

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 30 (1939)  
**Heft:** 13

**Artikel:** Der Einfluss des Schalters auf die wiederkehrende Spannung und sein Verhalten im Netz  
**Autor:** Puppikofer, H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1060832>

### **Nutzungsbedingungen**

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

### **Conditions d'utilisation**

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

### **Terms of use**

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

**Download PDF:** 16.01.2026

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

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 Schwingungs-

verlauf 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 Prüfmethode, 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 dankt 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.

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 Nutzenanwendung 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.

621.316.5.064.31

### 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 Kathodenstrahl-oszillographen zur Zerlegung des zeitlichen Ablaufes gab in den letzten 5 Jahren<sup>1)</sup> 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.

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-

<sup>1)</sup> van Sickle: Electr. Eng. Febr. 1935, S. 178: «Breaker Performance studied by Cathode Ray Oscillograms.»

ständnis leicht stilisierten Kathodenoszillogramm Fig. 2 würde der undeformierte, ideelle Strom  $i_D$  im Punkte  $O$  die Zeitaxe schneiden. Die Lichtbogen- spannung nimmt mit abnehmendem Strom hyperbelartig zu nach der Gleichung von Ayrton

$$u_B = \frac{a}{i} + b, \quad \text{wo } a = \alpha + \gamma l \\ b = \beta + \delta l$$

Die Parallelkapazität nimmt unter dieser Spannung resp. ihrer Aenderung den Strom auf

$$i_C = C_s \cdot \frac{du_B}{dt}$$

Da mit abnehmendem Strom die Lichtbogen- spannung und mit ihr der Lichtbogenwiderstand stark zunehmen, geht der Wert des Stromes  $i_B$  im

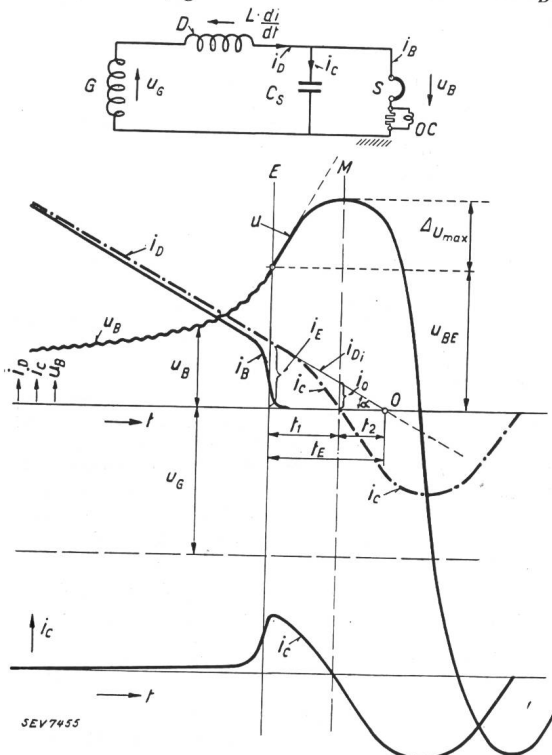


Fig. 1 (oben).

Ersatzschema eines Kurzschlusskreises.

Fig. 2 (unten).

Verlauf von Strom und Spannung bei der Abschaltung eines Wechselstromlichtbogens.

selben Masse zurück wie der Strom  $i_C$  anwächst. Schliesslich kann der Lichtbogen bei einem bestimmten Momentanwert  $i_E$  seines Stromes, d. h. bei einer bestimmten Steilheit der Spannung  $\frac{du_B}{dt}$  nicht mehr bestehen: Er erlischt und der ganze Strom  $i_D$  geht über die Kapazität  $C_s$ . Die noch vorhandene magnetische Energie der Induktivitäten des Kurzschlusskreises geht über in potentielle Energie des Parallelkondensators  $C_s$  unter Erhöhung der Spannung über die Lichtbogen- spannung  $u_{BE}$  im Löschmoment hinaus bis zum Umkehrpunkt  $M$ .

<sup>2)</sup> Kesselring u. Koppelman: Schaltproblem der Hochspannungstechnik, Arch. Elektrotechn. Bd. XXX, 2. H., 18. Febr. 1936.

<sup>3)</sup> Puppikofer: Rapport 141 Conférence des Grands Réseaux, Paris 1937.

Bei diesem, wie ein Kippvorgang vor sich gehenden Ueberwerfen <sup>1) 2) 3)</sup> des Stromes hat der Lichtbogenstrom einen ähnlichen zeitlichen Verlauf wie die Linie  $i_B$  des oberen Teiles der Fig. 2, während der Verlauf des Kapazitätsstromes  $i_C$  in der untern Kurve dargestellt ist. Der Strom  $i_D$  folgt, wenn man vom Einfluss der Lichtbogen- spannung absieht, einer 50periodigen Schwingung. Der Strom  $i_C$  hingegen schwingt mit der überlagerten Eigenfrequenz des geöffneten Stromkreises. Die Kurve des Stromes  $i_C$  schneidet die Zeitaxe zur Zeit  $t_2$  vor dem ideellen Nulldurchgang  $O$ . Der Lichtbogenstrom  $i_B$  dagegen geht um die Zeit  $t_1 + t_2 = t_E$  vorher vom Wert  $i_E$  auf Null. Zur völligen Auswertung der Versuche kann man die fehlende Zeit  $t_2$  aus dem Oszillogramm nach einer vereinfachten Methode bestimmen <sup>3)</sup>.

$$t_2 = \frac{L \cdot i_0}{u_{BE} + u_G} = \frac{2 \Delta u_{max} \cdot t_1}{3(u_{BE} + u_G)}$$

Da sich  $t_1$  und  $\Delta u_{max}$  aus den Oszillogrammen lesen lassen, kann nach diesem Verfahren die Lage des Nulldurchganges des Lichtbogenstromes in bezug auf die ursprüngliche Sinuslinie festgestellt werden.

