle.

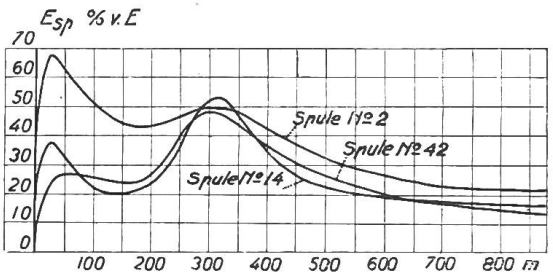

Fig. 6*b*

Abhängigkeit der Sprungspannung E_{sp} über einzelne Spulen einer Transformatorenwicklung von der Entfernung zwischen Erdschlusstelle und Transformator.
E ist die Höhe der Sprungwelle.

die inneren Resonanzvorgänge sein können, zeigt die Kurve, welche bei $l = 300$ m aufgenommen wurde. Man sieht, dass im Innern und am Ende der Wicklungen Spannungen über einzelne Spulen von gleicher oder nahezu gleicher Höhe wie an ihrem Anfang auftreten können. Der resonanzartige Charakter dieser Erscheinung geht besonders deutlich aus Fig. 6*b* hervor, welche die Beanspruchungen je einer Spule am Anfang, in der Mitte und am Ende einer Transformatorsäule in Funktion der Entfernung zwischen Transformator und Erdschlusstelle darstellt. Eine Vorstellung von der Grösse dieser Sprungwellenbeanspruchungen kann man sich durch folgende Ueberlegung machen: Der Transformator, an dem die Versuche vorgenommen wurden, hat 57 kV Nennspannung. Die Ueberschlagsspannung der Isolatoren eines Netzes mit dieser Betriebsspannung ist zirka 130 kV. Erfolgt in einem solchen Netz ein Isolatorenüberschlag z. B. im Gefolge eines indirekten Blitzschlages, so hat die Sprungwelle, welche daraus entsteht, eine Höhe von 130 kV. Im normalen Betrieb beträgt die Spannung über eine Spule zirka 800 V. Die Sprungwellenbeanspruchung zwischen zwei Spulen kann 67 % der Sprungwellenhöhe, d. h. hier 88 kV und damit das hundertfache der normalen Beanspruchung ausmachen.

Für die Gefährlichkeit dieser Erscheinungen ist nun allerdings nicht allein die Höhe der Spannung massgebend, sondern vor allem auch die Zeit, während der sie zwischen den betrachteten Spulen herrscht; diese dürfte hier von der Grössenordnung 10^{-5} Sekunden sein.

Schliesslich sei darauf hingewiesen, dass obige Resultate zahlenmässig nicht auf andere Transformatoren übertragen werden können; denn alle Daten, wie gegenseitige Kapazitäten der Spulen und Lagen und ihre Erdkapazitäten hängen vornehmlich von den konstruktiven Verhältnissen ab.

III. Die Wirkung von Schutzmitteln.

Zum Schutze von Transformatoren gegen Sprungwellengefährdung werden heute vornehmlich vier Methoden angewendet:

1. Verstärkung der Windungsisolation der ersten Spulen jeder Wicklung.
2. Vorschalten von Drosselspulen.
3. Vorschalten von Kondensatoren.
4. Durchgehende qualitative Verbesserung der Wicklungsisolation.

Durch die Verstärkung der Isolation der ersten Spulen will man der stärkeren Sprungwellenbeanspruchung im Eingang der Wicklungen Rechnung tragen.

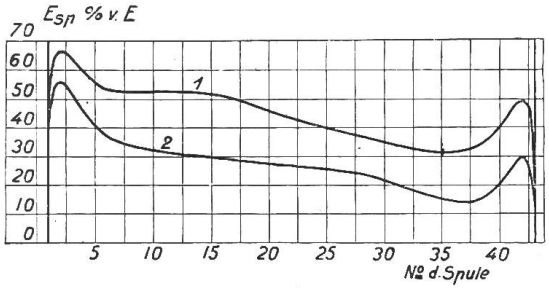

Fig. 7

Verteilung der Sprungspannung E_{sp} pro Spule über die Wicklung einer Transformatorensäule; Hüllkurven der Messungen bei verschiedenen Entfernungen zwischen Erdschlusstelle und Transformator.

