**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 30 (1939)

**Heft:** 13

**Artikel:** II. Teil. Die wiederkehrende Spannung bei Abschaltungen mit Hochspannungsschaltern

**Autor:** Wanger, W.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-1060831

**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**

tudes, si l'on songe aux nécessités impérieuses de l'exploitation.

Dans ce rapide exposé, bien incomplet d'ailleurs, j'ai essayé de vous montrer toute la complexité du problème de l'interrupteur; j'espère cependant vous avoir fait entrevoir aussi la beauté et la grandeur de cette lutte de l'ingénieur avec l'Energie, et les satisfactions intellectuelles de haute classe qu'il éprouve chaque fois qu'il réussit à arracher à la Nature un de ses secrets.

Der **Vorsitzende** dankt Herrn Professor Juillard herzlich für das kurze, prägnante Referat, das in übersichtlicher Form die Grundlagen der Schaltertechnik in Erinnerung rief und das Wesentliche betonte.

# II. Teil.

# Die wiederkehrende Spannung bei Abschaltungen mit Hochspannungsschaltern.

Referat, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 26. November 1938 in Bern,
von *W. Wanger*, Baden.

621.316.5.064.31

*Die Methoden der Berechnung und der kurzschlusslosen Messung der wiederkehrenden Spannung werden mitgeteilt. Es wird auf die Abhängigkeit der Eigenfrequenzen von den Netzeigenschaften und der Anschlußstelle des Schalters eingegangen. Dann wird der Einfluss des Schalters auf die wiederkehrende Spannung behandelt. Zum Schluss werden die Abschaltversuche in den Schalterprüfanlagen betrachtet, besonders auch der Fall, in dem die Abschaltleistung des Schalters die ausnützbare Kurzschlussleistung der Prüfanlage übersteigt.*

*L'auteur expose les méthodes de calcul de la tension de rétablissement et sa mesure sans l'aide d'un court-circuit. Il étudie ensuite comment les fréquences propres dépendent des propriétés du réseau et de l'endroit où l'interrupteur est inséré. Il traite également de l'influence de l'interrupteur sur la tension de rétablissement. Finalement il donne quelques considérations sur les essais de coupure en plateforme, en particulier sur le cas où la puissance de coupure de l'interrupteur est supérieure à la puissance disponible en court-circuit dans l'installation d'essai.*

## 1. Einleitung.

Von den zahlreichen Problemen, die sich bei der Konstruktion, der Prüfung und dem Betrieb von Hochspannungsschaltern stellen, möchte ich hier nur ein einziges herausgreifen: die wiederkehrende Spannung. Die damit zusammenhängenden Fragen sind wahrscheinlich noch am wenigsten abgeklärt

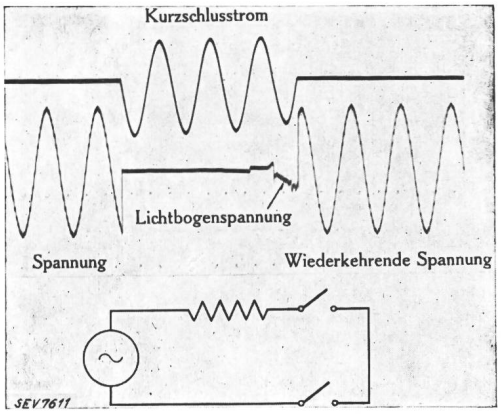



Fig. 1.
Schleifenoszillogramm einer Kurzschlussabschaltung.

und vielleicht auch am schwersten zu verstehen, so dass es sich rechtfertigt, sie in einem besonderen Vortrag zu Beginn der heutigen Tagung zu behandeln.

Fig. 1 zeigt das Schleifenoszillogramm einer Kurzschlussabschaltung. Infolge des Kurzschlusses bricht die Spannung an den Schalterklemmen auf null zusammen. Sobald sich die Kontakte trennen, erscheint an den Schalterklemmen die Lichtbogenspannung. Nach der endgültigen Unterbrechung des Kurzschlußstromes stellt sich wieder die volle Netzspannung ein. Dieser Teil der Spannungskurve heisst die wiederkehrende Spannung. Sie ist neben dem unterbrochenen Strom in erster Linie massgebend für die Beanspruchung des Schalters.

Die wiederkehrende Spannung hat vor einigen Jahren Anlass zu vielen Diskussionen gegeben. Ich erinnere nur an die Frage, welche wiederkehrende Spannung gewählt werden soll, wenn Dreiphasenschalter einphasig geprüft werden. Alle diese Streitfragen sind aber durch die Schalterregeln der CEI [1]) geregelt worden, so dass der niederfrequente Teil der wiederkehrenden Spannung, der auf einem Schleifenoszillogramm sichtbar ist, heute vollständig abgeklärt erscheint.

Ich will mich daher mit dieser Seite der Aufgabe gar nicht befassen, sondern nur die hochfrequenten Vorgänge behandeln. Im Moment, wo der Kurzschlußstrom unterbrochen wird, scheint die Spannung plötzlich vom kleinen negativen Wert der Lichtbogenspannung auf ungefähr den Scheitelwert der wiederkehrenden Spannung anzusteigen. Eine *plötzliche* Spannungsänderung ist aber infolge der immer vorhandenen Kapazitäten nicht möglich. Die Aenderung erfolgt tatsächlich durch eine hochfrequente Schwingung, die jedoch auf dem Schleifenoszillogramm nicht sichtbar ist.

Die Schwingung kann dagegen mit dem Kathodenstrahloszillographen aufgenommen werden, wie Fig. 2 zeigt. Dieses Bild stellt einen kleinen Ausschnitt aus dem vorhergehenden Bild dar, jedoch in sehr grossem Zeitmaßstab. Der scheinbar plötzliche Spannungsanstieg ist im zweiten Bild so aus-

[1]) Fascicule 56 de la CEI.

einandergezogen, dass man deutlich die Schwingung sieht. Die Frequenz dieser Schwingung ist nichts anderes als die Eigenfrequenz des Kreises, der aus Induktivität und Kapazität der Anlage gebildet wird. Da die Kapazität relativ klein ist, so ist diese Eigenfrequenz im allgemeinen ziemlich hoch.

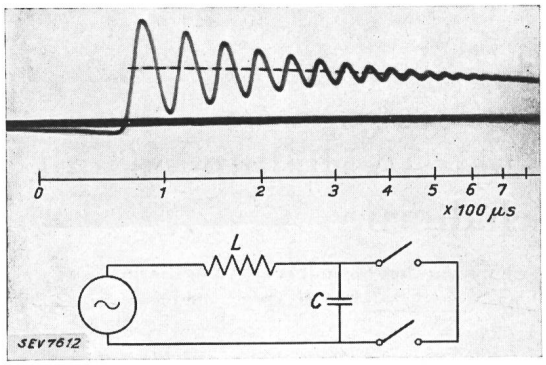



Fig. 2.
Kathodenstrahloszillogramm der wiederkehrenden Spannung und Schema des Schwingungskreises.
$f_0 = 25$ kHz.

Es ist nun ohne weiteres klar, dass für die Beanspruchung des Schalters gar nicht der auf dem Schleifenoszillogramm ersichtliche Teil der wiederkehrenden Spannung massgebend ist, sondern nur die hochfrequente Schwingung. Dabei ist es vor allem wichtig, wie rasch die Spannung auf ihren ersten Scheitelwert ansteigt, weil nach der Unterbrechung des Stromes eine gewisse Zeit verstreicht, bis sich zwischen den geöffneten Schalterkontakten eine genügende Isolationsfestigkeit ausgebildet hat. Je grösser die Eigenfrequenz ist, um so rascher erfolgt der Spannungsanstieg, um so grösser ist im allgemeinen die Gefahr einer Rückzündung und somit die Beanspruchung des Schalters.