Hier muss eine kurze Bemerkung über die Aufnahme- Technik der vorliegenden Kathodenoszillogramme eingeflochten werden. Um in der zur Verfügung stehenden Filmbreite von 128 mm doch ca. 2 Halbwellen des 50periodigen Stromes aufnehmen zu können, lässt man mit Hilfe eines von K. Berger konstruierten Zeitablenk-Relais den Strahl das Blatt mit praktisch konstanter Geschwindigkeit von beispielsweise 267 m/s von links nach rechts überschreiben. Am rechten Blattende angekommen, wird der Strahl mit so grosser Geschwindigkeit nach links zurückgeworfen, dass er nicht mehr schreiben kann. Eine Halbwelle des 50periodigen Stromes, die sonst ein Band von über 2,5 m brauchen würde, wird dadurch in 20 Stücke zerschnitten (Fig. 3), die auf demselben Blatt geschrieben werden und durch Aneinanderreihen wieder den vollständigen Linienzug ergeben. Diese Aufnahmeart hat ausserdem den Vorteil, dass der Abszissen- maßstab für die Zeit konstant bleibt, so dass mit einiger Übung die Oszillogramme mit Leichtigkeit gelesen werden können.

Im Stromoszillogramm wird infolge der Lage der Stromschleife des KO nur der Strom im Lichtbogen aufgenommen. Während des Ueberwerfens des Stromes vom Lichtbogenpfad auf den parallelen Kondensator  $C_s$  geht die Schaltstrecke vom Zustand als Leiter in den Zustand eines Isolators über. Nun kann aber der Strom im Lichtbogen nicht rascher abnehmen als er im Kondensator zunimmt. Die Eigenfrequenz des Kreises, bestehend

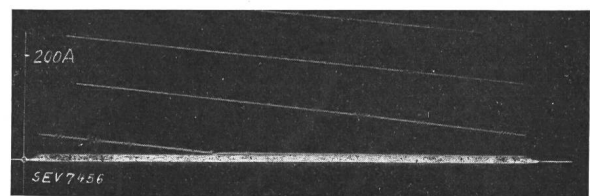


Fig. 3.

Kathodenoszillogramm eines Wechselstromes.

aus Lichtbogen im Schalter und Kondensator  $C_s$ , ist sehr gross. Sie kann aus verschiedenen Kathoden- oszillogrammen des Stromes geschätzt werden (z. B. Fig. 3). Es treten dort mitten im Verlauf nach der Sinuslinie kleine Schwingungen auf, die wir nur

darauf zurückführen können, dass der Lichtbogen so lange gestreckt wurde, dass einzelne Teile zusammenschlagen und sich dadurch kurzschliessen. Diese plötzliche Veränderung des Widerstandes im Lichtbogen erzeugt Stromschwingungen, die Frequenzen aufweisen von 250 000 bis vielleicht 500 000 Hertz. Die dabei auftretenden Stromspitzen rühren vom Entladestrom der Parallelkapazität  $C_s$  her, die sich jeweils entsprechend der Spannungs-differenz des Lichtbogens über denselben entladet.

Das Oszillogramm Fig. 4 zeigt den besprochenen Verlauf der Spannung bei der Löschung sehr deutlich. Die dort auftretende Eigenfrequenz wurde zu  $f_0 = 7700$  Hz bestimmt. Während der Effektivwert der Betriebsspannung 2150 V betrug (Scheitelwert 3060 V) stieg die Summe der Lichtbogenspannung  $u_{BE} + \Delta u_{max}$  auf den relativ hohen

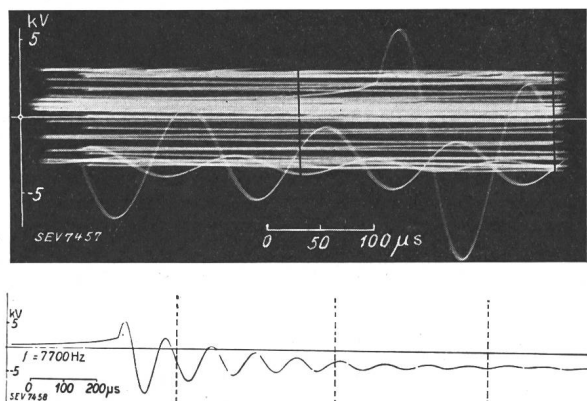


Fig. 4.

Kathodenoszillogramm der wiederkehrenden Spannung (oben) und zusammengesetzte Kurve (unten).

Wert von 5800 V. Zur Erleichterung der Betrachtung wurden im unteren Bildteil die einzelnen Kurventeile in einem anderen Maßstabe zum vollständigen Verlauf aneinandergefügt.

