Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 44 (1953)
Heft: 3

Artikel: Schutz von Transformatoren gegen Überspannung durch Ableiter oder Stabfunkenstrecken
Autor: Aeschlimann, H. / Amsler, J.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1058048

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: 04.12.2025

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

Schutz von Transformatoren gegen Überspannung durch Ableiter oder Stabfunkenstrecken

Von *H. Aeschlimann*, Genf, und *J. Amsler*, Aarau

621.314.21 : 621.316.933

Obwohl schon verschiedene Veröffentlichungen über die Schutzwirkung von Ableitern und Stabfunkenstrecken gemacht wurden, bestehen noch wenige Angaben über deren Ansprechspannungen für steile Wanderwellen, sowie über Messungen, die direkt in Parallelschaltung mit Transformatoren durchgeführt wurden. Es wird an Hand von Oszillogrammen gezeigt, dass bei gleicher 50-%-Ansprechstoßspannung die Stabfunkenstrecke für steile Stösse bedeutend höhere Ansprechwerte hat als der Ableiter und dass der Spannungszusammenbruch bei der Stabfunkenstrecke bedeutend steiler ist als beim Ableiter. Weitere oszillographische Messungen zeigen, dass eine vollständige Schutzwirkung des Ableiters für den Transformator nur gewährleistet ist, wenn dieser unmittelbar beim Transformator angeordnet ist.

Bien que divers articles aient déjà été publiés au sujet de la protection par parafoudres et éclateurs à barreaux, peu d'indications ont été fournies sur leurs tensions de fonctionnement aux ondes à front raide et sur les mesures effectuées avec ces dispositifs branchés directement en parallèle avec des transformateurs. A l'aide d'oscillogrammes et de diagrammes, les auteurs montrent que ces dispositifs, surtout les éclateurs, fonctionnent, en cas d'ondes de choc à front raide, à des valeurs beaucoup plus élevées que leur tension de choc 50 % pour ondes normales. Il peut donc en résulter un contournement ou une perforation du transformateur, avant que l'éclateur n'ait fonctionné. D'autres relevés oscillographiques ont montré qu'un parafoudre ne peut protéger efficacement le transformatuer que s'il est monté à proximité immédiate de celui-ci.

1. Einleitung

Die Probleme, die sich im Betrieb von elektrischen Anlagen und Übertragungsleitungen aus dem Auftreten von Überspannungen ergeben, können noch nicht als völlig abgeklärt gelten. Dies kommt vor allem in der Verschiedenheit der zum Überspannungsschutze zur Anwendung gelangenden Mittel zum Ausdruck. Ein grundlegender Schritt vorwärts wurde in den letzten zwanzig Jahren getan, indem der Gedanke der Koordination der Isolation zum grossen Teil verwirklicht wurde. Damit bestehen für die verschiedenen Anlageteile, je nach den Folgen, die eine Beschädigung ihrer Isolation nach sich zieht, verschiedene Isolationshöhen. Diese Massnahme hält grundsätzlich gefährliche Überspannungen von empfindlichen Anlageteilen fern. Es können dadurch jedoch Überschläge in der Anlage nicht allgemein verhindert werden. Die Koordination bietet aber die notwendige Grundlage für die Lösung des Kernproblems des Überspannungsschutzes, d. h. des Schutzes von Transformatoren.

Unzweifelhaft stellt ein Durchschlag der inneren Transformator-Isolation die schwerwiegendste Folge einer Überspannung dar, indem diese einen längeren Betriebsunterbruch nach sich zieht. Überschläge von Luftisolation bzw. Porzellanisolation haben in der Regel nur kurze Betriebsunterbrüche zur Folge, die man aber dennoch zu vermeiden trachtet. Um den Wert der verschiedenen Schutzeinrichtungen, die heute in der Praxis Anwendung finden, beurteilen zu können, soll das grundsätzliche Verhalten der Transformatorisolation kurz erwähnt werden:

Treten am Transformatoreingang Wechselspannungen von einigen kHz auf (Netzeigenschwingungen) oder treffen Wanderwellenzüge auf mit flach ansteigender Stirn, dann verteilt sich die Spannung gleichmässig auf die einzelnen Wicklungsabschnitte. Dabei wird hauptsächlich die Isolation zwischen den Wicklungen einerseits und den geerdeten Teilen des Transformators anderseits beansprucht. Bei zunehmender Frontsteilheit des auftreffenden Spannungsstosses ist die Spannungsverteilung zwischen den einzelnen Wicklungsabschnitten mehr und mehr ungleichmässig. Als Folge davon tritt eine zunehmende Beanspruchung der Isolation besonders zwischen den Wicklungsabschnitten am Eingang des Transformators auf. Fig. 1 zeigt schematisch die Durchschlagsfestigkeit eines Transformators im Vergleich zur Ansprechspannung einer auf das Sicherheitsniveau bzw. auf das Schutzniveau eingestellten Schutzfunkenstrecke und eines auf das Schutzniveau eingestellten Überspannungsableiters. Mit zunehmender Steilheit des Spannungsstosses steigt im allgemeinen die Festigkeit des Transformators nicht im gleichen Masse an wie diejenige einer Stabfunkenstrecke, so dass im Gebiete grosser Steilheiten sogar ein Überschneiden mit der

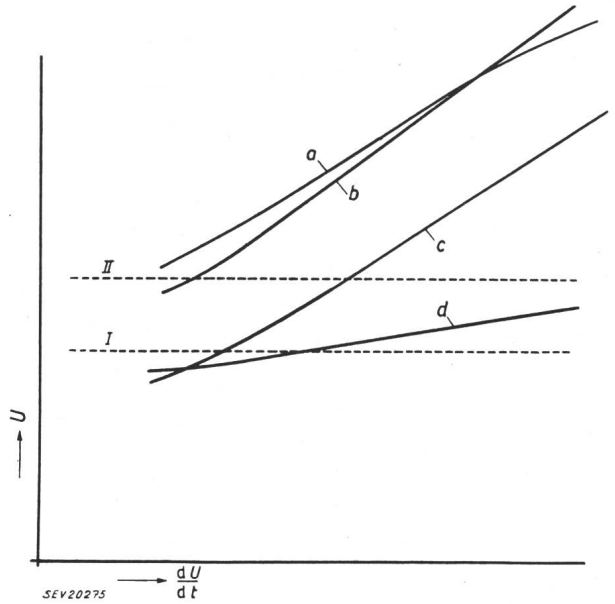

Fig. 1

Schematische Darstellung des Verlaufs der Ansprechspannung U verschiedener Schutzeinrichtungen im Vergleich zur Isolationsfestigkeit eines Transformators in Funktion der Frontsteilheit $\frac{dU}{dt}$ der Stosswelle

a Isolationsfestigkeit des Transformators.
b Ansprechspannung einer auf das «Sicherheitsniveau» eingestellten Schutzfunkenstrecke
c Ansprechspannung einer auf das «Schutzniveau» eingestellten Schutzfunkenstrecke
d Ansprechspannung des Ableiters
I Höchstwert der 50-%-Ansprechstoßspannung und der Restspannung der Ableiter nach den «Leitsätzen für den Schutz elektrischer Anlagen gegen atmosphärische Überspannungen», Publikation Nr. 163 des SEV
II Mindestwert der 50-%-Überschlagstoßspannung der Koordinationsfunkenstrecke des Transformators (vgl. Publikation Nr. 183 des SEV)

Festigkeit einer auf das Sicherheitsniveau eingestellten Schutzfunkenstrecke möglich ist. Es ergibt sich aus diesen Überlegungen, dass der Transformator bei allen praktisch vorkommenden Frontsteilheiten durch eine Schutzeinrichtung am besten geschützt ist, deren Ansprechspannung mit zunehmender Frontsteilheit der auftreffenden Stosswellen nur wenig zunimmt.