Kurve 1: Isolation der Eingangs- und Endspulen verstärkt.

Kurve 2: Alle Spulen gleich isoliert.

E ist die Höhe der Sprungwelle.

Eine Schutzwirkung der Drosselspulen erwartet man aus der Ueberlegung heraus, dass durch eine solche Spule ein der Wicklung ähnliches Gebilde vor den Transformator geschaltet werde; in ihr müssten daher die starken Beanspruchungen auftreten, welche sonst die ersten Spulen der Wicklung gefährdet hätten. Diese selber würden aber nur noch schwach beansprucht.

Für die Kondensatoren spricht folgende Ueberlegung. Sind sie den Klemmen eines Transformators vorgeschaltet und kommt auf einer Phase eine Sprungwelle (Entladewelle!) heran, so muss zuerst der Kondensator anfangen, sich zu entladen, bevor an den Klemmen etwas bemerkbar wird. Entlädt sich eine Kapazität, so sinkt die Spannung an ihr nur allmählich, und zwar bei gegebenen Verhältnissen im übrigen Stromkreis um so langsamer, je grösser die Kapazität ist. Dadurch ist aber auch die Veränderung der Spannung an den Transformatorklemmen verlangsamt; für die Transformatorwicklung wird mit andern Worten durch die Kondensatoren die Stirn der Sprungwelle abgeflacht und dadurch die Beanspruchung zwischen den Spulen verringert.

Bei den erwähnten Versuchen wurde der Schutzwert dieser Einrichtungen festzustellen gesucht. Dazu wurden die Sprungwellenbeanspruchungen pro Spule über die Wicklung einer Säule hin bei verschiedenen Entfernungen *l* zwischen Transformator und Erdschlusstelle gemessen, ganz gleich, wie dies an früherer Stelle beschrieben worden ist (siehe Fig. 6*a*), nur wurden jetzt am Transformator die erwähnten „Schutzmittel" angewendet, resp. vorgeschaltet. Die Resultate sind in den Fig. 7 und 8 enthalten. Die Kurven darin sind Hüllkurven der gemessenen Kurvenscharen; sie sind in gleicher Weise um die zugehörigen Messwerte geführt, wie dies mit der Hüllkurve auf Fig. 6*a* geschah; somit umfassen sie die höchsten Sprungwellenbeanspruchungen, mit denen in jedem Fall zwischen den einzelnen Spulen des untersuchten Transformators überhaupt gerechnet werden muss.

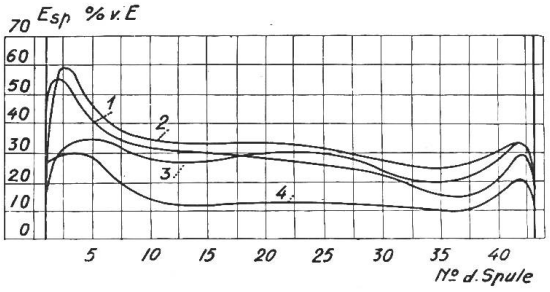

Fig. 8

Verteilung der Sprungspannung E_{sp} pro Spule über die Wicklung einer Transformatorensäule; Hüllkurven der Messungen bei verschiedenen Entfernungen zwischen Erdschlusstelle und Transformator; Spulenisolation durchgehend gleichartig.

Kurve 1: Transformator ohne vorgeschaltete Schutzeinrichtung.

Kurve 2: Auf jeder Phase eine Drosselspule von 0,5 *mH* zwischen Leitung und Klemme.

Kurve 3: Auf jeder Phase eine Drosselspule von 3,0 *mH* zwischen Leitung und Klemme.

Kurve 4: Auf jeder Phase Kapazität vou 0,01 *uF* zwischen Klemme und Erde.

E ist die Höhe der Sprungwelle.