Während die vom Generator gelieferte Spannung im Löschmoment als konstant angesehen werden kann, wird der Anteil der Spannung  $\Delta u_{max}$  über die Lichtbogenspannung im Löschpunkte  $E$  von den Induktivitäten des Kurzschlusskreises geliefert. Ein Mass hierfür gibt der Strom  $i_E$  im Löschmoment  $E$ . Je grösser die unmittelbar an den Klemmen des Schalters liegende Kapazität  $C_s$  ist, um so grösser werden  $i_E$  und  $t_E$  und damit der negative Spannungsaussschlag ( $u_{BE} + \Delta u_{max}$ ). Damit wächst auch die Steilheit des Spannungsanstieges an der gelöschten Lichtbogenstrecke, da die Spannung mit der Eigenfrequenz  $f_0$  auf den Wert von  $-(u_G + \Sigma u_{BE} + \Delta u_{max})$  aufschwingt. Es ist  $u_G = u_{max}$ , wenn die Phasenverschiebung des Kurzschlusskreises gross war. Die mittlere Steilheit des Anstieges nach Juillard würde dann betragen

$$\frac{du}{dt} = f_0 \cdot 4 \cdot (u_{max} + \Sigma u_{BE} + \Delta u_{max}).$$

Je grösser die Kapazität  $C_s$  wird, desto kleiner wird die Eigenfrequenz

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_s}}$$

des dem Schalter zunächst liegenden Anlageteiles und damit auch destoweniger steil wird der Anstieg der wiederkehrenden Spannung. Die Vergrösserung der Zeit  $t_E$  und die daraus resultierende Erhöhung der Spannung  $u_{max}$  nimmt zu mit der Kapazität  $C_s$ , während die Steilheit nur mit der Wurzel von  $C_s$  abnimmt. Es erschwert daher die Kapazität  $C_s$  bei kleinen Strömen die Abschaltung. Wie stark die dielektrische Beanspruchung der Schaltstrecke durch die wiederkehrende Spannung bei sinkender Eigenfrequenz des Netzes abnimmt, ist aus Fig. 5 zu ersehen. Die Kurve  $F_D$ , die den Verlauf der Zunahme der dielektrischen Festigkeit der Schaltstrecke darstellt, muss natürlich stets über die Kurve der in Frage kommenden wiederkehrenden Spannung liegen. Es ist aber völlig unwirtschaftlich, einen Schalter, der nur bei  $f_0 = 500$

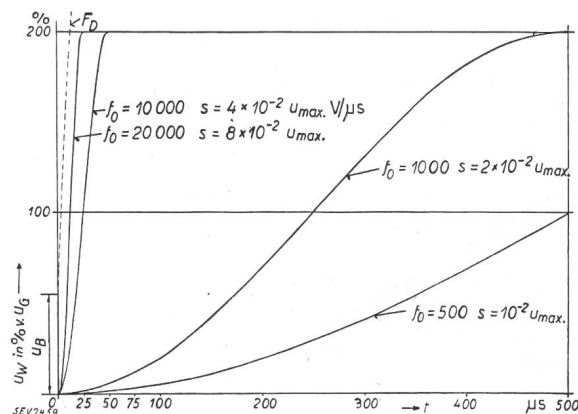


Fig. 5.

Beanspruchung der Schaltstrecke bei verschiedenen Eigenfrequenzen.

$s$  mittlerer Spannungsanstieg  $= 4f_0 u_{max}$ .  
 $S$  max. Spannungsanstieg  $= 2\pi f_0 u_{max}$ .  
 $S = 1,57 \cdot s$        $500 \mu s = 1/2000$  s.

Hz schalten muss, mit einer Schaltstrecke für  $f_0 = 20$  000 Hz zu versehen. Ausserdem wird der derart überbemessene Schalter bei kleinen Strömen eine zu wirksame Löscheinrichtung haben.

Die Erfahrung bei den zahlreich durchgeführten Versuchen zeigte, dass  $i_E$  und  $t_E$  verschwindend klein werden, sobald die abgeschalteten Ströme grössere Werte annehmen (1000 A und darüber) und infolge der bekannten Lichtbogen-Hysterese die Leitfähigkeit der Strecke bis zum Schluss hoch und damit die Lichtbogenspannung klein blieb.

## B. Der Einfluss des Schalters auf die wiederkehrende Spannung.

Es kann nun der Einfluss des Schalters und seiner Lichtbogenlöscheinrichtung wie folgt definiert werden. Je wirksamer letztere ist, um so höher steigt die Lichtbogenspannung an. Damit wird nicht nur die im Lichtbogen umgesetzte Energie grösser, es kippt deshalb auch der Strom früher vom Lichtbogen auf die Kapazität über, unter Erzeugung höherer Spannungswerte. Was man früher bei den Schleifenoszillogrammen als Löschspitze bezeichnete, zeigt sich dann im grösseren Zeitmaßstab des Kathodenoszillogrammes als eine auf die Lichtbogenspannung im Löschmoment aufgesetzte Schwingung der wiederkehrenden Spannung.