Als weitere Forderung an die Schutzvorrichtung muss noch erwähnt werden, dass deren Schutzaktion keinen Betriebsunterbruch nach sich ziehen soll. Diese zweite Forderung hat denn auch in der Praxis die Wahl auf folgende Schutzvorrichtungen beschränkt:

a) Stabfunkenstrecke, deren 50-%-Ansprechstoßspannung dem «mittleren Niveau» (Sicherheitsniveau) d. h. der Festigkeit der äusseren Isolation der Durchführung entspricht. Um Betriebsunterbrüche beim Ansprechen zu vermeiden, muss das Netz dabei über eine Löschspule geerdet werden.

b) Stabfunkenstrecke wie unter a), deren 50-%-Ansprechstoßspannung jedoch auf das tiefer liegende «Schutzniveau» eingestellt ist.

c) Überspannungsableiter, deren 50-%-Ansprechspannung beim Normalstoss höchstens dem «Schutzniveau» entspricht. Diese Schutzvorrichtung verursacht keine Betriebsunterbrüche, unabhängig davon, ob der Nullpunkt der Anlage starr oder über eine Löschspule bzw. über Ohmsche Widerstände oder überhaupt nicht geerdet ist.

Als dritte Forderung an die Schutzvorrichtung muss verlangt werden, dass nach deren Ansprechen die Spannung am Transformator nicht zu schnell, d. h. in Form einer steilen Sprungwelle abgebaut wird. Wie schon erwähnt, ist bei sehr raschen Spannungsänderungen die Isolation zwischen den einzelnen Wicklungsabschnitten der Gefahr von Durchschlägen ausgesetzt. Die rasche Spannungsänderung bei einem Zusammenbruch der Spannung infolge eines Überschlages in der Anlage z. B. beim Ansprechen einer Schutzfunkenstrecke gefährdet die Transformatorwicklung erheblich mehr als die Spannungsänderung beim Auftreffen einer Überspannungswelle mit der grössten praktisch vorkommenden Stirnsteilheit.

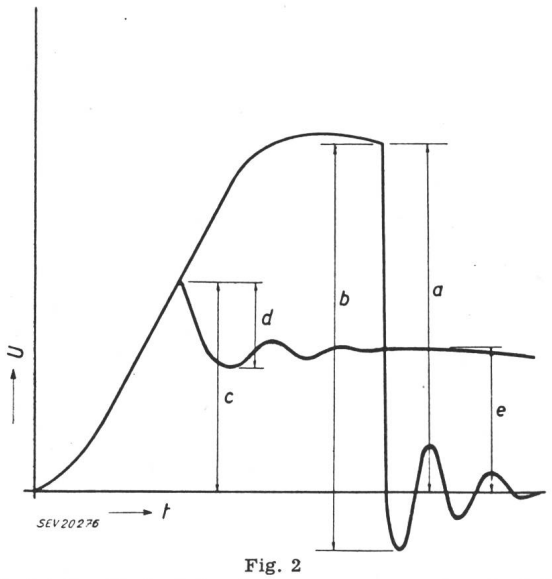

Fig. 2
Prinzipieller Verlauf des Spannungszusammenbruchs beim Ansprechen einer Stabfunkenstrecke bzw. eines Überspannungsableiters
Beide Schutzapparate haben die gleiche 50-%-Ansprech-Stoßspannung
a Ansprechspannung der Stabfunkenstrecke
b Spannungssprung nach dem Ansprechen der Stabfunkenstrecke
c Ansprechspannung des Ableiters
d Spannungssprung nach dem Ansprechen des Ableiters
e Restspannung des Ableiters
U Spannung; *t* Zeit

Die Verhältnisse beim Ansprechen von Stabfunkenstrecken sind in Fig. 2 prinzipiell dargestellt. Der Spannungszusammenbruch findet hier in einer äusserst kurzen Zeit statt, und zwar vom Ansprechwert bis Null, wobei je nach den Netzverhältnissen noch ein Überschwingen zu erwarten ist. Der Zusammenbruch der Spannung an einer Funkenstrecke ohne Serie-Impedanz stellt für den Transformator die steilste mögliche Welle dar.

Der Spannungsverlauf am Ableiter ist grundsätzlich anderer Natur, da er wesentlich durch das Verhalten der spannungsabhängigen Widerstände bestimmt ist. Dieser Verlauf ist ebenfalls in Fig. 2 dargestellt. Die Spannung fällt hier nicht sofort auf Null, sondern auf einen Wert der durch den Spannungsabfall des Entladestromes an den spannungsabhängigen Widerständen bedingt ist (sog. Restspannung). Diese Spannung liegt bei den heute üblichen Überspannungsableitern nur wenig unter der Ansprechspannung, so dass die Höhe des Sprunges nur klein ist. Da überdies die Zeitdauer der Spannungsabsenkung durch das Vorhandensein der Ableiterwiderstände gegenüber der Funkenstrecke vergrössert ist, so ist die Steilheit des Spannungszusammenbruchs beim Ableiter ganz wesentlich kleiner. Das weitere Abklingen der Spannung am Ableiter auf den Wert der momentanen Netzspannung erfolgt dann noch wesentlich langsamer, da die Ladung über die spannungsabhängigen Widerstände nur langsam abfliessen kann.

Im folgenden sind Messungen wiedergegeben, die an Stabfunkenstrecken und an Überspannungsableitern vorgenommen wurden. Die in Fig. 1 und 2 wiedergegebenen prinzipiell dargestellten Verhältnisse werden dadurch zahlenmässig belegt. Die Messungen gestatten, sich ein Bild zu machen über das Verhalten der verschiedenen Schutzvorrichtungen und über die dabei auftretende Beanspruchung des Transformators.

2. Die verwendeten Schutzvorrichtungen

Die Einfachheit im Aufbau der Stabfunkenstrecke, die auch im Betriebe als ihr Hauptvorteil zu betrachten ist, macht es nicht nötig, hier näher auf Einzelheiten der Konstruktion einzugehen. Der Überspannungsableiter hingegen stellt bereits einen hochentwickelten Apparat dar, der verschiedenen Forderungen genügen muss.

Der Forderung nach grösster Betriebssicherheit kann vor allem dadurch Genüge geleistet werden, dass der Ableiter vollständig luftdicht abgeschlossen ist, so dass keine Spur von Feuchtigkeit in das Innere eindringen kann.

Die weitere Forderung nach Unabhängigkeit der Ansprechspannung bei 50 Hz und bei Stoßspannung von der Beregnung und Verschmutzung des Ableiterisolators sowie von der kapazitiven Beeinflussung durch die Umgebung wurde durch die Ent-

wicklung besonderer Systeme für die Spannungssteuerung der Ableiterfunkenstrecken befriedigt.