Wie aus Fig. 7 zu ersehen ist, hatte die Verstärkung der Windungsisolation im Wicklungseingang eine Erhöhung der Sprungwellenbeanspruchungen durch den

ganzen Transformator hin zur Folge. Dies erklärt sich zwanglos aus der durch die Verstärkung bedingten Verkleinerung der gegenseitigen Kapazität der Wicklung. Sie beträgt im Bereich der verstärkten Eingangsspulen zirka + 20 %, bei den Endspulen zirka + 66 %; die Durchschlagsfestigkeit ist an beiden Stellen zirka 75 % höher als bei den gewöhnlichen isolierten Spulen. Somit ist durch diese Massnahme für die verstärkten Spulen, besonders im Eingang eine merkliche Erhöhung der Sicherheit erzielt worden. Leider wird dieser Vorteil dadurch illusorisch gemacht, dass auch an den innern Spulen, deren Isolation nicht verstärkt worden ist, die Sprungwellenbeanspruchung eine Erhöhung bis zirka + 75% erfahren hat.

Was das Vorschalten von Drosselspulen als Schutzmittel gegen Sprungwellen anbelangt, so zeigen die Kurven 1, 2 und 3 der Fig. 8, dass die mehrfach schon geäusserten Zweifel hinsichtlich ihres Schutzwertes durchaus begründet sind. Während kleine Induktivitätswerte, z. B. 0,5 *mH* eine Grösse der „Schutzdrosselspulen", welche in Anlagen häufig anzutreffen ist, die Sprungwellengefährdung der Transformatoren sogar vergrössern, so bieten erst Drosselspulen von der Grössenordnung 3,0 *mH* einigen Schutz für die Eingangsspulen; für die Mitte und das Ende einer Säulenwicklung dagegen, wo vor allem die inneren Resonanzen (siehe Abschnitt II) gefährlich werden können, haben auch sie keinen Schutzwert.

Eine gewisse Zurückhaltung gegenüber der Verwendung von Drosselspulen als Schutzmittel gegen Sprungwellen scheint uns daher sehr begründet.

Anders verhält es sich mit den Kondensatoren. Diese besitzen unter allen Umständen einen merklichen Schutzwert. Wie man aus einem Vergleich der Kurve 1 und 4 der Fig. 8 ersehen mag, drückt eine Kapazität von der Grössenordnung 0,01 μF die Sprungwellenbeanspruchung im Transformator stets auf mindestens die Hälfte seiner Beanspruchung ohne Schutzeinrichtung herunter.

Konstruktiv machen verschiedene heute vorliegende Konstruktionen einen guten Eindruck. Die Verwendung solcher Kondensatoren zur Verkleinerung der Sprungwellenbeanspruchung der Transformatoren ist also denkbar. Auf der andern Seite muss aber doch bemerkt werden, dass sie einen recht fühlbaren Raumbedarf aufweisen, andererseits die Kosten erhebliche sind. Dazu kommt, dass die Verwendung von Schutzapparaten überhaupt dem heutigen begrüssenswerten Bestreben nach möglichster Vereinfachung der Anlagen zuwiderläuft.

Diese Gründe haben die Firma BBC dazu geführt, die Lösung darin zu suchen, dass die Isolationsfestigkeit der Wicklungen von Grosstransformatoren durchgehend verstärkt wird, und zwar nicht durch Vergrösserung der Abstände, sondern durch die Wahl eines hochwertigeren Isolationsmaterials.

Aus dem bisher Gesagten, können wir die folgenden Schlüsse ziehen:

1. Verstärkte Isolation der Eingangsspulen eines Transformators bietet nur bedingten Schutz.
2. Drosselspulen sind als Schutzmittel zu vermeiden.
3. Kondensatoren sind ein Schutzmittel.
4. Die durchgehende Verbesserung der Spulenisolation dürfte erst zu einer ganz befriedigenden Lösung des Sprungwellenschutzes führen.

IV. Sprungwellenprobe.

Im vorhergehenden Abschnitt wurde gezeigt, dass ein Sprungwellenschutz für Transformatoren durch vorgeschaltete Schutzapparate möglich ist, dass aber die Konstruktion „sprungwellensicherer" Transformatoren eine noch bessere Lösung der Frage darstellt. Wird jedoch einer Maschine eine bestimmte Eigenschaft zugesprochen oder von ihr verlangt, so bedingt dies die Möglichkeit einer entsprechenden Prüfung. Zur Feststellung der „Sprungwellensicherheit" der Transformatoren wird somit fabrikationsmässig neben den normalen Prüfungen, wie Uebersetzungsmessung, Verlustmessung, Spannungsprobe usw. eine „Sprungwellenprobe" eingeführt werden müssen, wie es z. B. auch die neuen Prüfvorschriften des V. D. E.