Ein Schalter, dessen Löschleinrichtung übermäßig wirksam ist, erschwert sich selbst die Abschaltung durch Erzeugung eines höheren Anstieges der wiederkehrenden Spannung. In der Regel kann jedoch derselbe Schalter infolge der rascheren Deionisation seiner Unterbrechungsstrecke auch eine grössere Steilheit der wiederkehrenden Spannung aushalten. Fig. 6 zeigt zwei Abschaltungen, die mit demselben Druckluftschalter gemacht wurden, der für die relativ hohe Abschaltleistung von 200 mVA bei 10 000 V gebaut war. Das eine Mal (Fig. 6 oben) betrug der Effektivwert der Betriebsspannung 2070 V und der Abschaltstrom 150 A. Die allzu

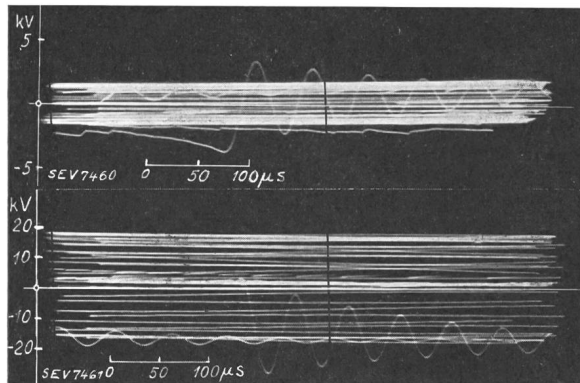


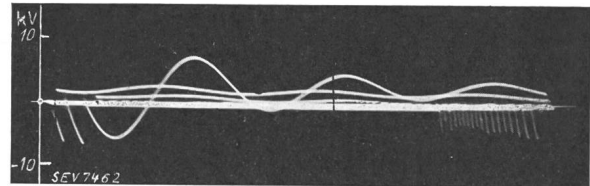
Fig. 6.

Einwirkung der Lichtbogenlöschleinrichtung auf die wiederkehrende Spannung.

kräftige Kühlung des Lichtbogens hatte eine Erhöhung der Lichtbogenspannung weit über die Betriebsspannung zur Folge. Bei der andern Schaltung (Fig. 9) war der Effektivwert der Spannung auf 5620 V erhöht worden, bei einem Abschaltstrom von 5200 A. Die Lichtbogenspannung ist jetzt sehr klein im Vergleich zur Spannung des Netzes. Die Eigenfrequenz betrug in beiden Fällen 18 500 Hz.

Kann ein solcher Schalter die Steilheit der wiederkehrenden Spannung nicht aushalten, so tritt eine Rückzündung des Lichtbogens ein. Der Strom

Strom  $i_{Di}$  ihr Vorzeichen und geht auf die andere Seite über. Befinden sich diese Rückzündungen noch vor dem Nulldurchgang von  $i_{Di}$ , so werden nach jeder Rückzündung der Strom  $i_E$  und die Zeit  $t_E$  und damit die Spannungserhöhung  $u_{max}$  immer kleiner. Die Löschung wird dadurch erleichtert. Speziell bei Oelschaltern treten Rückzündungen nie allein, sondern in der Regel gruppenweise auf. Der Strom  $i_E$  hat sich kaum wieder gebildet, so kippt er wieder auf die Parallelkapazität über und in der ersten Welle des Anstieges von  $u$  erfolgt der neue Zusammenbruch. Es scheint, dass der Lichtbogenraum im Oelschalter eine vor-

Fig. 7.  
Rückzündungen.

zügliche Kühlung aufweist, während dagegen die Zunahme seiner elektrischen Festigkeit offenbar geringer ist als z. B. beim Luftschalter. Das Oszillogramm Fig. 7 zeigt eine Reihe von Rückzündungen, die alle vor dem Nulldurchgang von  $i_{Di}$  liegen.

Die beiden Fragen des Einflusses des Schalters auf den Verlauf der wiederkehrenden Spannung und des Verhaltens des Schalters in einem gegebenen Netz sind voneinander kaum zu trennen. So müssen wir, bevor wir den Einfluss der durch den Schalter verursachten Dämpfung betrachten, zuerst den Verlauf der Abschaltung eines Netztes mit dem Leistungsfaktor 1 untersuchen. Fig. 8 zeigt die idealisierte Wiedergabe des Schleifenzillogrammes einer solchen Abschaltung. Die Generatorspannung  $u_G$  muss sowohl den Abfall  $R \cdot i$ , als auch die Lichtbogenspannung  $u_B$  überwinden. Da sich der Lichtbogenwiderstand zum Widerstand  $R$  der Netzbelastung direkt addiert, muss mit

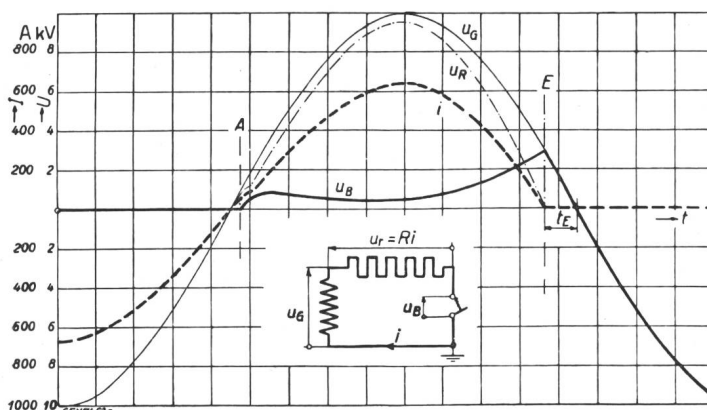


Fig. 8.

Prinzipieller Verlauf einer Wechselstrom-Abschaltung bei  $\cos \varphi = 1$ .

$U_{eff} = 7070$  V;  $R = 150 \Omega$ , Kapazität parallel zum Schalter = 0.

A Beginn der Trennung der Kontakte.