Der Verlauf der hochfrequenten Schwingung hängt nicht nur von den Konstanten des Netzes, an dem der Schalter angeschlossen ist, ab, sondern auch vom Schalter selber. Ein Schalter, der den Verlauf des Stromes bis zum natürlichen Nulldurchgang gar nicht beeinflusst und nach dem Erreichen des Wertes Null einen unendlich grossen Widerstand darstellt, soll ein «idealer» Schalter genannt werden. Wirkliche Schalter weichen von diesem Idealzustand ab, indem sie vor dem Stromnulldurchgang eine Lichtbogenspannung erzeugen und dadurch den Stromverlauf beeinflussen, nach dem Nulldurchgang noch eine gewisse Leitfähigkeit zwischen den Kontakten besitzen und dadurch die Schwingung der wiederkehrenden Spannung dämpfen. Zunächst (in den folgenden 3 Abschnitten) soll nun der Verlauf der wiederkehrenden Spannung betrachtet werden, wie er durch das Netz allein verursacht wird, d. h. wie er sich bei Verwendung eines idealen Schalters ausbilden würde. Erst nachher soll auch der Einfluss des Schalters berücksichtigt werden.

## 2. Die Berechnung der wiederkehrenden Spannung.

Wenn der Kreis, an den der Schalter angeschlossen ist, nur *eine* Induktivität und *eine* Kapazität enthält wie im Schema Fig. 2, so gibt es eine einzige Eigenfrequenz, und die Berechnung der in Fig. 2 dargestellten wiederkehrenden Spannung ist äusserst einfach. Enthält der Kreis 2 Induktivitäten und 2 Kapazitäten wie im Schema von Fig. 3, so hat er 2 Eigenfrequenzen. Auch in diesem Fall lassen

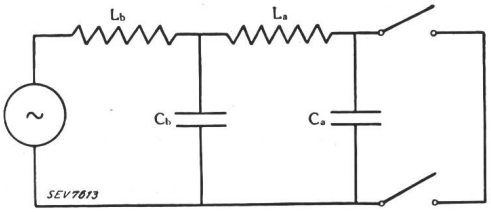



Fig. 3.
Schwingungskreis mit 2 Eigenfrequenzen.

sich die Eigenfrequenzen mit den zugehörigen Amplituden noch leicht berechnen [2]). Fig. 4 zeigt im rechten Teil, wie die beiden berechneten Teilschwingungen zur resultierenden Schwingung zusammengesetzt werden. Links davon ist das zugehörige Kathodenstrahloszillogramm zu sehen.

Enthält der Kreis mehr als 2 Induktivitäten und Kapazitäten, so wird die genaue Berechnung der wiederkehrenden Spannung recht kompliziert, so dass sie für den praktischen Gebrauch nicht verwendbar ist. Die verschiedenen Eigenfrequenzen, die in diesem Fall vorkommen, haben aber zum Teil so kleine Amplituden, dass sie für die Schalterbeanspruchung praktisch nicht in Betracht kommen. Die Erfahrung hat gezeigt, dass es im allge-

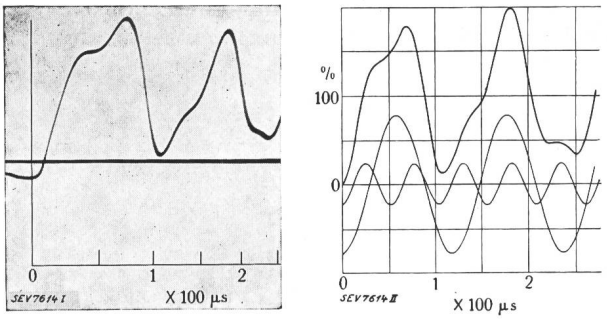



Fig. 4.
Wiederkehrende Spannung mit 2 Eigenfrequenzen.
Links: Kathodenstrahloszillogramm.
Rechts: Zusammensetzen der resultierenden Schwingung aus den beiden Teilschwingungen.

meinen genügt, nur 2 Eigenfrequenzen — diejenigen mit den grössten Amplituden — zu berücksichtigen. Das heisst aber, dass man für die Berechnung der wiederkehrenden Spannung das Netz durch naheliegende Vereinfachungen auf ein Schema mit nur 2 Induktivitäten und Kapazitäten (vgl. Fig. 3) zurückführen kann. Damit wird die Berechnung mit einer für die Praxis ausreichenden Genauigkeit ziemlich einfach.

Man hört häufig den Einwand, der Verlauf der wiederkehrenden Spannung lasse sich deswegen

[2]) Siehe Wanger und Brown: Die Berechnung der wiederkehrenden Spannung nach Kurzschlussabschaltungen. Brown-Boveri-Mitteilungen. Nov. 1937, S. 283.

nicht berechnen, weil die Induktivitäten oder Kapazitäten der Netze nicht bekannt seien. Diese Behauptung ist aber nicht richtig. Die Schwierigkeit liegt vielmehr darin, dass die Kapazitäten der Generatoren und Transformatoren sich längs der ganzen Wicklung verteilen, so dass sich die Kapazitäten und Induktivitäten gewissermassen ineinanderschachteln (s. Fig. 5 oben). Diese Schwierigkeit lässt sich dadurch beseitigen, dass man die längs der

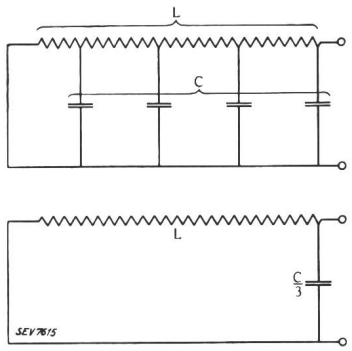



Fig. 5.
Aufstellen des Ersatzschemas für eine Wicklung mit verteilter Induktivität u. Kapazität
Oben: Wicklung.
Unten: Ersatzschema.

Wicklung verteilte Kapazität durch eine gleichwertige konzentrierte Kapazität an den Klemmen ersetzt [2]). Im einfachsten Fall, der in Fig. 5 dargestellt ist, beträgt z. B. diese Ersatzkapazität an den Klemmen 1/3 der wirklichen, längs der Wicklung verteilten Kapazität.

Eine besondere Behandlung erfordern die langen Leitungen. Hier rechnet man am besten mit den Wanderwellenvorgängen [3]). Allgemein lässt sich sagen, dass die Berechnung der wiederkehrenden Spannung in keinem Fall grundsätzliche Schwierigkeiten bietet und dass das, was für die Schalterbeanspruchung wichtig ist, sich relativ leicht berechnen lässt.

### 3. Experimentelle Bestimmung der wiederkehrenden Spannung ohne Ausführung von Kurzschlüssen.

Eine wertvolle Ergänzung zu den Berechnungsmethoden bilden die experimentellen Methoden, die eine Ermittlung der wiederkehrenden Spannung ohne Ausführung von Kurzschlüssen ermöglichen. Man kann diese Methoden mit einem Stichwort als Schwachstrom- oder Hochfrequenzmethoden bezeichnen. Bis jezt sind zwei solcher Methoden bekannt geworden.

Die erste [4]) drückt an der Stelle des Netzes, wo der Schalter angeschlossen ist, einen kleinen Strom auf, der die Stromänderung, wie sie bei der Unterbrechung eines Kurzschlusses vorkommt, in ganz kleinem Maßstab nachbildet. Dabei entsteht eine Spannung, die theoretisch der wiederkehrenden Spannung bei der Abschaltung eines Kurzschlussstromes proportional ist. Diese ganz kleine Spannung wird in einem Verstärker vergrössert und dann mit Hilfe eines Kathodenstrahloszillographen aufgenommen. Es ist klar, dass das Netz bei der Ausführung dieses Versuchs ausser Betrieb genommen werden muss.

Die zweite Methode [5]) liefert die wiederkehrende Spannung sogleich zerlegt in ihre Teilschwingungen. Selbstverständlich ist es immer möglich, die einzelnen Teilschwingungen zur resultierenden Schwingung zusammenzusetzen. Dagegen ist es infolge der Dämpfung meistens nicht möglich, die resultierende Schwingung in ihre Teilschwingungen zu zerlegen, wenn sie nicht — wie bei der betrachteten Methode — schon zerlegt geliefert wird.

Die Messung wird nun so durchgeführt, dass man an der Anschlußstelle des Schalters die Impedanz des Netzes bei verschiedenen Frequenzen misst. Aus dem Verlauf dieser Impedanz in Funktion der Frequenz lassen sich dann die einzelen Eigenfrequenzen der wiederkehrenden Spannung mit den zugehörigen Amplituden und Dämpfungskoeffizienten bestimmen. Grundsätzlich lässt sich die Messung durchführen, wenn das Netz betriebsmässig unter Spannung steht. Sehr interessant ist, dass sich mit dieser Methode auch die Kurzschlussimpedanz des Netzes bei Betriebsfrequenz ermitteln lässt, ohne dass überhaupt eine Messung bei Betriebsfrequenz ausgeführt wird.