tun. Von einer solchen Sprungwellenprobe muss verlangt werden, dass durch sie der zu prüfende Transformator eine bestimmte Zeitlang einer solchen Sprungwellenbeanspruchung ausgesetzt werde, wie er sie maximal im Betriebe erfahren kann; d. h. es muss die verwendete Sprungwellenhöhe die Grösse der Ueberschlagsspannung der Isolatoren des betreffenden Systems besitzen. Ausserdem muss die Forderung gestellt werden, dass ein Spulenschluss, welcher infolge der Prüfung entsteht, leicht feststellbar sei, und dass die defekte Stelle deutlich ausgebrannt werde. Wie diese Bedingungen von der Prüfmethode, welche bei BBC ausgearbeitet wurde, erfüllt werden, soll bei späterer Gelegenheit dargelegt werden.

Wie die andern Prüfungen hat die Sprungwellenprobe zwei Aufgaben zu erfüllen. Zunächst wird sie den konstruierenden Firmen erlauben, ihre bestehenden Konstruktionen zu sichten, um ungeeignete Bauweisen verbessern oder ausscheiden zu können. Sodann wird sie es ermöglichen, die einzelnen Exemplare herauszufinden, bei denen während der Fabrikation Verletzungen oder Schwächungen der Wicklungsisolation vorgekommen sind, bevor sie in den Betrieb kommen.

Es ist zu erwarten, dass es auf diesem Wege möglich sein wird, die Zahl der Lagen- und Spulenschlüsse bei Transformatoren, welche in gutem Zustand sind und richtig unterhalten werden, in hohem Masse zu verringern, so wie es möglich war, durch die genügend scharfen Prüfbedingungen der Spannungsprobe Ueberschläge von Wicklungen nach Erde zu einer Seltenheit zu machen.

V. Anhang. Wanderwellenvorgänge auf Leitungen.

Im vorangehenden Teile dieses Aufsatzes wurde bemerkt, dass eine genaue Untersuchung der Ausgleichsvorgänge nur mit Hilfe höherer Analyse durchführbar sei. Trotzdem ist es möglich, mit elementaren Mitteln Einblick in einige allgemeine Beziehungen, welche hier gelten, zu gewinnen. Da dies einzelne Leser interessieren dürfte, soll in diesem Anhang eine solche Darstellung gegeben werden, ohne dass dabei Anspruch darauf erhoben wird, Neues zu bieten.

Die Bezeichnungen, welche Verwendung finden, sind folgende:

E Höhe der Spannungswelle = Spannung der Leitung gegen Erde vor der Entladung,
J Höhe der Stromwelle,
$x; x_1$ Leitungsstrecke; Entfernung einer betrachteten Leitungsstelle von der Erdschlusstelle,
$t; t_1$ Zeitspanne; betrachteter Moment,
v Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Entladewelle auf der Leitung,
$\varkappa$ Kapazität der Leitung gegen Erde pro Längeneinheit,
λ Induktivität der Leitung pro Längeneinheit,
ϱ Ohmscher Widerstand der Leitung pro Längeneinheit,
γ Ableitung, d. h. der reziproke Wert des Isolationswiderstandes der Leitung pro Längeneinheit.

Mit dem Zeichen Δ soll eine kleine Differenz oder Veränderung der damit verbundenen Grösse bezeichnet werden; so bedeutet z. B.:

ΔE eine kleine Spannungsänderung an einem bestimmten Punkt der Leitung innerhalb einer kurzen Zeitspanne Δt oder in einem bestimmten Moment auf einer kurzen Leitungsstrecke Δx. Da die Welle auf der Leitung wandert, sind die beiden Betrachtungsweisen gleichwertig, wenn die Vorgänge in der Wellenstirn, an den verschiedenen Stellen der Leitung immer wieder gleichartig verlaufen; dies ist praktisch der Fall, solange der Charakter der Leitung keine wesentliche Aenderung erfährt, z. B. durchgehend Freileitung oder durchgehend Kabel. Dasselbe gilt für ΔJ eine kleine Veränderung des Stromwertes.