E Ende der Abschaltung.

$u_G - u_R - u_B = 0$ .  $u_G = U \sin \omega t$ ;  $u_R = R \cdot i$ .

$u_B = f(i, a, b, v)$ , wo  $a$  und  $b$  nach Ayrton und  $v$  = Geschwindigkeit des bewegten Kontaktes.

$i_B$  fließt wieder und die Lichtbogenspannung  $u_B$  erscheint an Stelle der Schwingung der wiederkehrenden Spannung. Je nachdem die Rückzündung vor dem Nulldurchgang des ideellen Gesamtstromes  $i_{Di}$  oder nach dem Nulldurchgang eintritt, bleibt die neue Lichtbogenspannung auf derselben Seite der Zeitaxe oder wechselt mit dem

seiner Zunahme der Strom  $i$  des Kreises abnehmen. Die Stromwelle wird deformiert. Der Nulldurchgang erfolgt weit früher (um  $t_E$ ) als es der normalen Sinuswelle entsprechen würde, nämlich in gleicher Weise wie bei der Gleichstromausschaltung dann, wenn die Lichtbogenspannung  $u_B$  gleich der Generatorspannung  $u_G$  ist. Trotzdem ist,

wegen des Fehlens von Induktivitäten, kein Ueberschwingen der Spannung zu konstatieren. Die Spannung ist im Löschmoment nicht Null, sondern hat noch einen bestimmten Wert. Sie nimmt aber entsprechend der Sinuskurve in der Zeit  $t_E$  immer noch ab, so dass die Schaltstrecke für ihre Entionisierung und Verfestigung eine äusserst wertvolle Zeit gewinnt. Die effektiv aufgenommenen Oszillogramme der Fig. 9 bestätigen, dass die wiederkeh-

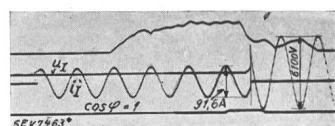
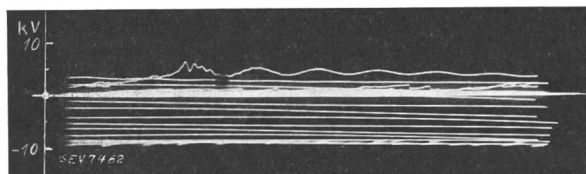


Fig. 9.  
Oszillogramme einer  
Abschaltung mit  
 $\cos \varphi = 1$ .

rende Spannung nicht durch Null geht, sondern sich noch relativ längere Zeit auf der Seite der Lichtbogenspannung befindet. Die Eigenfrequenzen des Kreises sind nur noch an kleinen Amplituden erkennbar.

Es wird bei nahezu allen Schaltungen in den Netzen nicht zu vermeiden sein, dass zum abzuschaltenden Netzteil, der mit oder ohne Fehler behaftet sein kann, andere Verbraucher parallel geschaltet sind. Es ist daher von Interesse, den Einfluss der Parallellast auf den Abschaltlichtbogen zu kennen.

Dieser Netzzustand lässt sich im Hochleistungsprüffeld leicht nachahmen durch Parallelschalten eines Widerstandes zu den Klemmen eines Schalters. Die Oszillogramme Fig. 10 zeigen den Verlauf der wiederkehrenden Spannung, wenn der Parallelwiderstand so gewählt wird, dass der Schwingungskreis gedämpft ist. Die wiederkehrende Span-

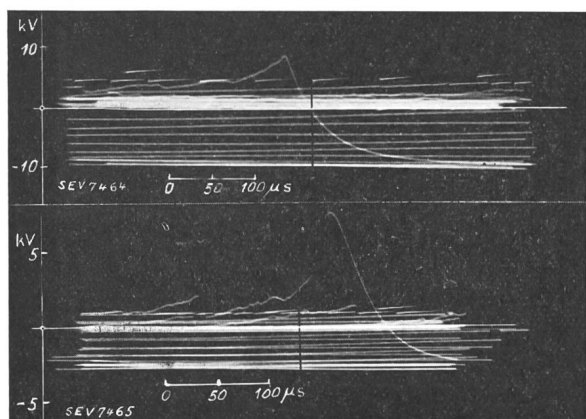


Fig. 10.  
Abschaltungen mit Parallelwiderstand.

nung läuft daher auch nach einer Exponentialkurve in die 50periodige Betriebsspannung über. Im unterem Bilde ist bei kleinem Abschaltstrom von 293 A noch das Ueberschwingen infolge des vorzeitigen Nulldurchganges zu sehen. Zur Kenn-

zeichnung des Einflusses der Dämpfung auf die elektrische Beanspruchung der Schaltstrecke ist der Verlauf der wiederkehrenden Spannung, der in den verschiedenen Versuchen festgestellt wurde, in der Fig. 11 zusammengetragen worden.