### 4. Abhängigkeit der Eigenfrequenzen von Netzeigenschaften und Anschlußstelle des Schalters.

Man kann sich nun fragen, ob es nicht gewisse allgemeine Gesetze gibt, nach denen sich die Frequenz der wiederkehrenden Spannung ändert, je nach Art des Netzes und Anschlussort des Schalters im Netz. Tatsächlich zeigt die Erfahrung, dass die Eigenfrequenz im allgemeinen um so kleiner wird, je höher die Spannung ist. Das ist auch theoretisch verständlich; denn wenn man z. B. einen Generator oder Transformator bei gleicher Leistung für die doppelte Spannung auslegt (Serieschaltung von 2 vorher parallelen Zweigen und Verstärkung der Isolation), so reduziert sich die Kapazität um weniger als die Hälfte, während die Induktivität auf bedeutend mehr als den doppelten Wert ansteigt; die Eigenfrequenz sinkt also.

Diese Abhängigkeit von der Betriebsspannung zeigt deutlich Fig. 6, in der mein Mitarbeiter Luchsinger «Normalkurven» der Eigenfrequenz für 6- und 10-kV-Generatoren zusammengestellt hat. Diese Kurven stellen Mittelwerte für eine grosse Zahl ausgeführter Generatoren dar, einerseits für Turbogeneratoren, anderseits für extreme Langsamläufer. In beiden Fällen gelten die angegebenen Werte für den Fall, dass sich zwischen Generator und zugehörigem Schalter Schienen von ca. 40 m Länge be-

[3]) Vgl. z. B. Gosland and Whitney: Restriking Voltage Characteristics and Fault Current. World Power, May 1937, S. 160 ff.

[4]) Trencham and Wilkinson: Restriking Voltage and its Import in Circuit-Breaker Operation. Journal IEE 1937, S. 460.

[5]) Fourmarier und Brown: Die Bestimmung des Verlaufs der wiederkehrenden Spannung nach Kurzschlussabschaltungen nach einer Hochfrequenz-Resonanz-Methode. Brown-Boveri-Mittg. August 1937, S. 217.

finden. Die Eigenfrequenzen der Langsamläufer sind bedeutend niedriger als diejenigen der Turbogeneratoren; in beiden Fällen sind die Eigenfrequenzen für 10 kV kleiner als für 6 kV. Es zeigt sich auch eine gewisse Abhängigkeit von der Nenn-

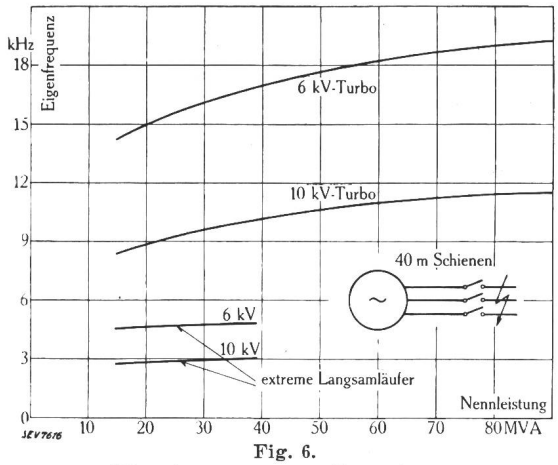



Fig. 6.
Eigenfrequenzen von Generatoren.

leistung der Generatoren, jedoch ist sie nicht sehr ausgesprochen.

Fig. 7 gibt Normalkurven der Eigenfrequenz für den Fall, wo an einen 10-kV-Generator ein Transformator angeschlossen ist und sich der Schalter hinter dem Transformator (d. h. auf der Oberspannungsseite) befindet. Auch hier zeigt sich eine ausgesprochene Abhängigkeit von der Netzspannung. Das in Fig. 7 untersuchte Schaltschema enthält eigentlich 2 verschiedene Eigenfrequenzen. Es ist aber im Bild nur eine (die tiefere) angegeben, weil die Amplitude der andern relativ klein ist, so dass

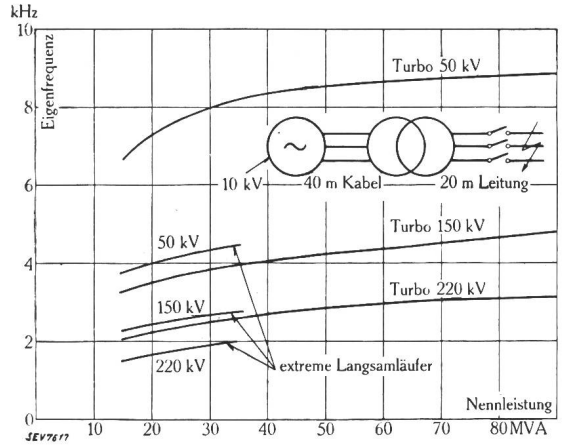



Fig. 7.
Eigenfrequenzen bei Kurzschlussabschaltungen auf der Oberspannungsseite von Kraftwerktransformatoren.

sie den Abschaltvorgang nicht wesentlich beeinflusst.

Fig. 7 gilt in erster Linie für den Transformatorschalter, der den Transformator mit der Sammelschiene verbindet. Beim Schalter einer abgehenden Leitung bleibt dagegen nach Abschaltung eines Kurzschlusses noch die Kapazität der Sammelschienen angeschlossen, und sehr häufig hängen auch noch andere Leitungen daran. Die Eigenfrequenz wird daher tiefer als in Fig. 7 angegeben.

In gleicher Weise verkleinern sich die Eigenfrequenzen, wenn man statt eines Kraftwerkschalters einen Schalter irgendwo draussen im Netz be-

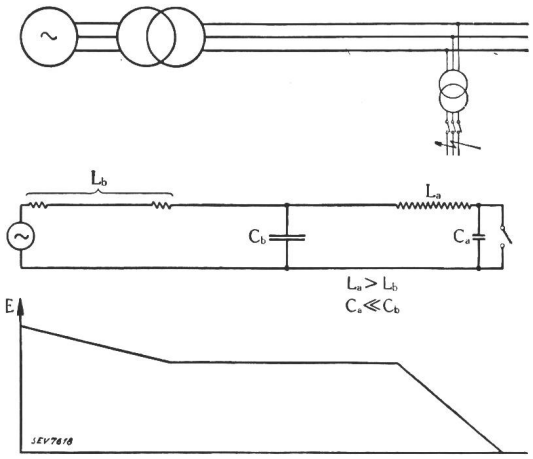



Fig. 8.
Abzweigleitung mit Transformator.
Oben: Prinzipschema.
Mitte: Ersatzschema mit den massgebenden Induktivitäten und Kapazitäten.
Unten: Spannungsverteilung während des Kurzschlusses.

trachtet. Ganz allgemein ist in einem Netz die Eigenfrequenz um so niedriger, je weiter man sich vom Kraftwerk entfernt. Jedoch gibt es eine grundsätzliche Ausnahme von dieser Regel, nämlich den Fall, wo an ein starkes Netz eine relativ schwache Abzweigleitung über Transformator

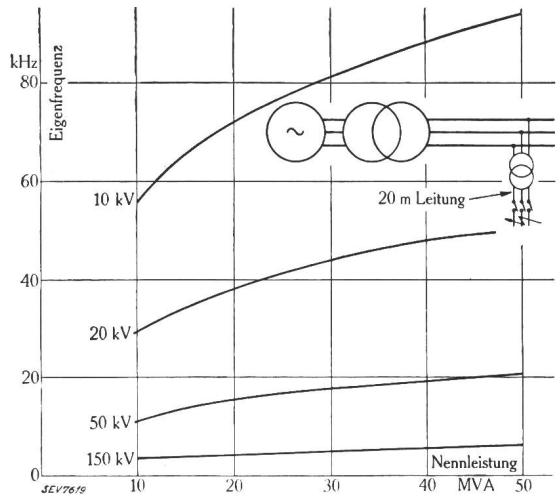



Fig 9.
Eigenfrequenzen bei Kurzschlussabschaltungen auf der Sekundärseite eines Transformators, der primärseitig an ein starkes und ausgedehntes Netz angeschlossen ist (bei verschiedenen Sekundärspannungen).

und Schalter angeschlossen ist. Hier trifft man die höchsten Eigenfrequenzen, die überhaupt vorkommen.