Eine dritte, bereits in der Einleitung erwähnte Forderung ist diejenige nach einer möglichst kleinen Abhängigkeit der Stossansprechspannung von der Frontsteilheit. Bei jeder Funkenstrecke steigt die Ansprechspannung beim Ansprechen in der Front mit zunehmender Frontsteilheit mehr oder weniger stark an. Auch die Ableiterfunkenstrecke ist davon nicht ausgenommen. Dieses Ansteigen lässt sich aber durch zweckentsprechende Ausgestaltung der Funkenstrecken-Elektroden und besonders durch Vorionisierung der Funkenstrecken mittels geeigneter Massnahmen sehr klein halten, so dass die in Abhängigkeit der Frontsteilheit aufgetragene Ansprechspannung sehr flach verläuft (Fig. 4, 5, 6 und 7).

Bei den im folgenden beschriebenen Messungen wurden ein Ableiter älterer Bauart und ein Ableiter neuerer Bauart verwendet, die sich praktisch nur dadurch unterschieden, dass der zweite vorionisierte Funkenstrecken aufwies. Damit sollte untersucht werden, in welchem Masse Unterschiede zwischen Ableitern verschiedener Bauart erwartet werden können. Die neuere Ausführung weist zudem eine sehr kleine Streuung der Ansprechstoßspannung auf, so dass das durch den Ableiter gegebene Schutzniveau gut definiert ist.

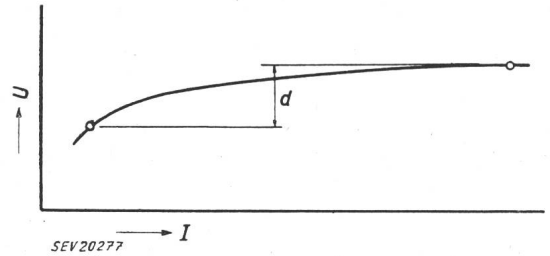

Fig. 3
Prinzipieller Verlauf der Restspannungs-Stromcharakteristik eines Überspannungsableiters
d Differenz der Restspannung *U* für Stoss-Stromamplituden *I* von 1000 bzw. 10 000 A

Als vierte an die Ableiter zu stellende Forderung kann schliesslich noch genannt werden, dass die Restspannung über einen weiten Strombereich von der Stoßstrom-Amplitude möglichst wenig abhängig und dass sie bei den praktisch vorkommenden Stromstössen nicht höher als die Ansprechspannung sein soll. Durch die Höhe der Restspannung wird ja nicht nur die Höhe des Spannungssprungs nach dem Ansprechen des Ableiters (vergl. Fig. 2), sondern auch die spannungsmässige Beanspruchung des zu schützenden Objektes gegen Erde wesentlich bestimmt. In Fig. 3 ist die Restspannungsstrom-Charakteristik der verwendeten Ableiter wiedergegeben. Es ist daraus ersichtlich, dass auch die vierte Forderung in befriedigender Weise erfüllt ist.

3. Messungen

Die in der Einleitung angegebenen allgemein gehaltenen Angaben wurden an praktisch ausgeführten Ableitern und Stabfunkenstrecken untersucht. Die Messungen wurden ohne und in Parallelschaltung mit Transformatoren durchgeführt.

a) Ansprechspannung von Überspannungsableitern und Stabfunkenstrecken in Abhängigkeit der Frontsteilheit

Es wurden Überspannungsableiter sowie Stabfunkenstrecken der Nennspannung von 80 kV mit Normalwellen 1|50 µs im Bereich von 250 bis 1000 kV/µs Frontsteilheit untersucht. Die 50-%-Ansprechstoßspannung der Ableiter betrug 250 kV. Die Schlagweite der Stabfunkenstrecke war bei dem einen Versuch 310 mm entsprechend einer 50-%-Ansprechstoßspannung von 250 kV; dann wurde sie auf 510 mm eingestellt, was einer 50-%-Ansprechstoßspannung von 360 kV entspricht. Die Steilheit der Front wurde durch Erhöhung der Spannung der Normalwellen am Stossgenerator bewirkt.

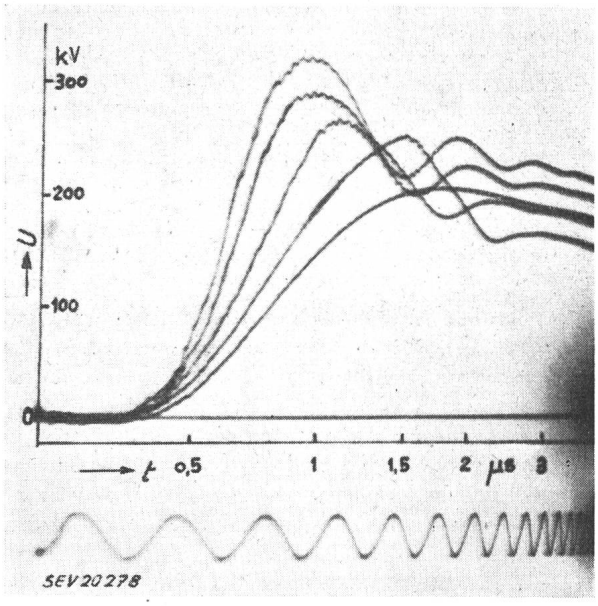

Fig. 4
Oszillogramme von Normalwellen, die durch einen Überspannungsableiter neuerer Bauart begrenzt wurden
Der Ableiter ist für ein Netz mit einer Nennisolationsspannung von 80 kV bestimmt und hat eine 50-%-Ansprechstoßspannung von 250 kV. Eichfrequenz zur Ermittlung des Zeitmaßstabes $f = 3$ MHz

Fig. 4 zeigt Oszillogramme, welche an einem Ableiter neuerer Konstruktion aufgenommen wurden. Bei diesem Ableiter wurde durch spezielle Massnahmen erreicht, dass selbst für sehr steile Wanderwellen die Ansprechspannung das vorgesehene Schutzniveau nicht wesentlich überschreitet. Demgegenüber veranschaulichen die Oszillogramme der Fig. 5 die Messungen an der Stabfunkenstrecke. In beiden Fällen wurden die Normalwellen von ca. 250 bis 1000 kV verändert. Durch eine grosse Anzahl Messungen, wie sie in den Fig. 4 und 5 veranschaulicht sind, wurde die Ansprechspannung von Stabfunkenstrecken und Ableitern mit der Nennspannung von 80 kV ermittelt. Die gefundenen Resultate sind in Fig. 6 und 7 zusammengefasst. In der Fig. 6 sind die Ansprechspannungen in Abhängigkeit der Ansprechzeit aufgetragen; Fig. 7 zeigt deren Abhängigkeit von der Frontsteilheit. Die bessere Schutzwirkung der Ableiter gegenüber den Stabfunkenstrecken geht aus den Fig. 4 bis 7 deutlich hervor. Ein Vergleich der Charakteristiken

der Ableiter älterer mit jenen neuerer Konstruktion zeigt, dass durch geeignete Massnahmen die Ableiter wesentlich verbessert werden können. Aus Fig. 7 ist zu entnehmen, dass die Ansprechspannung beider Ableiter im untersuchten Bereich praktisch geradlinig mit der Frontsteilheit zunimmt. Je flacher