Die Kurve 1 ist die theoretische Sinusschwingung mit der Frequenz gleich der Eigenfrequenz des abgeschalteten Netzteils, die nur dann möglich wäre, wenn keine Lichtbogenspannung und keine Dämp-

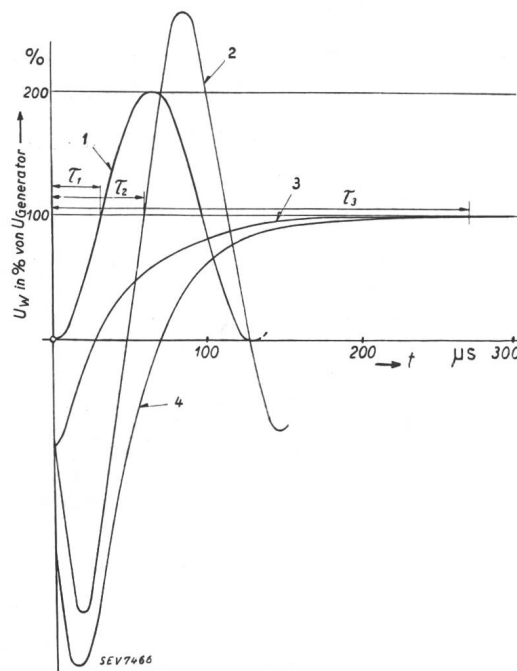


Fig. 11.

Einfluss der Dämpfung der wiederkehrenden Spannung auf die Beanspruchung der Schaltstrecke.

- 1 Einschalterschwingung ohne Dämpfung und mit Lichtbogenspannung Null (ähnlich Fig. 6 unten).
- 2 Einschalterschwingung mit kleiner Dämpfung, mit Lichtbogenspannung und Ueberschwingen (Fig. 4 oben).
- 3 Gedämpfter Verlauf der wiederkehrenden Spannung mit Lichtbogenspannung entsprechend Fig. 10 oben.
- 4 Gedämpfter Verlauf der wiederkehrenden Spannung mit hoher Lichtbogenspannung und Ueberschwingen entsprechend Fig. 10 unten.

fung auftreten würde. Tritt, wie im eingangs gezeigten Oszillogramm Fig. 4, eine hohe Lichtbogenspannung und ein Aufschwingen infolge des vorzeitigen Löschens auf, dann folgt die Spannung der Kurve 2 mit weit grösserer Steilheit und Amplitude. Und trotzdem wird ein moderner Schalter nicht versagen, da ihm auch das Anwachsen der sog. Rückkehrzeit auf  $\tau_2$  die Verfestigung seiner Schaltstrecke ermöglicht.

Mit Parallelwiderstand und ohne vorzeitige Löschung geht die Spannung, wie Kurve 3 zeigt, ohne Schwingung und mit langer Rückkehrzeit  $\tau_3$  in die Betriebsspannung über. Auch wenn der Abschaltstrom sehr klein und daher seine Lichtbogenspannung hoch ist, so dass er vorzeitig löscht, tritt nach Kurve 4 kein Ueberschwingen mehr auf.

Nicht nur der max. Spannungsanstieg wird reduziert, aber speziell der mittlere, wenn man hier überhaupt von einem solchen reden darf. Jedenfalls ist der verbleibende max. Anstieg konzentriert auf die Zeit, in welcher die Spannung vom Wert der entgegengesetzten Lichtbogenspannung noch

abnimmt, so dass er für den Schalter völlig ungefährlich ist. Schliesslich findet auch keine Ueberschwingen auf den doppelten Maximalwert oder gar darüber statt.

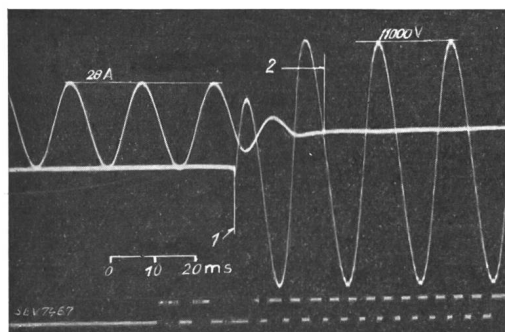


Fig. 12.  
Schleifenoszillogramm einer Widerstandsabschaltung mit einem Wasserschalter (Typ WS 46.6, 10 kV, 600 A).  
1 Beginn der Oeffnung der Kontakte  
2 Ende der Abschaltung.