Die Grössen Widerstand und Ableitung sollen vorläufig vernachlässigt werden. Die Beziehungen der Werte von Strom und Spannung werden daher allein durch das Induktivitäts- und Kapazitätsgesetz bestimmt; diese sollen vorerst einer kurzen Betrachtung unterzogen werden.

1. Kapazitätsgesetz.

Sind zwei Leiter mit einer Stromquelle verbunden, und herrscht zwischen ihnen eine Spannungsdifferenz E_c, so besteht in ihrer Umgebung ein elektrisches Feld. Dies ist ein Spannungszustand im Raum, der sich dadurch äussert, dass zwischen beliebigen Punkten Spannungsdifferenzen bestehen, welche gesetzmässig verteilt sind und sich, wenigstens in Luft, proportional mit dem Wert von E_c ändern. Wie jeder Spannungszustand, bedeutet die Existenz eines elektrischen Feldes eine Energieansammlung- und Verteilung in dem betreffenden Raume; dabei ist die aufgespeicherte Energiemenge gegeben durch den Ausdruck:

$$A_c = C \cdot \frac{E_c^2}{2}$$

worin C die gegenseitige Kapazität der betrachteten Leiter bedeutet. Aendert E_c seinen Wert, so geht der Energieausgleich in Form eines Stromes J_c vor sich. Dabei gilt das Kapazitätsgesetz: Aendert sich in einem Stromkreis über eine Kapazität C die Spannung E_c an der Kapazität in der Zeit Δt um den Betrag ΔE_c, so wird der Kreis von einem Strom J_c durchflossen, welcher in jedem Augenblick gegeben ist durch die Beziehung:

$$J_c = - C \cdot \frac{\Delta E_c}{\Delta t}$$

unter der Voraussetzung, dass die Veränderung von E_c um den Betrag ΔE_c während der Zeitspanne Δt linear verlaufe. In den meisten Fällen ist daher Δt so klein zu wählen, dass $\frac{\Delta E_c}{\Delta t}$ in den Differentialquotienten $\frac{dE_c}{dt}$ übergeht.

2. Induktivitätsgesetz.

Wird ein Leiter von einem Strom J durchflossen, so umgibt ihn ein magnetisches Feld; dieses äussert sich dadurch, dass magnetisch polarisierte Körper (Magnetnadeln) im Raume um den Leiter an allen Punkten bestimmte Kraftwirkungen erfahren, welche sie z. B. bei einem gestreckten Leiter in eine Ebene senkrecht zum Leiter und senkrecht zum Radiusvektor aus dem Leiter in den betrachteten Punkt einzustellen suchen. Die Energiemenge A_m, welche so im Raume um einen Stromkreis verteilt wird, ist gegeben durch:

$$A_m = L \frac{J^2}{2}$$

darin ist L die Induktivität des Stromkreises. Wird der Wert des Stromes J geändert, so verursacht der damit verbundene Energieausgleich die Entstehung einer elektromotorischen Kraft. Dabei gilt das Induktivitätsgesetz: Verändert sich in einem Stromkreis die Stromstärke in der Zeit Δt um den Betrag ΔJ, so entsteht in einem Abschnitt des Kreises mit der Induktivität L eine *EMK* E, welche in jedem Augenblick gegeben ist durch die Beziehung:

$$E = - L \frac{\Delta J}{\Delta t}$$

Die Veränderung von J um den Betrag ΔJ muss dabei während des Zeitraumes Δt linear verlaufen; für genaue Untersuchungen wird daher $\frac{\Delta J}{\Delta t}$ in den Differentialquotienten $\frac{dJ}{dt}$ übergeführt.

Um eine Vorstellung vom Zusammenhang des elektrischen und magnetischen Feldes zu gewinnen, scheint folgendes Bild brauchbar zu sein. Ist eine Flüssigkeitsmenge dem Schwerefeld ausgesetzt, so stellt sie eine gewisse Menge potentieller Energie dar; lässt man sie teilweise in der Richtung der Schwerkräfte in Bewegung geraten, so können in ihr Wirbelbewegungen auftreten, welche in Ebenen senkrecht zur Schwerkraftsrichtung verlaufen; die wirbelnde Flüssigkeit ist dabei eine Form kinetischer Energie, welche aus der potentiellen Energie der ruhenden Flüssigkeit hervorgegangen ist. Ein elektrisches Feld ist mit den Wirkungen des Schwerefeldes vergleichbar; ein magnetisches Feld mit den Erscheinungen der Wirbelbewegung; in diesem Sinne kann man auch sagen, das elektrische Feld sei ein Träger von potentieller Energie, das magnetische Feld dagegen von kinetischer Energie.