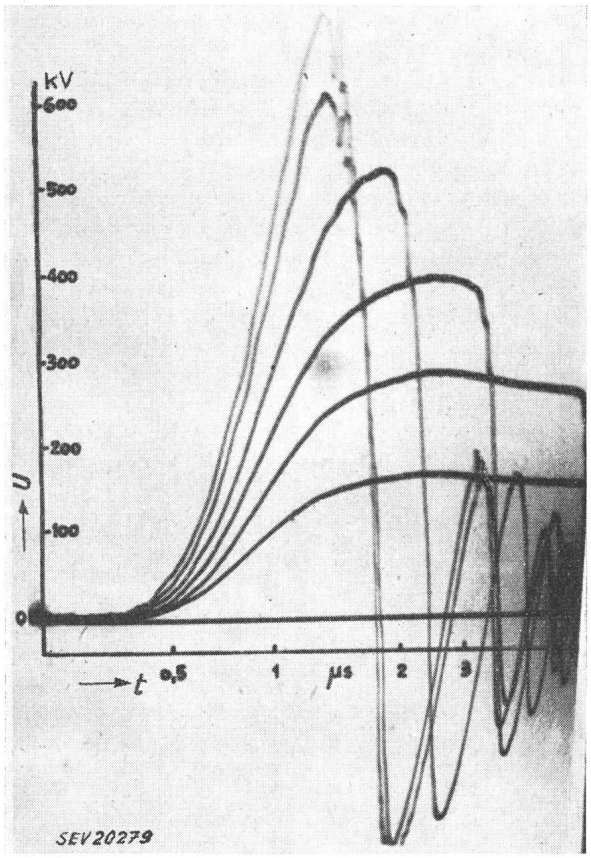

Fig. 5
Oszillogramme von Normalwellen, die durch eine Stabfunkenstrecke begrenzt wurden (Spannungsbereich wie bei Fig. 4)
Die Stabfunkenstrecke hatte eine gleich grosse 50-%-Ansprechstoßspannung wie der Überspannungsableiter in Fig. 4

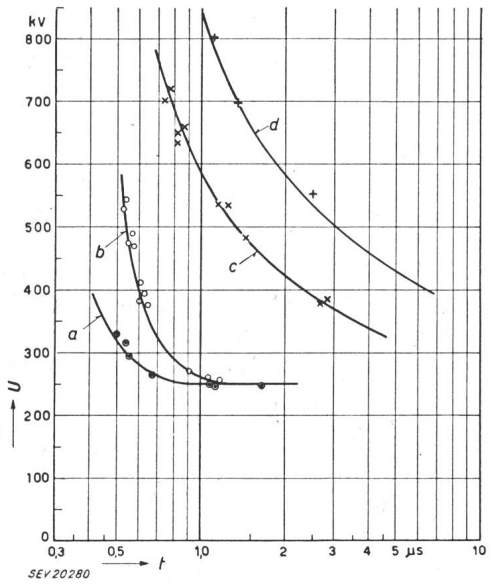

Fig. 6
Darstellung der gemessenen Ansprechspannungen U verschiedener Schutzeinrichtungen in Abhängigkeit von der Ansprechzeit t für Normalwellen verschiedener Amplituden

a Ableiter neuerer Bauart mit vorionisierten Funkenstrecken
b Ableiter älterer Bauart. Beide Ableiter haben eine 50-%-Ansprechstoßspannung von 250 kV
c Stabfunkenstrecke bei einer Schlagweite von 310 mm, 50-%-Ansprechstoßspannung = 250 kV
d Stabfunkenstrecke bei einer Schlagweite von 510 mm, 50-%-Ansprechstoßspannung = 360 kV

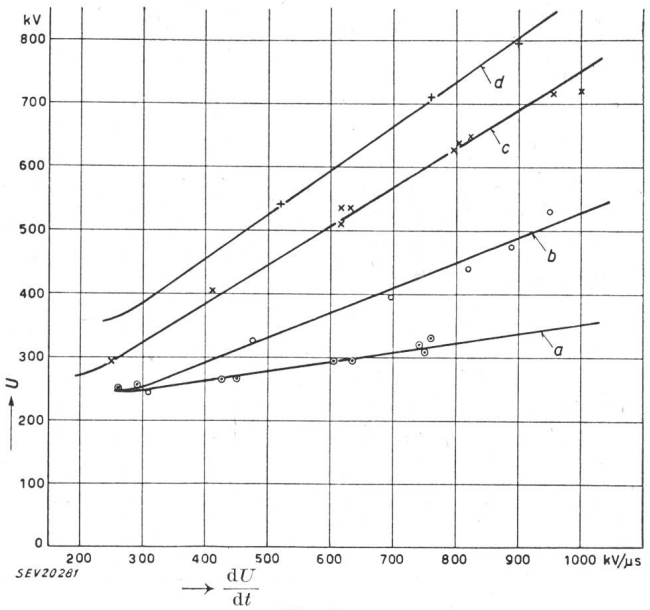

Fig. 7
Darstellung der gemessenen Ansprechspannungen U verschiedener Schutzeinrichtungen in Abhängigkeit von der Frontsteilheit $\frac{dU}{dt}$ für Normalwellen verschiedener Amplituden

a Ableiter neuerer Bauart mit vorionisierten Funkenstrecken
b Ableiter älterer Bauart
c Stabfunkenstrecke bei einer Schlagweite von 310 mm
d Stabfunkenstrecke bei einer Schlagweite von 510 mm
50-%-Ansprechstoßspannungen gleich wie in Fig. 6

sie ansteigt, um so besser ist die Schutzwirkung des Ableiters. Es wäre daher erwünscht, wenn für die Ableiter ausser den üblichen Angaben wie: Ableitvermögen, 50-%-Ansprechstoßspannung und Restspannung, noch der Tangens des Winkels angegeben würde, welchen die Geraden *a* bzw. *b* in Fig. 7 mit der Abszisse einschliessen. Diese Angabe kennzeichnet das Verhalten des Ableiters für steile Wanderwellen. Je kleiner dieser Tangens ist, um so besser ist die Schutzwirkung des Ableiters.

b) Transformator mit parallel angeordnetem Überspannungsableiter bzw. Stabfunkenstrecke als Schutzeinrichtung

Die vorangehenden Versuche wurden ohne parallel zum Ableiter bzw. zur Stabfunkenstrecke angeordneten Transformator durchgeführt. Es könnte angenommen werden, dass die Anwesenheit des Transformators die Vorgänge wesentlich beeinflusst. Um zu zeigen, dass dies praktisch nicht der Fall ist, wurden Versuche an der 80-kV-Wicklung eines 10 000-kVA-Transformators durchgeführt. Die 50-%-Ansprechstoßspannung des parallel zum Transformator angeordneten Ableiters war 250 kV, jene der Stabfunkenstrecke 360 kV. Die Oszillogramme der Fig. 8 zeigen die entsprechenden Resultate. Die auf den Transformator gegebene Normalwelle von 360 kV wurde durch den Ableiter auf 260 kV begrenzt, wie das Oszillogramm *a* zeigt. Die Stabfunkenstrecke kam erst nach ca. 7 µs zum Ansprechen, so dass der Transformator während dieser Zeit der Spannungswelle von 360 kV ausgesetzt war.