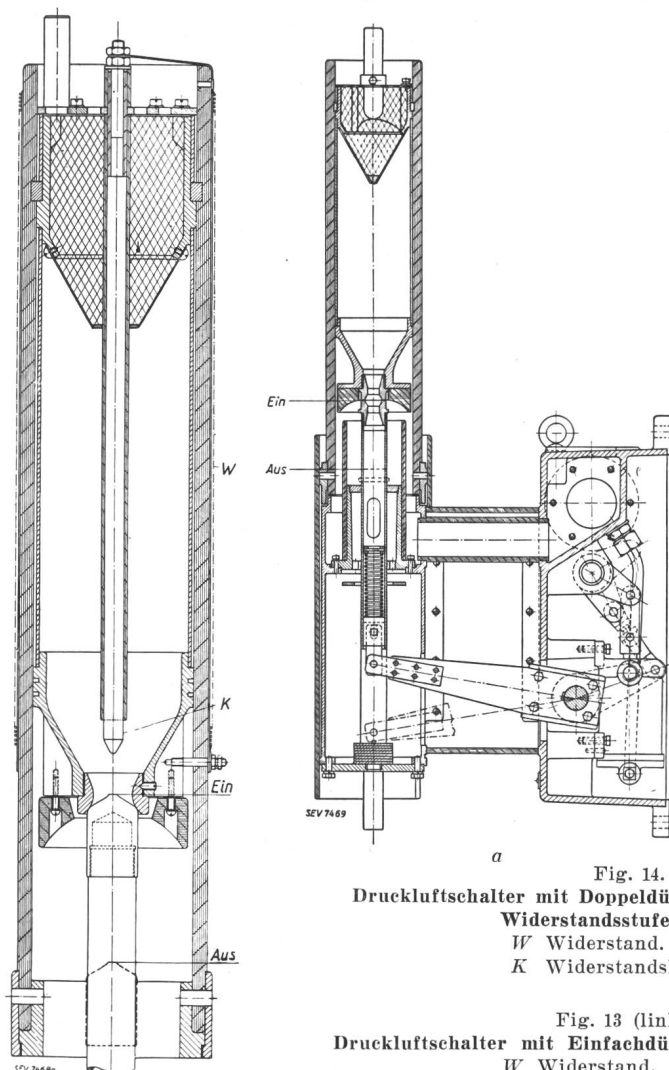


Fig. 14.  
Druckluftschalter mit Doppeldüse ohne (links) und mit Widerstandsstufe (rechts).  
W Widerstand.  
K Widerstandskontakt.

Fig. 13 (links).  
Druckluftschalter mit Einfachdüse mit Widerstandsstufe.  
W Widerstand.  
K Widerstandselektrode.

Die logische Ueberlegung führt zum Schluss, dass vom Standpunkt der kleinsten Beanspruchung der Schaltstrecke aus der Abschaltvorgang zweckmässig in zwei Stufen erfolgen sollte. In der ersten Stufe

würde ein Widerstand in den Kreis eingeschaltet; in der zweiten Stufe würde der Reststrom bei  $\cos \varphi = 1$  unterbrochen. Diesen Weg hat die Natur schon von selbst beschritten, indem oft der den Lichtbogen umhüllende Raum eine Leitfähigkeit annimmt, die nicht den Lichtbogengesetzen folgt und nach Erlöschen des Lichtbogens noch kurze Zeit fortbesteht.

Als eigentlicher Schalter mit Widerstandsstufe zeigt sich der Wasserschalter in einem bestimmten Bereich seines Arbeitsgebietes (Fig. 12, Abschaltung von 28 A bei 6000 V). Durch die Bewegung des Schaltstiftes in der Flüssigkeit mit bestimmter Leitfähigkeit wird ein zeitlich zunehmender Widerstand in den Kreis eingeschaltet.

Im Oelschalterbau haben die Konstrukteure die Stufenwiderstände seit Jahrzehnten angewendet. Sie waren aber eine sehr unangenehme Beigabe, komplizierten den Schalter ganz wesentlich und brachten neue Isolationsschwierigkeiten mit sich. Als

man daher durch systematische Versuche in Netzen und Hochleistungsanlagen lernte, mit dem Oelschalter immer höhere Abschaltleistungen und steilere Spannungsanstiege zu meistern, liess man die Stufenwiderstände schleunigst verschwinden. Die modernen Hochleistungs-Oelschalter und ölarmer Schalter arbeiten alle ausnahmslos mit Löschkammern und haben daher den grossen Vorteil, dass der wirksame Druck und damit auch die Strömungsgeschwindigkeit des Löschmediums in Funktion des abzuschaltenden Stromes zunimmt. Sie passen sich also den Anforderungen des Netzes selbsttätig an.

Die Niederdruck-Luftschalter, die mit Drücken von ca. 2 kg/cm<sup>2</sup> blasen, müssen auf ihrem ganzen Arbeitsbereich mit Stufenwiderständen arbeiten. Die Widerstände werden durch den sich bewegenden Lichtbogen selbst in den Stromkreis geschaltet.

Bei den Druckluftschaltern, die mit fremderzeugtem Druck von 10...15 kg/cm<sup>2</sup> arbeiten, ist die Löschwirkung so intensiv, dass ohne weiteres hohe Spannungsanstiege, d. h. grosse Frequenzen und Abschaltleistungen bewältigt werden können. Es kommen aber Verhältnisse vor, wo es wirtschaft-

licher wird, auch bei diesen Druckluftschaltern mit einer Widerstandsstufe zu schalten, statt den Druck und die Luftmenge zu erhöhen. Unsere Versuche haben gezeigt, dass eine einzige Widerstandsstufe in allen Fällen genügt. Fig. 13 zeigt einen Druckluftschalter mit Einfachdüse und Widerstandsstufe, die durch den fortgeblasenen Lichtbogen selbst eingeschaltet wird. Die Druckluftschalterkonstruktion mit Doppeldüse eignet sich sehr gut für den Einbau eines Widerstandes, wie Fig. 14 zeigt. Links ist der Schnitt eines Schalters ohne, rechts eines Schalters mit Widerstandsstufe dargestellt. Bei dieser Lösung ist die Einschaltung des Stufenwiderstandes in den Kurzschlusskreis zwangsläufig. Die in den zwei Schaltstufen entstehenden Lichtbogen

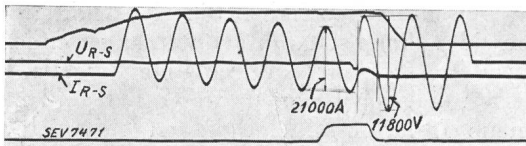


Fig. 15.