Fig. 8 zeigt zu oberst das Schema für diesen Fall. In der Mitte sind die massgebenden Induktivitäten und Kapazitäten ersichtlich. Dabei ist $L_a > L_b$ und $C_a \ll C_b$. Das Diagramm zu unterst zeigt den Verlauf des Spannungsabfalls während des Kurz-

schlusses. Der grössere Teil des Spannungsabfalls liegt an der Kurzschlussinduktivität des Abzweigtransformators ($L_a$) und nur der kleinere Teil an den Induktivitäten der Generatoren und Kraftwerktransformatoren ($L_b$). Nach Unterbrechung des Kurzschlusses schwingt sich der Spannungsabfall längs $L_b$ mit der niedrigen Eigenfrequenz des Kreises $L_b$, $C_b$ aus, der Spannungsabfall längs $L_a$ mit der hohen Eigenfrequenz des Kreises $L_a$, $C_a$, wobei $C_b$ wie ein Kurzschluss wirkt. Es entsteht also nicht einfach eine einzige Eigenschwingung sehr hoher Frequenz, aber es kann in ungünstigen Fällen der grösste Teil der Spannungsamplitude auf die Schwingung der hohen Frequenz entfallen. Fig. 9 gibt für den Fall des relativ schwachen Abzweiges Normalkurven, wobei nur die hohe Eigenfrequenz aufgetragen ist.

Aehnlich wie beim Abzweig mit Transformator liegen die Verhältnisse, wenn in einen Abzweig Drosselspulen eingebaut werden, um die Kurzschlussleistung zu begrenzen. Da die Eigenfrequenz der wiederkehrenden Spannung am Abzweigschalter bei Verwendung von Drosselspulen bedeutend höher sein kann als ohne Spulen, so ist beim Einbau solcher Drosselspulen äusserste Vorsicht am Platze.

## 5. Der Einfluss des Schalters auf den Verlauf der wiederkehrenden Spannung.

Es soll nun die Frage untersucht werden, wie die verschiedenen Schaltertypen den Verlauf der wiederkehrenden Spannung beeinflussen. Ich werde das am besten an Hand einiger typischer Kathodenoszillogramme zeigen können.

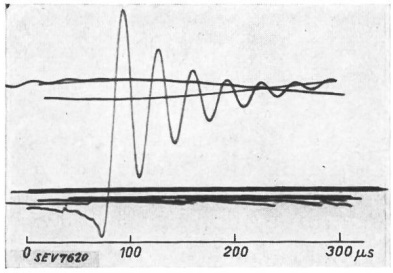



Fig. 10. Wiederkehrende Spannung nach einer Kurzschlussabschaltung mit einem Druckluftschnellschalter. Kathodenstrahloszillogramm, aufgenommen bei 3,4 kA und 7,0 kV (Eff. Wert).

Zunächst gibt Fig. 10 die wiederkehrende Spannung nach einer Kurzschlussabschaltung mit einem Druckluftschnellschalter wieder. Die hochfrequente Schwingung ist gut ausgeprägt; die Rückwirkung des Schalters auf den Spannungsverlauf ist sehr gering. Fig. 11 zeigt eine Schaltung unter genau gleichen Bedingungen, jedoch mit einem Druckluftschnellschalter, der mit Dämpfungswiderstand ausgerüstet war. Die hochfrequente Schwingung ist hier vollständig weggedämpft, und der Spannungsanstieg erfolgt sehr langsam [6]).

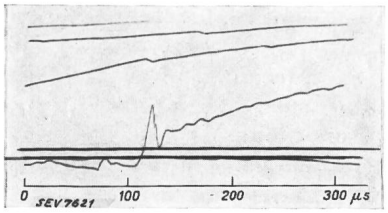



Fig. 11. Wiederkehrende Spannung nach einer Kurzschlussabschaltung mit einem Druckluftschnellschalter mit Dämpfungswiderstand, bei gleichen Daten wie Fig. 10 aufgenommen.

Fig. 12 zeigt die wiederkehrende Spannung für eine Kurzschlussabschaltung mit einem Oelschalter, wiederum unter den gleichen Bedingungen wie bei den vorigen Versuchen. Im obern Teil ist eine Rückzündung, im untern Teil die endgültige Löschung dargestellt. Auch hier ist der Spannungsverlauf vollständig aperiodisch. Interessant ist, dass die Rückzündung (d. h. der Zusammenbruch der wiederkehrenden Spannung auf den Wert der Lichtbogenspannung) nicht sofort nach Erreichen des Scheitelwertes eintrat, sondern erst etwa 200 µs später. In einem solchen Fall ist es natürlich ziemlich nebensächlich, wie rasch der erste Spannungsanstieg erfolgt.

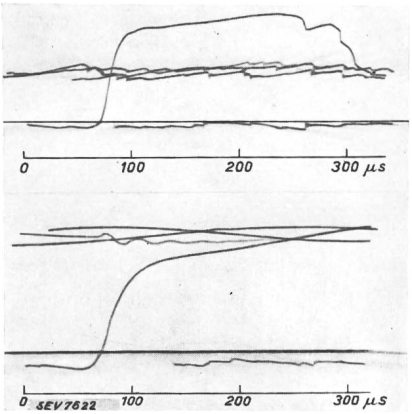



Fig. 12. Wiederkehrende Spannung nach einer Kurzschlussabschaltung mit Oelschalter, ebenfalls bei gleichen Daten wie Fig. 10 aufgenommen.

Oben: Rückzündung nach ca. 200 µs.
Unten: Endgültige Löschung.

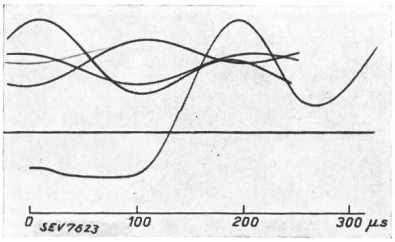



Fig. 13. Wiederkehrende Spannung nach einer Kurzschlussabschaltung mit Oelschalter, aufgenommen bei 5,8 kA, 8,9 kV (Eff.Wert) und ca. 5 kHz.

Um den Eindruck zu vermeiden, die wiederkehrende Spannung sei beim Oelschalter mit offener Unterbrechung immer so stark gedämpft, soll in Fig. 13 eine Kurzschlussabschaltung mit einem Oelschalter gezeigt werden, wo die wiederkehrende Spannung sehr ausgesprochene Schwingungen aufweist.

Fig. 14 bezieht sich ebenfalls auf eine Kurzschlussabschaltung mit einem Oelschalter und zeigt Spannungs- und Stromoszillogramm bei einem Stromnulldurchgang mit Rückzündung. Bemerkenswert ist hier, dass sich die Spannung ca. 150 µs vor dem endgültigen Zusammenbruch um eine Stufe verkleinert und dass der Strom durch den Schalter bereits an jener Stelle wieder einsetzt. Dies ist das einzige Kathodenstrahloszillogramm des Kurzschlußstromes, das ich zeige. Denn der Verlauf des Kurzschlußstromes ist in allen Fällen schön regel-

[6]) Diese Kathodenstrahloszillogramme sind alle so aufgezeichnet, dass der schreibende Strahl mehrmals nacheinander von links nach rechts läuft. Man hat sich also die übereinander liegenden Kurvenstücke von links nach rechts aneinandergereiht vorzustellen.

mässig, so dass man auf den meisten Kathodenoszillogrammen nicht mehr sieht als auf den zugehörigen Schleifenoszillogrammen. Erst beim Schalten kleiner Ströme wird der Stromverlauf interessant.

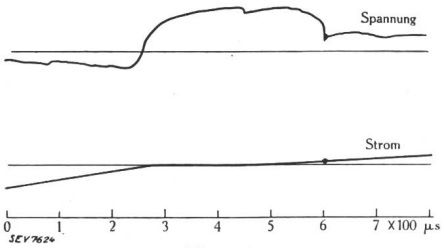



Fig. 14.
Abschaltversuch mit einem Oelschalter, bei gleichen Daten wie Fig. 10 aufgenommen.
Strom- und Spannungsverlauf bei einem Stromnulldurchgang mit Rückzündung, mit Kathodenstrahloszillograph gemessen.