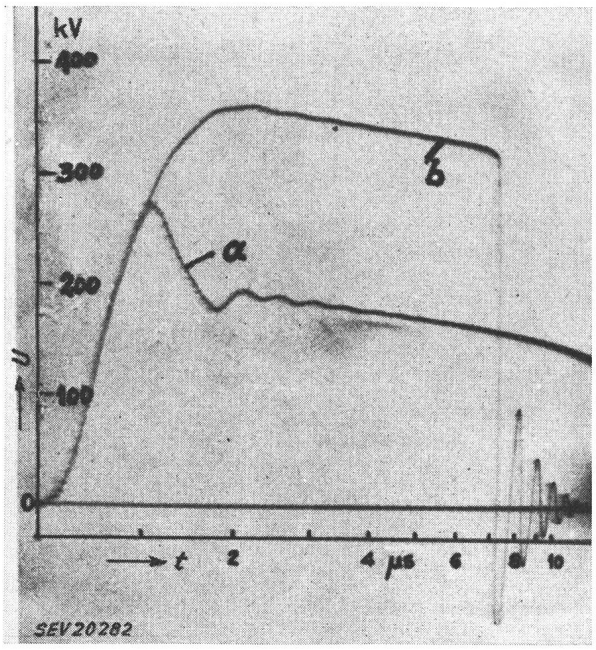

Fig. 8
Vergleich der Schutzwirkung eines Ableiters und einer Stabfunkenstrecke an der 80-kV-Wicklung eines Transformators von 10 000 kVA

a Die Normalwelle wird durch einen Ableiter begrenzt. 50-%-Ansprechstoßspannung = 250 kV
b Die gleiche Normalwelle wird durch eine Stabfunkenstrecke begrenzt. 50-%-Ansprechstoßspannung der Stabfunkenstrecke = 360 kV

c) Beanspruchung der Eingangs-Windungen bzw. -Spulen

Durch das Auftreffen von Wanderwellen auf die Wicklungen von Transformatoren entstehen zwischen benachbarten Teilen der Wicklungen erhebliche Spannungsunterschiede. Erfolgt an der Stabfunkenstrecke ein Überschlag, so erfolgt dadurch ein ausserordentlich steiler Spannungszusammenbruch, welcher eine sehr grosse dielektrische Beanspruchung der Eingangs-Windungen bzw. -Spulen bewirkt. Demgegenüber erfolgt beim Ansprechen des Ableiters das Absinken der Spannung viel weniger steil und die einander benachbarten Wicklungsteile erfahren dadurch keine zusätzliche Beanspruchung. Die Oszillogramme der Fig. 9 und 10 veranschaulichen diese Verhältnisse. Sie wurden an einem Transformator von 6000 kVA an der ersten Doppelspule der 45-kV-Wicklung aufgenommen. Das Oszillogramm der Fig. 9 zeigt die Spannungsdifferenz, welche an dieser Spule auftritt, wenn eine Normalwelle auf die Wicklung aufläuft, die durch eine Stabfunkenstrecke begrenzt wird. Die Front der auflaufenden Normalwelle bewirkt vorerst eine Spannungsdifferenz von ca. 26 % der Amplitude U_0 dieser Welle. Im Augenblick, wo die Stabfunkenstrecke anspricht, verursacht der dadurch erzeugte Spannungssprung eine kurzdauernde, jedoch mehr

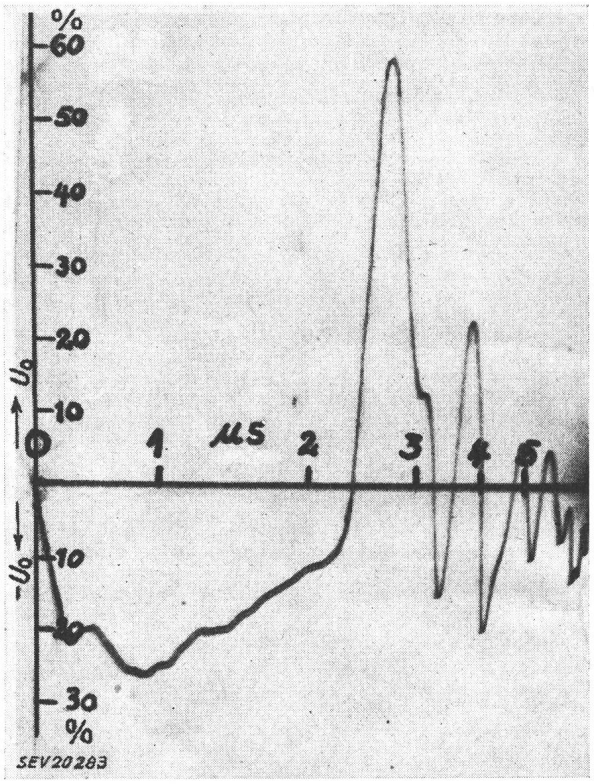

Fig. 9
Spannungsdifferenz an der ersten Doppelspule der 45-kV-Wicklung eines Transformators von 6000 kVA, wenn die auftreffende Normalwelle durch eine Stabfunkenstrecke begrenzt ist

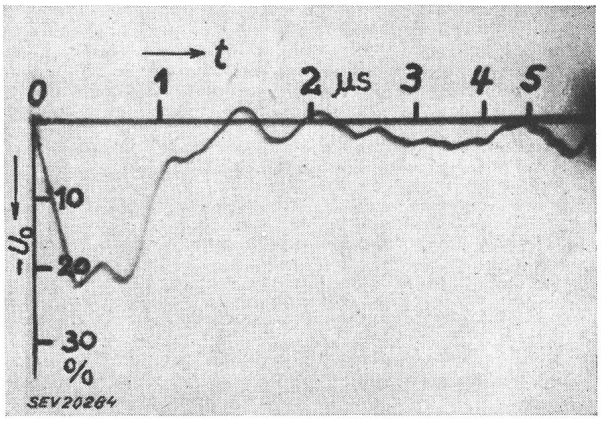

Fig. 10
Spannungsdifferenz an der gleichen Spule wie in Fig. 9, für den Fall, dass die auftreffende Normalwelle durch einen Überspannungsableiter begrenzt ist

als doppelt so hohe Spannungsdifferenz im umgekehrten Sinn. Zum Vergleich zeigt das Oszillogramm der Fig. 10 die Spannungsdifferenz an derselben Spule, wenn die gleiche Normalwelle auf die Wicklung gegeben wird, diese jedoch durch den Ableiter geschützt ist. Das Ansprechen des Ableiters bewirkt keine zusätzliche Beanspruchung, wie dies bei der Stabfunkenstrecke der Fall ist, sondern begrenzt die an der Spule auftretende Spannungsdifferenz auf einen zulässigen Wert.