Zur Untersuchung der Ausgleichsvorgänge auf Leitungen ist folgendes festzuhalten: Steht ein Leiter unter Spannung gegen Erde, so ist im elektrischen Feld zwischen beiden eine gewisse Energiemenge (potentiell) angesammelt. Unterteilt man das ganze Gebilde durch Schnitte senkrecht zur Leitung, so kann man sagen, dadurch würden Leiter, Feld und Feldenergie so geteilt, dass die Energiemengen zwischen den Schnitten proportional zu den Leitungslängen wären (soweit die Leitung gleichartig ausgeführt ist). Man kann somit einzelnen Leitungsstücken, z. B. der Längeneinheit, Kapazitätswerte zusprechen, welche sich proportional zur Leitungslänge verhalten, d. h. von einer Kapazität pro Längeneinheit reden.

Eine entsprechende Ueberlegung gilt für das magnetische Feld des Stromes im Leiter und die Definition einer Induktivität der Leitung pro Längeneinheit.

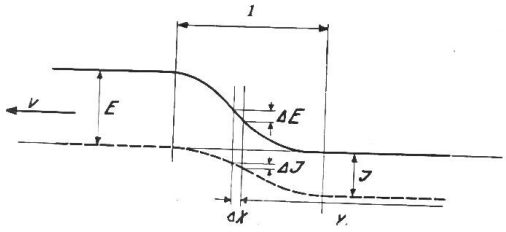

Fig. 9

Einziehen einer Entladewelle auf einer Leitung.
1 = Stirn der Welle.

Damit kommen wir zur Betrachtung der Wanderwellen selbst. Die Vorgänge, von denen eine solche ihren Ausgang nimmt, wurden schon in Abschnitt I dieses Aufsatzes beschrieben. Hier sollen mehr allgemeine Beziehungen angegeben werden; daher setzt die Betrachtung gleich bei den Vorgängen an einem beliebigen Punkt der Leitung ein.

Gelangt eine Entladewelle in einem bestimmten Augenblick an eine Stelle, welche die Entfernung x_1 von der Erdschlusstelle (siehe Fig. 9) hat und betrachten wir dort eine Leitungsstrecke von der Länge Δx, während die Wellenstirn darüberläuft, so fällt daran im genannten Augenblick die Spannungsdifferenz um ΔE; der Strom, welcher dort infolge der Spannungsänderung um $-\Delta E$ an der zugehörigen Kapazität $\varkappa \cdot \Delta x$ entsteht, ist ΔJ; die Induktivität der Leitung an jener Stelle ist gegeben durch $\lambda \cdot \Delta x$. Nach dem Induktivitätsgesetz gilt dann:

$$\text{a)} \quad -\Delta E = -\lambda \cdot \Delta x \cdot \frac{\Delta J}{\Delta t} \quad \text{und} \quad \text{b)} \; \Delta J = -\varkappa \Delta x \cdot \frac{(-\Delta E)}{\Delta t}$$

Aus der Beziehung für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit: $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ erhält man $\Delta t = \frac{\Delta x}{v}$ und damit durch Einsetzung in den Gleichungen a) und b):

$$\text{a')} \quad -\Delta E = -\lambda \cdot v \cdot \Delta J \quad \text{und} \quad \text{b')} \quad \Delta J = \varkappa \cdot v \cdot \Delta E$$

Daraus lässt sich berechnen:

$$\text{c)} \quad v = \frac{1}{\sqrt{\lambda \cdot \varkappa}} \quad \text{und} \quad \text{d)} \quad \Delta E = \sqrt{\frac{\lambda}{\varkappa}} \cdot \Delta J$$

Nun ist $E = \Sigma \Delta E$; und $J = \Sigma \Delta J$ daher d') $E = \sqrt{\frac{\lambda}{\varkappa}} \cdot J$

Man sieht, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit durch die Leitungskonstanten bestimmt wird; deren Werte liegen aber bei Freileitungen so, dass v praktisch immer der Lichtgeschwindigkeit gleichgesetzt werden kann.