Zwei Kurzschlussabschaltungen mit Wasserschalter sind in Fig. 15 zu sehen. Das obere Oszillogramm zeigt eine Rückzündung mit stufenweisem Spannungszusammenbruch, ähnlich wie beim Oelschalter. Beim untern Oszillogramm ist der Spannungsverlauf ganz anders, obschon die Abschaltung unter genau gleichen Bedingungen durchgeführt wurde.

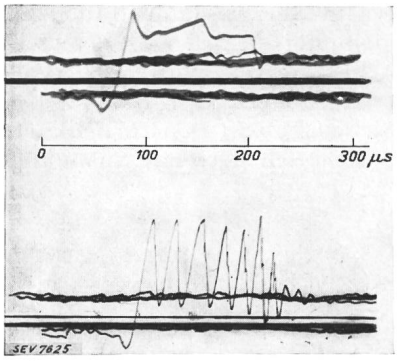



Fig. 15.
2 Kathodenstrahloszillogramme einer Kurzschlussabschaltung mit Wasserschalter bei 2,7 kA, 6,3 kV (Eff. Wert) und 16,5 kHz.

Die Spannung bricht sehr rasch zusammen, steigt aber sofort wieder an, und dieser Vorgang wiederholt sich mehrmals, bis endlich die Spannung unten bleibt.

Fig. 16 zeigt eine dritte Möglichkeit der Rückzündung beim Wasserschalter. Im obern Oszillogramm geht die wiederkehrende Spannung ganz allmählich in die Lichtbogenspannung über, ohne dass überhaupt ein Zusammenbruch erfolgt. Die Lichtbogenspannung ist hier kurz nach der Rückzündung ungefähr so gross wie der betriebsfrequente Scheitelwert der wiederkehrenden Spannung. Interessant

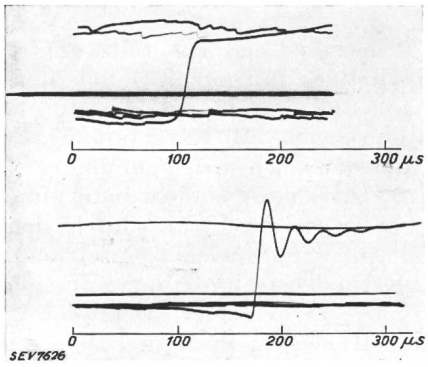



Fig. 16.
2 Kathodenstrahloszillogramme einer Kurzschlussabschaltung mit Wasserschalter, bei gleichen Daten wie Fig. 15, jedoch 38 kHz
Oben: Stetiger Uebergang der wiederkehrenden Spannung in die Lichtbogenspannung.
Unten: Definitive Löschung.

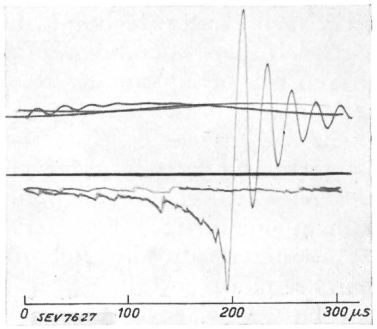



Fig. 17.
Wiederkehrende Spannung nach einer Kurzschlussabschaltung mit einem ölarmen Schalter.
Kathodenstrahloszillogramm, aufgenommen bei gleichen Daten wie Fig. 16.

ist noch, dass im obern Oszillogramm die wiederkehrende Spannung vollständig aperiodisch verläuft, während sie im untern Oszillogramm deutlich ausgeprägte Schwingungen aufweist.

Fig. 17 zeigt schliesslich eine Abschaltung mit einem ölarmen Schalter. Der Spannungsverlauf ist ähnlich wie beim Wasserschalter, jedoch hat die Lichtbogenspannung unmittelbar vor der Löschung eine ausgeprägtere Spitze.

Alle gezeigten Oszillogramme beziehen sich auf Kurzschlussabschaltungen, und überhaupt sind alle meine Ausführungen auf dieses Problem zugeschnitten. Beim Abschalten kleiner Ströme, die bei leerlaufenden Transformatoren und Leitungen vorkommen, zeigen sich Erscheinungen, die eine ganz andere Behandlung erfordern. Ich möchte jedoch hierauf nicht eintreten, weil ich mich mit Herrn Puppikofer geeinigt habe, dass er dieses Gebiet behandelt.

## 6. Die Abschaltversuche in den Schalterprüfanlagen.

Bis jetzt war von der wiederkehrenden Spannung in Netzen die Rede. Nun sollen noch die Abschaltversuche in Schalterprüfanlagen betrachtet werden. In den Schalterregeln der CEI sind die meisten Bedingungen für die Durchführung solcher Versuche festgelegt. Jedoch fehlt noch eine Vorschrift über die Eigenfrequenz der wiederkehrenden Spannung. Nachdem nun dieses Gebiet in den letzten Jahren eingehend studiert wurde, ist in nächster Zeit mit der Aufstellung einer solchen Vorschrift zu rechnen.

Ebenso wichtig wie die Eigenfrequenz der wiederkehrenden Spannung ist eine andere Grösse, der m. E. bisher zu wenig Beachtung geschenkt wurde: der Scheitelwert der Hochfrequenzschwingung. Im «idealen» Fall beträgt dieser Scheitelwert 200 % der betriebsfrequenten Amplitude der wiederkehrenden Spannung. Tatsächlich zeigt er aber eine ausserordentlich grosse Streuung. Bei kathodenoszillographischen Messungen haben wir sehr viele Werte in der Grössenordnung von 140 % und darunter festgestellt. Anderseits wurden aber auch — je nach Schalterart — Werte bis zu 200 % hinauf und in einzelnen Fällen sogar darüber gemessen. Die Angabe der betriebsfrequenten wiederkehrenden Spannung genügt also nicht, wenn man nicht gleichzeitig angibt, wieviel die hochfrequente Spannung überschwingt.

Auch wenn man die Steilheit des Spannungsanstiegs (vgl. Fig. 18) angibt, wie das in der englischen und amerikanischen Literatur üblich ist, so muss trotzdem noch der Scheitelwert genannt werden. Im übrigen muss bei der Bestimmung der Steilheit berücksichtigt werden, dass der Strom nicht unbedingt in dem Moment zu Null wird, wo

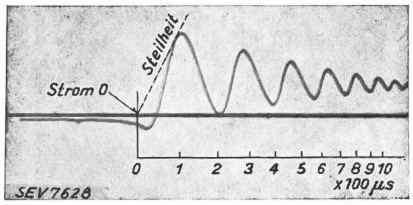



Fig. 18.
Steilheit beim Einschwingen der wiederkehrenden Spannung mit einer einzigen Eigenfrequenz.

die Spannung den grössten negativen Wert hat. Für den Fall von Fig. 18 geht z. B. aus dem zugehörigen Kathodenoszillogramm des Stromes hervor, dass der Strom schon wesentlich vorher den Wert Null erreicht hat. Wenn man schon die Steilheit des Anstiegs durch eine gerade Linie charakterisieren will, so scheint mir eine Definition, wie sie aus Fig. 18 ersichtlich ist, am zweckmässigsten.

Falls die wiederkehrende Spannung eine zusammengesetzte Schwingung aufweist wie in Fig. 19, so ist es sehr schwierig, die Steilheit des Anstiegs richtig zu definieren. Je nach dem Schaltertyp und nach andern Umständen kann die erste oder zweite Spitze der wiederkehrenden Spannung den Schalter schärfer beanspruchen, so dass die Steilheit des

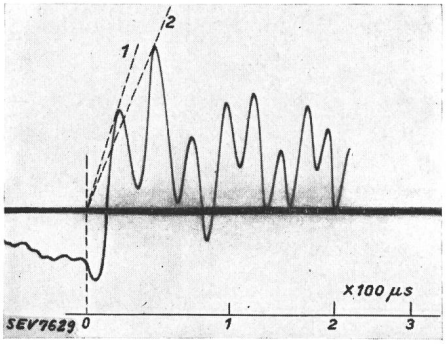



Fig. 19.
Steilheit für einen zusammengesetzten Schwingungsverlauf der wiederkehrenden Spannung.
1. bei Berücksichtigung des ersten Scheitelwertes.
2. bei Berücksichtigung des zweiten Scheitelwertes.