Da die Stabfunkenstrecke eine grosse Ansprechzeit hat (vergl. Fig. 6 und 7), treten bei sehr steilen Wanderwellen beim Ansprechen der Stabfunkenstrecke an den Eingangswindungen bzw. -spulen ausserordentlich hohe Spannungsdifferenzen auf, die zu Überschlägen führen können.

d) Einfluss der Distanz zwischen Schutzeinrichtung und Transformator

Zwischen Stossgenerator und Transformator wurde eine Leitung von 220 m Länge eingeschaltet. Die Schutzeinrichtungen, d. h. der Ableiter oder die

Stabfunkenstrecke konnten also entweder unmittelbar am Transformator oder bis zu einer Entfernung von 220 m von diesem angeordnet werden.

Die Fig. 11 zeigt Oszillogramme, bei denen die Schutzeinrichtungen unmittelbar am Transformator angeordnet waren. Der Stossgenerator war über die 220 m lange Leitung mit der 80-kV-Wicklung des 10 000-kVA-Transformators verbunden. Bei dem Oszillogramm *a* wurde die Spannung durch einen Überspannungsableiter begrenzt, bei dem mit *b* bezeichneten durch eine Stabfunkenstrecke, deren 50-%-Ansprechstoßspannung 360 kV betrug. Das mit *c* bezeichnete Oszillogramm zeigt den Verlauf der Spannung, wenn weder Ableiter noch Stabfunkenstrecke angeschlossen sind. Wie schon bei

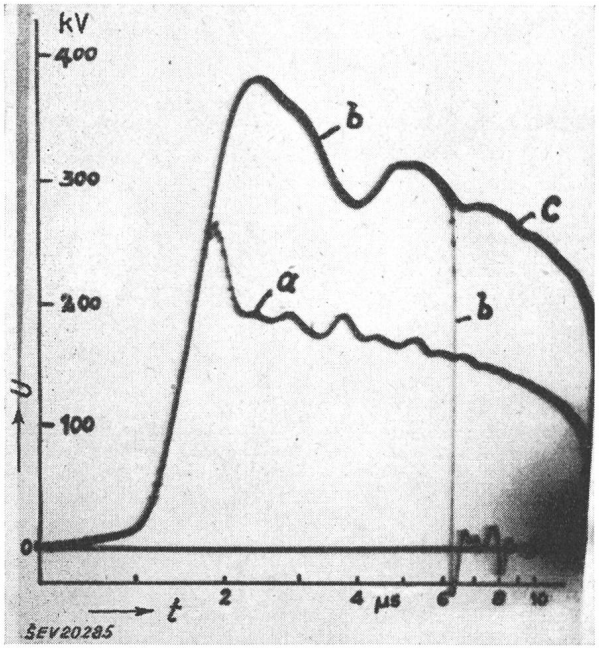

Fig. 11
Oszillogramme von Versuchen, bei denen die Schutzeinrichtungen unmittelbar am Transformator angeordnet waren
Zwischen dem 10 000-kVA-Transformator und einem Stossgenerator ist ein Leitungsstück von 220 m Länge eingeschaltet. Beim Oszillogramm *a* wird die ankommende Welle durch den unmittelbar an die Durchführung der 80-kV-Wicklung angeschlossenen Überspannungsableiter (50-%-Ansprechstoßspannung = 250 kV) begrenzt. Beim Oszillogramm *b* ist der Ableiter durch eine Stabfunkenstrecke (50-%-Ansprechstoßspannung = 360 kV) ersetzt. Das Oszillogramm *c* zeigt den Verlauf der Spannung am ungeschützten Transformator

den vorangehenden Versuchen gezeigt wurde, ist auch hier die wesentlich bessere Schutzwirkung des Ableiters gegenüber der Stabfunkenstrecke zu erkennen. Da zwischen dem Stossgenerator und dem Transformator ein Leitungsstück von 220 m Länge angeordnet ist, tritt eine Reflexion der Welle am Transformator auf, wie aus den Oszillogrammen *b* und *c* zu ersehen ist. Diese Reflexion hat zur Folge, dass am Transformator eine bedeutend höhere Spannung auftritt als die Spannungsamplitude der ankommenden Wanderwelle. Ist der Transformator aber durch einen unmittelbar dabeistehenden Ableiter geschützt, so spricht dieser schon in der Front der ankommenden Welle an und verhindert dadurch eine übermässige Beanspruchung der Isolation des Transformators.

Bei den Oszillogrammen der Fig. 12 und 13 war der Ableiter in 220 m bzw. 100 m Entfernung vom Transformator angeordnet. Die am Stossgenerator erzeugte Welle kam also von diesem zum Ableiter

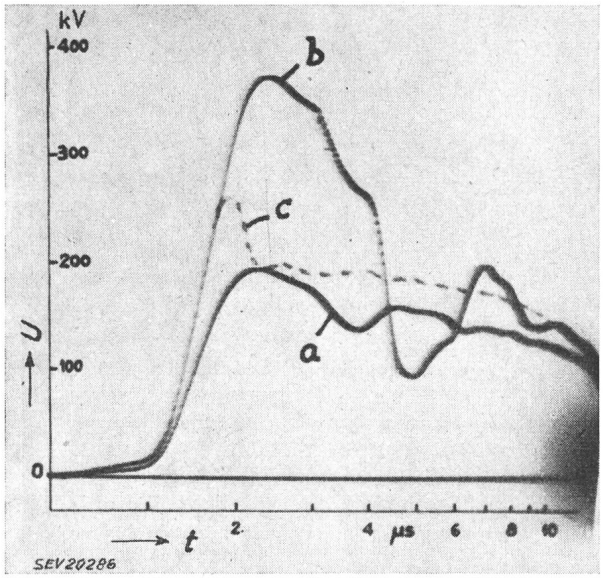

Fig. 12
Verminderung der Schutzwirkung des Ableiters, wenn dieser z. B. 220 m vom Transformator entfernt angeordnet ist
a Die Amplitude der Stoßspannung ist kleiner als die Ansprechspannung des Ableiters
b Die Stoßspannung ist durch den Ableiter begrenzt
c Begrenzung der Stosswelle nach *b* mit einem unmittelbar beim Transformator angeordneten Ableiter

und dann über das Leitungsstück zum Transformator. In den beiden Figuren zeigen die mit *a* bezeichneten Oszillogramme den Spannungsverlauf am Transformator für einen Spannungswert, welcher unterhalb der Ansprechspannung des Ableiters

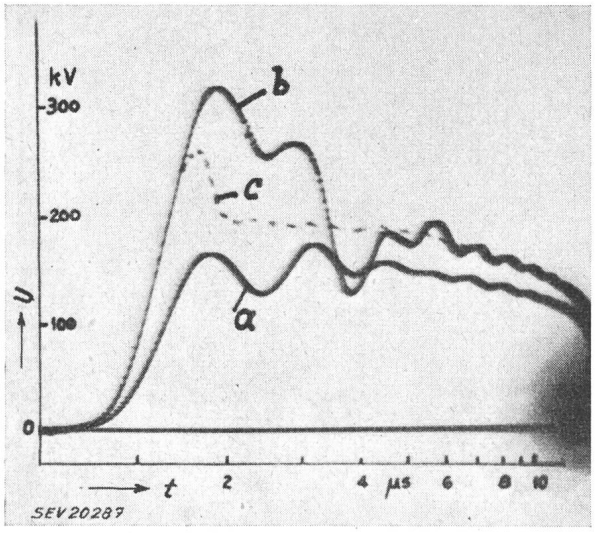

Fig. 13
Gleiche Messungen wie bei Fig. 12, der Abstand zwischen Transformator und Ableiter betrug jedoch 100 m
Bezeichnungen siehe Fig. 12

liegt. Die mit *b* bezeichneten Oszillogramme veranschaulichen den Spannungsverlauf, wenn der Ableiter anspricht. Die punktiert eingetragenen Kurven *c* zeigen den Verlauf der Spannung am Transformator für die gleichen Wanderwellen wie bei

den Oszillogrammen *b*, jedoch mit dem Unterschied, dass hier der Überspannungsableiter unmittelbar am Transformator angeordnet ist. Der Unterschied zwischen den beiden Kurven *b* und *c* veranschaulicht eindeutig die bekannte Tatsache, dass ein voller Schutz der Transformatoren durch Überspannungsableiter nur gewährt ist, wenn diese nicht weit vom Transformator entfernt angeordnet sind.