Der Ausdruck $\sqrt{\frac{\lambda}{\varkappa}}$ ist, wie schon früher bemerkt wurde, der sogenannte Wellenwiderstand der Leitung. Er ist eine Leitungskonstante, soweit λ und $\varkappa$ als solche betrachtet werden können. Bei Freileitungen hat er etwa die Grössenordnung $\sqrt{\frac{\lambda}{\varkappa}} = \sim 800$ Ohm.

Die Verhältnisse bei einem *Ladevorgang* lassen sich nun ganz einfach darstellen. Kommt eine Ladewelle in die Gegend x der Leitung, so haben wir dort Vorgänge, wie sie Fig. 10 zeigt.

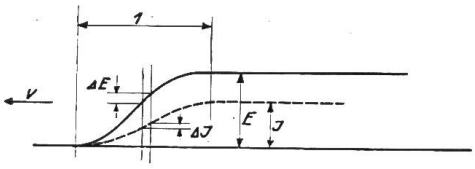

Fig. 10

Einziehen einer Ladewelle auf einer Leitung.
1 = Stirn der Welle.

Auf der Strecke Δx steigt die Spannung in der Zeit Δt um den Betrag ΔE; dies bedingt, dass dort in die Kapazität der Leitung $\varkappa \cdot \Delta x$ der Strom ΔJ eindringt. Wieder gelten Induktivitäts- und Kapazitätsgesetz:

$$\Delta E = -\lambda \cdot \Delta x \frac{\Delta J}{\Delta t} \quad \text{und} \quad \Delta J = -\varkappa \Delta x \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

woraus genau dieselben Schlüsse folgen wie bei der Untersuchung der Entladevorgänge.

Interessant ist nun eine Betrachtung der Energieumsetzungen, welche die Wellenvorgänge vollziehen.

Vor der Entladung war im Raum um die Leitung bei der Stelle x auf die Strecke Δx die elektrische Feldenergie:

$$A_{ex} = \varkappa \Delta x \frac{E^2}{2}$$

verteilt. Da kein Strom fliesst, ist keine magnetische Feldenergie vorhanden. Nach dem Vorbeilaufen der Wellenstirn findet sich an derselben Stelle allein die magnetische Energie:

$$A_{mx} = \lambda \Delta x \frac{J^2}{2}$$

Drückt man nun E durch J oder umgekehrt mit Hilfe des Wellenwiderstandes aus und setzt in der entsprechenden Gleichung ein, so folgt:

$$A_{mx} = A_{ex}$$

d. h., die elektrische Feldenergie an der Stelle x setzt sich beim Entladevorgang an Ort und Stelle in magnetische Feldenergie um und umgekehrt, wenn eine Reflektion erfolgt ist. Eine Wanderung der Energie findet nicht statt.

Beim Ladevorgang ist dies anders. Wo die Ladewelle hinkommt, wird in dem Raum, in welchem vorher kein Feld bestanden hat, elektrische und magnetische Feldenergie gleichzeitig verteilt; dabei verteilt sich die gesamte Wellenenergie in der Weise, dass an jeder Stelle elektrisches und magnetisches Feld gleiche Energiemengen enthalten. In der Gegend, von der die Ladewelle ihren Ausgang genommen hat, verschwinden dagegen beide Felder; es muss daher in diesem Fall ein Energietransport vorsichgehen.

Praktisch hat dies zur Folge, dass bei Entladevorgängen an keiner Stelle der Leitung grössere Energiemengen angesammelt werden können, als schon vorher dort vorhanden waren; bei Ladevorgängen sind dagegen Energiestauungen, z. B. an den Reflexionsstellen, möglich. Dies kann eine Gefahr für die Isolation gegen Erde bedeuten. Ueber die Gefährdung der inneren Isolation von Wicklungen jedoch

ist damit nichts gesagt; welche Gesichtspunkte dort in Betracht fallen, ist in den einleitenden Abschnitten dieses Aufsatzes dargestellt worden (Steilheit der Wellenstirn und Frequenz der Reflexionen).