Spannungsanstiegs im einen Fall durch die Gerade 1, im andern Fall durch die Gerade 2 definiert werden müsste. Es wird also wohl am zweckmässigsten sein, wenn man sich bei Schalterprüfungen bemüht, einen einfachen Verlauf der wiederkehrenden Spannung wie in Fig. 18 zu erreichen.

Eine schwierige Frage ist die, wie der Einfluss des Schalters auf den Verlauf der wiederkehrenden Spannung zu bewerten ist. Wir haben gesehen, dass gewisse Schaltertypen den Verlauf der wiederkehrenden Spannung vollständig verändern. Wenn aber z. B. ein Schalter die Schwingung der wiederkehrenden Spannung dämpft und sich dadurch seine Aufgabe erleichtert, so hat er deswegen nicht weniger geleistet als ein anderer Schalter, der die Schwingung nicht dämpft. Um die Schärfe der Abschaltbedingungen zu kennzeichnen, sollte man daher den Verlauf der wiederkehrenden Spannung so angeben, wie er durch das Netz allein bedingt ist, d. h. so wie man ihn bei Abschaltung mit einem «idealen» Schalter erhält.

Da jedoch ein wirklich «idealer» Schalter nicht existiert, kann man diesen Verlauf der wiederkehrenden Spannung — abgesehen von der Berechnung — nur mit den oben beschriebenen Schwachstrommethoden bestimmen. Es scheint mir aber doch zu gewagt, mittels einer Messung bei einer Spannung von einigen Millivolt oder bestenfalls einigen Volt auf das Verhalten des Netzes bei einer Spannung von vielen Kilovolt schliessen zu wollen. Da würde ich schon vorziehen, ein Kathodenoszillogramm aufzunehmen, bei einer richtigen Leistungsabschaltung mit einem Schalter, der den Schwingungsverlauf der wiederkehrenden Spannung möglichst wenig beeinflusst. Am besten scheint sich zu diesem Zweck der Druckluftschalter ohne Widerstände zu eignen.

## 7. Die Prüfung von Schaltern, deren Abschaltleistung die ausnützbare Kurzschlußleistung der Prüfanlage übersteigt.

Wenn man schon bei normalen Versuchen in Schalterprüfanlagen auf verschiedene Fragen stösst, die heute noch nicht restlos abgeklärt sind, so wird das Problem noch wesentlich schwieriger, wenn Schalter geprüft werden sollen, deren Abschaltleistung grösser ist als die ausnützbare Kurzschlussleistung der Prüfanlage. Hauptsächlich von englischer Seite wird vorgeschlagen, in diesem Fall einen Versuch mit vollem Strom und reduzierter Spannung und einen solchen mit voller Spannung und reduziertem Strom durchzuführen. Eine derartige Prüfung kann wohl dem Konstrukteur einen gewissen Aufschluss über seinen Schalter geben, aber es ist ohne weiteres klar, dass sie als Abnahmeprüfung niemals ein richtiger Ersatz für einen Versuch ist, bei dem voller Strom und volle Spannung gleichzeitig auf den Schalter einwirken.

Eine andere Methode besteht darin, dass man aus der Prüfanlage vollen Strom und reduzierte Spannung bezieht, aber nach Unterbrechung des Stromes von einer besondern Quelle kleiner Leistung eine Zusatzspannung auf den Schalter leitet, damit er mit der vollen wiederkehrenden Spannung beansprucht wird. Die Zusatzspannung kann z. B. von einem Stossgenerator, d. h. von einer Kapazität geliefert werden, die auf den Schalter entladen wird [7]). In diesem Fall hat die betriebsfrequente wiederkehrende Spannung natürlich nicht den vollen Wert; nur die hochfrequente Schwingung erreicht den vollen Ausschlag. In den ersten Veröffentlichungen war vorgesehen, nur eine ganz kurze Spannungsspitze mit sehr steilem Anstieg zu erzeugen, entsprechend dem gestrichelten Verlauf in

[7]) Vgl. z. B. E. Marx: Eine Ersatzschaltung für die Prüfung von Hochleistungsventilen und Hochleistungsschaltern. ETZ 1936, S. 583, ferner die Promotionsarbeit von H. Verse: Eine Ersatzprüfschaltung für Lichtbogenlöscheinrichtungen. Braunschweig 1936. Später haben sich auch die Italiener E. Pugno-Vanoni, G. Someda und G. Carli sowie F. Kesselring und W. Kaufmann von SSW mit dem Problem der indirekten Schalterprüfungen befasst.

Fig. 20. Durch zweckmässige Auslegung des Stossgenerators kann aber auch ein Spannungsverlauf erzeugt werden, der den Verlauf beim normalen Versuch sehr gut nachbildet, wie die ausgezogene Linie im Kathodenstrahloszillogramm von Fig. 20 zeigt.

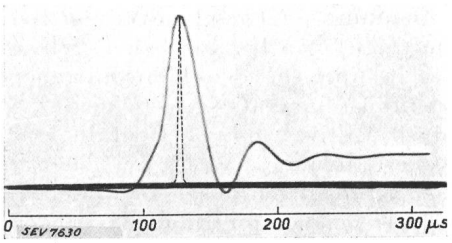
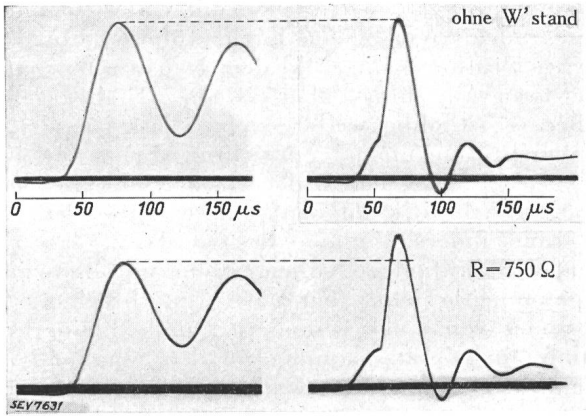



Fig. 20.
Stoßspannug bei indirekter Schalterprüfung.
Kathodenstrahloszillogramm eines indirekten Versuchs bei möglichst guter Nachahmung des Spannungsverlaufs beim normalen Versuch und (gestrichelt eingetragen) kurze Spannungsspitze mit sehr steilem Anstieg.

Die richtige Kurvenform der wiederkehrenden Spannung genügt aber allein noch nicht. Da die verschiedenen Schaltertypen den Verlauf der wiederkehrenden Spannung mehr oder weniger beeinflussen, so ist anzustreben, dass dieser Einfluss beim «indirekten» Versuch mit Spannungsstoss gleich ist wie beim «direkten», d. h. normalen Versuch. Dass dies nicht ohne weiteres der Fall ist, zeigt Fig. 21, wo zunächst (oben in der Fig.) mit einem Druckluftschalter ein direkter und indirekter Versuch bei gleich grosser wiederkehrender Spannung durchgeführt wurde. Als dann ein Widerstand von




direkt indirekt

Fig. 21.
Rückwirkung des Schalters auf den Spannungsverlauf beim normalen und beim indirekten Versuch.
Oben: Direkter und indirekter Versuch mit einem Druckluftschalter bei gleich grosser wiederkehrender Spannung (ca. 30 kV Eff. Wert) und 7 kA Abschaltstrom.
Unten: Der gleiche Versuch, wobei parallel zum Schalter ein Widerstand von 750 Ohm angeschlossen wurde, um den dämpfenden Einfluss gewisser anderer Schalter nachzuahmen.

750 Ohm parallel zum Schalter angeschlossen wurde, um den dämpfenden Einfluss gewisser anderer Schaltertypen nachzuahmen, wurde die wiederkehrende Spannung beim direkten und indirekten Versuch ganz verschiedenartig beeinflusst.