e) Schutzwirkung von Ableiter und Stabfunkenstrecken beim Auftreten von elektromagnetischen Schwingungen in den Transformatorwicklungen

Durch die Wanderwellen werden in den Wicklungen der Transformatoren elektromagnetische Schwingungen erzeugt. Die Amplituden dieser Schwingungen können unter Umständen höhere Werte annehmen, als jene der ankommenden Wanderwellen. Wenn z. B. die Wanderwelle in alle drei Phasen gleichzeitig eindringt, entsteht am Sternpunkt eine Schwingung, deren Amplitude jene der Wanderwelle bedeutend überschreitet.

Es werden aber auch elektromagnetische Schwingungen durch das Abschalten von Drosselspulen und Transformatoren erzeugt, bei diesen vor allem beim Abschalten im Leerlauf. Die Amplituden dieser elektromagnetischen Schwingungen können in gewissen Fällen beträchtliche Werte annehmen und dadurch die Isolationen des Transformators gefährden. Durch Überspannungsableiter oder durch Stabfunkenstrecken können diese Überspannungen begrenzt werden. Die Schutzwirkung dieser Apparate wurde an der 80-kV-Wicklung eines 10 000-kVA-Transformators experimentell kontrolliert. Beim Versuch wurden die beiden Phasen *U* und *V* miteinander verbunden. Ausserdem waren alle drei Phasen der Unterspannungswicklung miteinander verbunden und an Erde gelegt. Bei dieser Anordnung entstand beim Auftreffen einer Normalwelle auf die Phasen *U* und *V* an der dritten Phase *W* eine elektromagnetische Schwingung, deren Amplitude bedeutend höher war als jene der Normalwelle. Die Amplitude dieser Schwingung wurde einmal durch den Ableiter und nachher durch eine Stabfunkenstrecke begrenzt. Die 50-%-Ansprechstoßspannung des Ableiters betrug 250 kV. Die

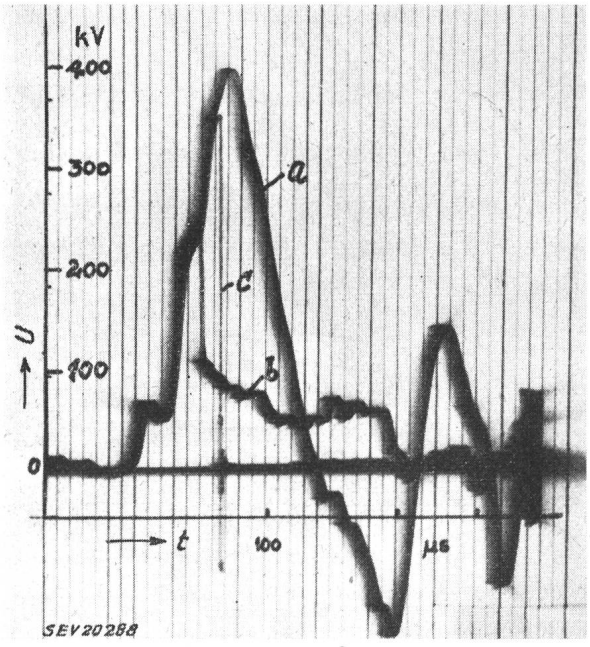

Fig. 14
Schutzwirkung von Ableiter und Stabfunkenstrecke bei elektromagnetischen Schwingungen in Transformatoren

a Elektromagnetische Schwingung an der Phase *W* der 80-kV-Wicklung eines Transformators von 10 000 kVA, beim Auftreffen einer Stosswelle auf die Phasen *U* und *V*
b Die auftreffende Stosswelle wird durch einen Überspannungsableiter begrenzt (50-%-Ansprechstoßspannung des Überspannungsableiters = 250 kV)
c Die auftreffende Stosswelle wird durch eine Stabfunkenstrecke begrenzt (50-%-Ansprech-Stoßspannung der Stabfunkenstrecke = 360 kV

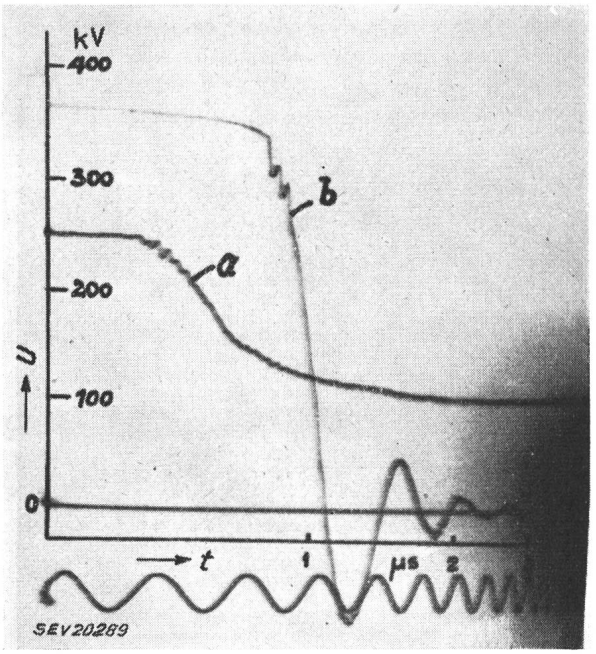

Fig. 15
Ausschnitt der Oszillogramme *b* und *c* der Fig. 14 mit anderem Zeitmaßstab

Das Oszillogramm *a* zeigt den Spannungsverlauf in der Phase *W*, wenn die auf die Phasen *U* und *V* auftreffende Stosswelle durch einen Überspannungsableiter begrenzt ist; *b* zeigt das gleiche, wenn die auftreffende Stosswelle durch eine Stabfunkenstrecke begrenzt ist

Distanz an der Stabfunkenstrecke war auf 510 mm eingestellt, entsprechend einer 50-%-Ansprechstoßspannung von 360 kV. Die bei diesem Versuch am Transformator aufgenommenen Oszillogramme zeigen Fig. 14 und 15. In der Fig. 14 zeigt das Oszillogramm *a* den gesamten Schwingungsverlauf. Bei dem mit *b* bezeichneten Oszillogramm wurde die Spannung durch den Ableiter, bei dem mit *c* bezeichneten durch die Stabfunkenstrecke begrenzt. Da es sich um einen verhältnismässig langsamen Spannungsanstieg handelt, tritt bei den beiden Apparaten keine Ansprechverzögerung ein. Aus den Oszillogrammen *b* und *c* der Fig. 14 könnte man schliessen, dass der Spannungszusammenbruch am Ableiter ebenso steil erfolgen würde wie bei der Stabfunkenstrecke.