Zum Schluss mögen noch einige Bemerkungen über den Einfluss von Leitungswiderstand und Ableitung folgen. Ihre Wirkung als Dämpfung ist einfach zu erklären. Herrscht an der Stelle x einer Leitung eine Spannung E gegen Erde, so wird im Isolationswiderstand $\frac{\varrho_i}{\Delta x} = \frac{1}{\gamma \cdot \Delta x}$ elektrische Energie in Wärme umgesetzt entsprechend der Beziehung:

$$A_{ev} = \frac{E^2}{\varrho_i} \Delta x = \gamma \, \Delta x \, E^2$$

Fliesst an der gleichen Stelle der Leitung der Strom J, so vernichtet der ohm'sche Widerstand $\varrho \cdot \Delta x$ eine Energiemenge

$$A_{mv} = \varrho \, \Delta x \, J^2$$

Auf diese Weise wird den Wellenvorgängen Energie in nicht umkehrbarer Form entzogen, bis sie verschwunden sind.

Noch eine allgemeine Bemerkung zu den vorhergehenden Untersuchungen. Es wurden dort eigentlich stillschweigend die Vorgänge untersucht, wie sie auf einer offenen, eindrähtigen, für die Entladevorgänge noch mit Gleichstrom geladenen Leitung verlaufen müssen. Bei einer betriebenen Leitung von mindestens zwei Phasen bestehen aber noch elektrische Felder zwischen den einzelnen Phasenleitern entsprechend der aufgedrückten Systemspannung und magnetische Felder entsprechend dem Belastungsstrom. Eine genauere Untersuchung erlaubt aber nachzuweisen, dass hier das sog. Superpositionsprinzip verwendbar ist, so dass z. B. bei Erdschluss einer Phase die dargestellten Wellenvorgänge sich den betriebsmässigen Erscheinungen überlagern, indem dabei die Energie ausschwingt und in der Dämpfung vernichtet wird, welche noch im Moment des Erdschlusses im elektrischen Felde zwischen betroffener Phase und Erde gebunden war.

Die Bedeutung des Bezugssinnes im Vektordiagramm.[1])

Von *Albert von Brunn*, dipl. Ing., *Zürich*.

(Fortsetzung und Schluss.)

Nachdem der Verfasser im ersten Teil der Arbeit (s. Bulletin 1922, No. 9) in einer Reihe von „Sätzen" die Anwendung von Vektoren zur Darstellung elektr. Vorgänge erläutert hat, wendet er im vorliegenden Teile der Arbeit diese „Sätze" auf verschiedene, der Praxis entnommene Beispiele an.

Dans la première partie (bulletin 1922, Nr. 9) l'auteur a établi plusieurs théorèmes sur l'utilisation du calcul vectoriel pour caractériser les phénomènes qui ont lieu dans les circuits parcourus par un courant électrique. Il les applique dans cette dernière partie à divers exemples pratiques.

Anwendungs-Beispiele.

Um dem Praktiker das Verständnis für die im letzten Heft entwickelte Methode zu erleichtern und ihm die Möglichkeit zu verschaffen, selbständig richtige Diagramme zu entwickeln, wollen wir im Folgenden für einige einfache Schaltungen die Vektordiagramme aufbauen.

1. Wir stellen uns die Aufgabe, die Spannung zu bestimmen, welche ein Generator G erzeugen muss, um durch ein System, gebildet aus einem induktiven (L), einem ohmschen (R) und einem kapazitiven (C) Widerstand, einen bestimmten Strom hindurchzutreiben. Fig. 23 stelle diesen Stromkreis dar. Der Einfachheit wegen legen wir die Bezugspfeile so, dass sie einen einheitlichen Umlaufssinn ergeben.

[1]) Im ersten Teil dieser Arbeit sind drei sinnstörende Fehler stehen geblieben: Auf Seite 392 müssen die beiden Gleichungen auf der 14. und 15. Linie von oben lauten:

$$J_c \cos \varphi_c = - J_2 \cos \varphi_2 \quad \text{und} \quad J_c \sin \varphi_c = - J_2 \sin \varphi_2$$

und drei Linien weiter muss es heissen: „Stromkreis J_1" anstatt „Stromkreis J_2".