Will man den direkten Versuch durch einen indirekten auch in den sehr wichtigen Einzelheiten richtig nachbilden, so benötigt man Stossgeneratoren beträchtlicher Leistung. Ferner braucht man Sperrkreise, die die hohe Stoßspannung vom Leistungstransformator und Generator fernhalten. Eine brauchbare Einrichtung für indirekte Versuche ist daher gar nicht so billig, wenn sie auch selbstver-

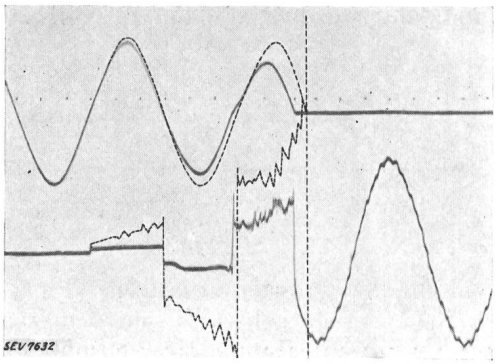



Fig. 22.
Schleifenoszillogramm eines Abschaltversuchs mit einem Wasserschalter bei Reduktion der treibenden Spannung auf 1/6. Gestrichelt eingetragen: gemessener Strom- und Spannungsverlauf beim Versuch mit voller treibender Spannung (8,5 kV Eff. Wert). Abschaltstrom in beiden Fällen 5 kA.

ständlich weniger kostet als eine entsprechende Einrichtung für direkte Versuche.

Weiter ist noch zu berücksichtigen, dass bei zu geringer treibender Spannung der Strom und die Lichtbogenspannung anders verlaufen als beim direkten Versuch. Fig. 22 zeigt das Schleifenoszillogramm eines indirekten Abschaltversuches mit einem Wasserschalter, wo die treibende Spannung der Prüfanlage 1/6 der wiederkehrenden Spannung

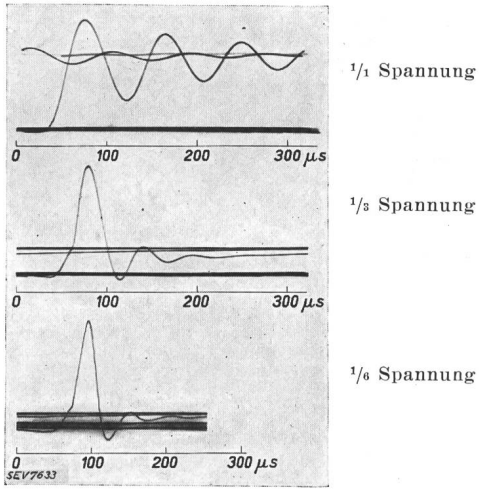



Fig. 23.
Direkter und indirekter Abschaltversuch mit einem Druckluftschalter. Abschaltstrom 7 kA, wiederkehrende Spannung 31 kV (Eff. Wert).
Oben: Direkter Versuch.
Mitte: Indirekter Versuch mit 1/3 treibender Spannung.
Unten: Indirekter Versuch mit 1/6 treibender Spannung.

beträgt. Gestrichelt ist der Verlauf des Stromes und der Lichtbogenspannung, wie er beim entsprechenden direkten Versuch aufgenommen wurde, eingetragen. Solch grosse Abweichungen wie hier sind insbesondere zu erwarten bei Schaltern mit grosser Lichtbogenspannung. Die indirekte Methode eignet sich also besser für Schalter mit kleiner Lichtbogenspannung.

Mit einem Druckluftschnellschalter, bei dem die verschiedenen Bedingungen für die Brauchbarkeit der indirekten Methode ziemlich gut erfüllt sind, wurde die Grenzleistung mittels direkter und indirekter Versuche bestimmt, im zweiten Fall bei einer treibenden Spannung von $^1/_3$ und $^1/_6$ der wiederkehrenden Spannung. Fig. 23 zeigt als Beispiel je ein Kathodenoszillogramm der 3 Prüfungen. Bei allen 3 Versuchsreihen wurde ungefähr die gleiche Grenzleistung ermittelt, jedoch war die Streuung bei den indirekten Prüfungen ausserordentlich gross.

Eine andere indirekte Methode [8]) besteht darin, dass man die Zusatzspannung von einem Transformator kleiner Leistung aber hoher Spannung bezieht. Hier wird auch der betriebsfrequente Teil der wiederkehrenden Spannung in richtiger Grösse geliefert; dagegen hat die Methode den Nachteil, dass der untersuchte Schalter 2 Unterbrechungsstellen haben muss und dass nur eine davon geprüft werden kann.

Führt man die Zusatzspannung dem Schalter über eine Funkenstrecke zu, so überlagern sich dem Anstieg der wiederkehrenden Spannung sehr unerwünschte Schwingungen, wie Fig. 24 zeigt. Lässt man die Funkenstrecke weg, so muss dafür ein Widerstand eingeschaltet werden. Man erhält auf diese Art einen sehr günstigen Verlauf der wiederkehrenden Spannung (vgl. Fig. 25), jedoch kann der Widerstand in anderer Weise die Messergebnisse fälschen.

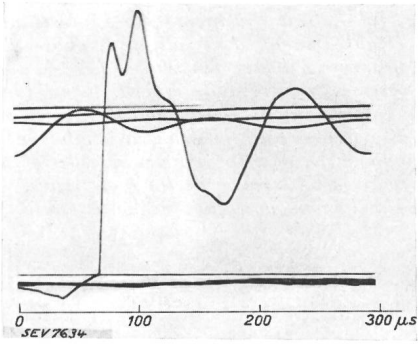



Fig. 24.
Indirekter Abschaltversuch mit Hilfstransformator, der über eine Funkenstrecke an den Schalter angschlossen ist. Kathodenstrahloszillogramm, aufgenommen mit einem Druckluftschalter bei 6 kA Abschaltstrom und 30 kV (Eff. Wert) wiederkehrender Spannung.

Auch die indirekte Methode mit Zusatztransformator wurde für einen Druckluftschalter mit der direkten Methode verglichen. Auch hier wurde noch bei einer treibenden Spannung gleich $^1/_6$ der wiederkehrenden Spannung ungefähr die gleiche Grenzleistung wie beim direkten Versuch ermittelt, aber auch hier zeigten die Messergebnisse beim indirekten Versuch eine sehr grosse Streuung.

Die indirekten Methoden eignen sich am besten für Schalter mit sehr kurzer Lichtbogendauer, wo man von vornherein weiss, in welchem Moment der Strom unterbrochen wird. Man braucht dann die Zusatzspannung nur einmal auf den Schalter zu geben. Bei Schaltern mit längerer Lichtbogendauer muss dagegen die Zusatzspannung bei jedem Nulldurchgang des Stromes bis zur endgültigen Unterbrechung auf den Schalter geleitet werden. Bei der Methode mit dem Stossgenerator bedeutet das, dass die Stosskondensatoren bei jedem Stromnulldurchgang entladen und in der äusserst kurzen Zeit von $^1/_{100}$ s wieder voll aufgeladen werden müssen [9]). Jeder, der schon mit Stossgeneratoren gearbeitet hat, kann sich leicht vorstellen, dass zur Einhaltung dieser Bedingung ein gewaltiger Materialaufwand nötig ist.

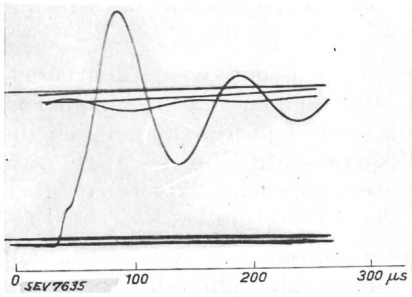



Fig. 25.
Indirekter Abschaltversuch mit Hilfstransformator, der über einen Widerstand an den Schalter angeschlossen ist. Kathodenstrahloszillogramm, aufgenommen mit einem Druckluftschalter bei 6 kA Abschaltstrom und 30 kV (Eff. Wert) wiederkehrender Spannung.