Um zu zeigen, dass dies nicht der Fall ist, wurde mit Hilfe einer speziellen Auslösevorrichtung nur der Vorgang beim Spannungszusammenbruch oszillographiert, wie die Oszillogramme *a* und *b* der Fig. 15 zeigen. Die Schreibgeschwindigkeit in der Abszissenrichtung war bei diesen Oszillogrammen ungefähr 100mal grösser als

bei denen der Fig. 14. Das in der Fig. 15 mit *a* bezeichnete Oszillogramm veranschaulicht die Schutzwirkung des Ableiters, das mit *b* bezeichnete jene der Stabfunkenstrecke. Wie beim Begrenzen der Wanderwellen, erfolgt auch hier beim Ableiter ein verhältnismäsig langsames Absinken der Spannung, während an den Stabfunkenstrecken ein steiler Spannungszusammenbruch erfolgt, durch den die Eingangswindungen und -spulen sehr hohen dielektrischen Beanspruchungen unterworfen werden. Man kann daraus entnehmen, dass auch beim Auftreten von Überspannungen in Form von elektromagnetischen Schwingungen die Überspannungsableiter eine bessere Schutzwirkung für die Transformatoren gewähren als die Stabfunkenstrecken.

4. Schlussfolgerungen

Für Wanderwellen mit steiler Front sind die Ansprechspannungen der untersuchten Ableiter bedeutend kleiner als die der Stabfunkenstrecken. Es zeigen sich erhebliche Unterschiede im Verhalten von zwei untersuchten Ableitertypen, indem die neuere Bauart eine wesentlich kleinere Abhängigkeit der Ansprechspannung von der Frontsteilheit der auftreffenden Stosswelle aufweist.

Beim Ansprechen der Stabfunkenstrecken werden die Eingangswindungen und -spulen durch die sehr steile Entladewelle dielektrisch ausserordentlich stark beansprucht, wobei die Beanspruchung wesentlich grösser ist als beim Spannungsanstieg. Demgegenüber bewirken die Überspannungsableiter ein verhältnismässig langsames Absinken der Spannung und verursachen daher in der Transformatorwicklung keine zusätzlichen Beanspruchungen. Die gemachten Untersuchungen zeigen also, dass die Überspannungsableiter in Parallelschaltung mit Transformatoren für diese einen bedeutend besseren Schutz gewähren als Stabfunkenstrecken.

Literatur

[1] *Strigel, R.:* Elektrische Stossfestigkeit. Berlin, Springer 1939; S. 18, 19, 239...247.

[2] *Aeschlimann, H.:* Recherches concernant la coordination de l'isolement dans les installations à haute tension. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1948, t. III, rapport n° 405, p. 1...13.

[3] *Lewis, W. W.:* The protection of transmission systems against ligthning. New York, Wiley 1950; p. 274, 322...325.

[4] *Amsler, J.* und *L. Regez:* Beeinflussung der Ansprechspannung von Überspannungsableitern moderner Bauart durch Beregnung und Verschmutzung. Bull. SEV Bd. 43 (1952), Nr. 8, S. 311...316.

Adresse der Autoren:

Dr. *H. Aeschlimann*, Ingenieur, Sécheron S. A., Genève.
Dr. sc. nat. *J. Amsler*, Sprecher & Schuh A.-G., Aarau.

Erfahrungen mit Statorwicklungen von Hochspannungsgeneratoren im Kraftwerk Bannwil der Bernischen Kraftwerke A.-G.

Von *R. Frey*, Bern

621.313.322

Es wird über den Zustand von Statorwicklungen nach 40jährigen Dauerbetrieb berichtet. Es handelt sich um 2 von der Maschinenfabrik Oerlikon gelieferte Dreiphasengeneratoren von je 2300 kVA, 11 000 V, welche 1912 im Kraftwerk Bannwil in Betrieb gesetzt worden sind.

Rapport sur l'état de l'enroulement statorique après une période de service continu de 40 ans. Il s'agit de deux générateurs triphasés, de 2300 kVA, 11 000 V, qui ont été livrés à l'usine de Bannwil par les Ateliers de Construction Oerlikon et mis en service en 1912.

Im Jahre 1912 wurden durch einen Brandausbruch im Kraftwerk Bannwil zwei von total sieben installierten Generatoren so zerstört, dass dieselben nicht mehr repariert werden konnten. Die Generatoren wiesen eine Leistung von 1700 kVA auf und eine Nennspannung von 11 000 V.

Die damalige Geschäftsleitung beschloss, die beiden defekten Generatoren zu ersetzen und gleichzeitig die Scheinleistungen zu erhöhen. Die Generatoren mit horizontaler Welle wurden für folgende Daten durch die Maschinenfabrik Oerlikon konstruiert und geliefert:

Nennleistung	2300 kVA
Nennspannung	11 000 V
Anzahl Statorspulen	120
Drehzahl	1500 U./min

Die Inbetriebsetzung erfolgte 1912.

Das Kraftwerk Bannwil ist ein Niederdrucklaufwerk; für die Ausbauleistung wurde auf eine Wassermenge abgestellt, welche während des ganzen Jahres zur Verfügung steht. Die Maschinengruppen stehen somit in ununterbrochenem Vollastbetrieb. Eine kurzzeitige Ausserbetriebsetzung erfolgt nur zur Durchführung der nötigen Kontrollen und Revisionen.

An das Kraftwerk Bannwil ist ein ausgedehntes 11-kV-Hochspannungsnetz angeschlossen, und die Generatoren sind ohne Schutztransformatoren auf die 11-kV-Leitungen geschaltet. Die Wicklungen waren somit allen atmosphärischen und sonstigen Überspannungen direkt ausgesetzt, weil Überspannungsableiter erst vor Jahresfrist eingebaut worden sind. Da im Verlaufe des Sommers 1952 das Kraftwerk Bannwil während längerer Zeit zufolge Arbeiten im Oberwasserkanal ausser Betrieb war, wurden auch alle übrigen mechanischen und elektrischen Einrichtungen eingehend revidiert.

Um sich ein Bild über den Zustand der Spulen der Statorwicklungen machen zu können, wurde eine Anzahl nächst den Klemmen liegende Spulen ausgebaut, geöffnet und diversen Prüfungen unterzogen. Die Isolation der Spule, konstruiert im Jahre 1912, ist wie folgt ausgeführt: Über jeden der 14 Kupferleiter mit den Dimensionen $3 \times 12{,}5$ mm wurde ein U-förmiger Mikanitkanal von 0,6 mm Stärke geschoben. Hierauf wurde die Spule einmal mit Band umwickelt, in Schellack getränkt und gepresst. Nach dem Trocknen des Schellackes erfolgt im geraden Teil der Spule eine maschinelle Umpressung mit einem Mikakanal von 4 mm Stärke. Der Kopf wurde mit Baumwoll- und Lackband ca. 2 mm