Damit auch bei Schaltern mit mehreren Halbwellen Lichtbogendauer die Zusatzspannung nur einmal auf den Schalter geleitet werden muss, hat Marx [7]) vorgeschlagen, den Schaltstift fest einzustellen und den Lichtbogen im Schalter durch einen dünnen Draht einzuleiten, der zwischen den geöffneten Schalterkontakten angebracht worden ist. Es ist aber klar, dass bei fester Kontakteinstellung der Schalter nicht in gleicher Weise beansprucht wird wie bei einem normalen Abschaltversuch. Wir haben zur Abklärung dieser Frage mit einem Wasserschalter eine Versuchsreihe von 10 Schaltungen nach dieser Methode durchgeführt und mit einer Versuchsreihe normaler Schaltungen verglichen, wobei gleiche Schaltung der Prüfanlage, gleicher Strom und gleiche wiederkehrende Spannung angewendet wurden. Um einen möglichst einwandfreien Vergleich zu haben, wurde also auch der Versuch mit Drahtzündung bei voller treibender Spannung durchgeführt. Bei den normalen Schaltungen betrug der maximale Druck 26 bis 30 kg/cm², bei den Versuchen mit Drahtzündung ca. 30 bis 80 kg/cm². Dieser ausserordentlich hohe Druck trat auf, trotzdem der Strom bei den Versuchen mit Drahtzündungen im Mittel etwa 20 % kleiner war als in der letzten Halbwelle bei den normalen Versuchen.

## 8. Zusammenfassung.

Damit ist mein Ueberblick über die aktuellen Fragen der wiederkehrenden Spannung beendet. Die sehr beschränkte Zeit, die man mir eingeräumt hat, nötigte mich leider, verschiedene Probleme, die eine ausführlichere Behandlung verdient hätten, nur kurz zu streifen. Ich hoffe, nächstens an anderer Stelle ausführlicher auf einzelne Fragen zurückkommen zu können. Hier möchte ich nur noch

[8]) Vgl. W. F. Skeats: Special Tests on Impulse Circuit Breakers. El. Eng. 1936, S. 710.

[9]) Eine entsprechende Schaltung ist beschrieben bei Biermanns: Fortschritte im Bau von Druckgasschaltern. ETZ 1938, S. 196.

zusammenfassend die wichtigsten Gedanken wiederholen:

1. Man besitzt heute das Rüstzeug, um den Schwingungsverlauf der wiederkehrenden Spannung an irgendeiner Stelle eines Netzes zu berechnen, und es existieren experimentelle Methoden, mit denen man den berechneten Schwingungsverlauf ohne Ausführung von Kurzschlüssen nachprüfen kann.

2. Die Eigenfrequenzen der wiederkehrenden Spannung sind im allgemeinen um so kleiner, je höher die Spannung ist und je weiter man sich im Netz vom Kraftwerk entfernt. Eine wichtige Ausnahme bilden relativ schwache Abzweige über Transformatoren oder Drosselspulen.

3. In den nächsten Jahren sind Regeln für den hochfrequenten Teil der wiederkehrenden Spannung bei Abschaltprüfungen zu erwarten. Dabei muss nicht nur die Eigenfrequenz oder die Steilheit der wiederkehrenden Spannung festgelegt werden, sondern auch der Scheitelwert der hochfrequenten Schwingung. Der vom Netz bedingte Schwingungsverlauf wird durch Rückwirkung des Schalters verändert. Man sollte daher die wiederkehrende Spannung bei Verwendung eines Normalschalters oszillographieren, der möglichst kleine Rückwirkung zeigt. Hiefür eignet sich m. E. am besten der Druckluftschalter (ohne Dämpfungswiderstand).

4. Es gibt sog. indirekte Prüfmethoden, die durch Einführung irgend einer Zusatzspannung die Leistungsfähigkeit von Schalterprüfanlagen künstlich erweitern. Sie sind aber kein vollwertiger Ersatz für direkte Prüfungen und kommen daher nicht in Betracht im Leistungsbereich bestehender Anlagen, sondern nur dann, wenn keine genügend grossen Prüfanlagen zur Verfügung stehen. Die indirekten Methoden eignen sich am besten für Schalter, die die wiederkehrende Spannung wenig beeinflussen und die eine sehr kurze Lichtbogendauer haben.

---

Der **Vorsitzende** verdankt das Referat Herrn Dr. Wanger bestens. Der Herr Referent hat die Frage der wiederkehrenden Spannung äusserst interessant dargestellt und am Schluss eine vortreffliche Zusammenfassung des heutigen Standes der Erkenntnis gegeben.

# Der Einfluss des Schalters auf die wiederkehrende Spannung und sein Verhalten im Netz.

Referat, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 26. November 1938 in Bern,

von *H. Puppikofer*, Zürich-Oerlikon.

621.316.5.064.31

*Anhand von Oszillogrammen wird der Verlauf des Stromes und der Spannung beim Löschen eines Lichtbogens im Schalter erklärt. Der Einfluss des Schalters auf die wiederkehrende Spannung wird definiert und anhand von Versuchen, die im Kurzschlusshaus ausgeführt wurden, erklärt. Versuche in grossen Netzen zeigen das Verhalten des Schalters im Betrieb; sie bestätigen die Theorie und die auf dem Versuchsstand gewonnenen Erfahrungen. Besonders behandelt wird das Abschalten von leerlaufenden Transformatoren und das Abschalten von Kurzschlüssen hinter langen Leitungen. Eine Zusammenfassung gibt die für die Nutzanwendung der Untersuchungen nötigen Schlussfolgerungen.*

*L'auteur explique par des oscillogrammes l'allure du courant et de la tension lors de l'extinction de l'arc dans un interrupteur. Il définit l'influence de l'interrupteur sur la tension de rétablissement et l'explique à l'aide d'essais exécutés en plateforme à haute puissance. Les essais faits dans de grands réseaux montrent de quelle façon l'interrupteur se comporte en service; ils confirment la théorie et les résultats des essais en plateforme. L'auteur étudie en particulier le déclenchement de transformateurs à vide et la coupure de courts-circuits à l'extrémité de longues lignes. Un résumé groupe les conclusions pratiques de cette étude.*

## A. Verlauf des Stromes und der Spannung beim Löschen eines Lichtbogens.

Die Erkenntnis, dass der Schalter einen wesentlichen Einfluss auf den Verlauf der wiederkehrenden Spannung ausüben kann, stammt aus der jüngsten Zeit. Erst die Benützung des Kathodenstrahloszillographen zur Zerlegung des zeitlichen Ablaufes der Vorgänge bis in die Millionstel-Sekunde gab in den letzten 5 Jahren [1]) Auskunft über den äusseren Mechanismus des Erlöschens des Lichtbogens. Was die inneren Vorgänge anbetrifft, den Energieaustausch zwischen Lichtbogen und umgebendem Medium und die eigentliche Entionisation der Schaltstrecke, d. h. die erstaunliche Fähigkeit der Bogenstrecke, sich in Zeiten von der Grössenordnung von einer Mikrosekunde von einem Leiter niederen Widerstandes in eine Isolierstrecke mit beinahe unendlich hohem Widerstande zu verwandeln, so ist noch vieles in Zusammenarbeit mit dem Physiker abzuklären.

[1]) van Sickle: Electr. Eng. Febr. 1935, S. 178: «Breaker Performance studied by Cathode Ray Oszillograms.»

Eine wesentliche Rolle spielt bei diesem Vorgange die Kapazität des Schalters und der zunächstliegenden Anlageteile.

Im Ersatzschema Fig 1 sei $C_s$ die unmittelbar an den Klemmen des Schalters konzentriert gedachte Kapazität der zunächstliegenden Anlageteile sowie des Schalters selbst. Der Stromkreis bestehe aus einem Generator $G$, der eine rein sinusförmige Spannung abgeben soll, einer Drosselspule $D$ und dem Schalter $S$. Auf der Seite des Schalters, die des Potentials der Messgeräte wegen geerdet werden muss, ist die Stromspule $OC$ des Kathodenoszillographen angedeutet. Der durch die Drosselspule $D$ fliessende Strom $i_D$ ist immer gleich der Summe vom Lichtbogenstrom $i_B$ und dem Strom $i_C$ durch die Kapazität $C_s$

$$i_D = i_B + i_C.$$

Solange nun die Lichtbogenspannung $u_B$ klein ist, bleibt auch der Kapazitätsstrom $i_C$ gegenüber dem Lichtbogenstrom $i_B$ verschwindend klein, und der gesamte durch den Generator $G$ gelieferte Strom $i_D$ folgt einer Sinuslinie. Auf dem zum bessern Ver-