Oscillogramm einer Abschaltung von 500 MVA bei 10 000 V mit Doppeldüsen-Druckluftschalter mit Widerstandsstufe. (Zahlenangaben in Effektivwerten.)

können nicht gleichzeitig bestehen und die Lichtbogengase der ersten Schaltstrecke werden nicht in die zweite Schaltstrecke hineingeblasen. Diese Konstruktion eignet sich auch für den Einbau von hochohmigen Stufenwiderständen zur Einschaltung von Transformatoren. Fig. 15 zeigt die Oscillogramme einer Abschaltung von 500 mVA bei 10 000 V mit einem solchen Schalter.

### C. Das Verhalten des Schalters im Netz.

Die bisher erwähnten Versuche im Hochleistungsprüffeld haben grundsätzlich Auskunft gegeben über den Einfluss der verschiedenen Eigenfrequenzen, über den Einfluss des Leistungsfaktors des abzuschaltenden Kreises und über den Einfluss der Dämpfung durch Parallellasten. Damit besitzen wir die Elemente zur Beurteilung der meisten in

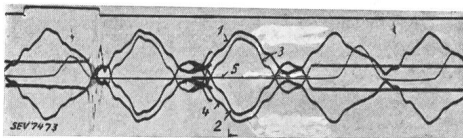
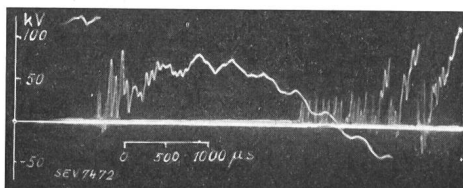


Fig. 16.

Abschaltung eines leerlaufenden Transformators von 18 000 kVA auf der Oberspannungsseite.

- 1 Linienspannung rot, 1 mm = ca. 17 100 V
- 2 Schalterspannung grün 1 mm = ca. 12 900 V
- 3 Schalterspannung rot, 1 mm = ca. 12 900 V
- 4 Linienspannung grün, 1 mm = ca. 17 100 V
- 5 Strom, Phase rot, 1 mm = ca. 27,7 A.

den Netzen möglichen Fälle. Die Versuche, die wir in den Netzen durchzuführen Gelegenheit hatten, bestätigen die Richtigkeit der Ueberlegungen.

Auch das *Abschalten von leerlaufenden Transformatoren* gegenüber dem Abschalten eines stark induktiven Kreises zeigt grundsätzlich nichts neues. Die vorzeitige Löschung wird aber durch die geringe Grösse der abzuschaltenden Leerlaufströme und ausserdem noch durch die Verzerrung ihrer Kurvenform begünstigt. Diese Verhältnisse steigern sich, wenn man den Transformator kurz nach dem Einschalten wieder ausschaltet, solange der Leerlaufstrom noch völlig asymmetrisch verläuft. Aus einer grossen Zahl von Schaltversuchen an grossen Transformatoren in Netzen seien zwei typische Oscillogramme herausgezogen. Fig. 16 zeigt den erwarteten Verlauf mit zahlreichen

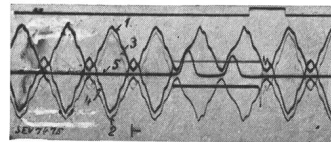
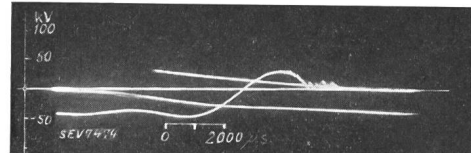


Fig. 17.

Wie Fig. 16 (auch die Maßstäbe).

Rückzündungen und einer maximalen Spannung gleich dem zweieinhalbfachen der Betriebsspannung. Die Unterbrechung erfolgte in der Nähe des Maximums der Spannungskurve; das Löschen beim Versuch nach Fig. 17 erfolgte in der Nähe des Nulldurchganges der Generatorspannung, daher keine Rückzündungen und ruhiges Einschwingen der wiederkehrenden Spannung. Ist die asymmetrische Stromkomponente abgeklungen, d. h. ist der Transformator schon eine Zeitlang unter Spannung, so ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Rückzündungen grösser. Wir konnten aber dabei keine grösseren Spannungen als 2- bis 2,5mal die Betriebsspannung feststellen, mit Halbwertszeiten von einigen hundert Mikrosekunden<sup>4)</sup>. Diese Spannungen sind von derselben Grössenordnung wie die Erdschlussüberspannungen und müssen von der Anlagenisolation ohne Schaden ausgehalten werden. Wir sind zur Zeit daran, diese Fragen durch weitere eingehende Versuche noch mehr abzuklären.

Eine weitere Erscheinung tritt hinzu beim Abschalten von *Kurzschlüssen hinter langen Leitungen*. Die erste bekannt gewordene Feststellung dieser Art haben wir vor 10 Jahren gemacht, anlässlich von Abschaltversuchen im 132-kV-Netz der SBB. Die Erklärung wurde mit Hilfe von Herrn Dr. Berger und seinem Kathodenoszillographen gefunden. Er hat im Bull. SEV 1929, Nr. 20, darüber berichtet, so dass wir uns hier kurz fassen können. Es handelt sich um die Ueberlagerung eines Wanderwellenvorganges über den mit der Eigenfrequenz

<sup>4)</sup> Freiburger: Ueberschläge in Schaltanlagen beim Abschalten von Transformatoren in VDE-Fachberichte 1935, S. 32.







viele ungenügende Schalter im Betriebe sind, ohne Störungen zu veranlassen.

2. Bei *grossen Strömen*, über 1000 A oder in der Nähe der Nennabschaltleistung des verwendeten Schalters, *verliert* diese Erscheinung *jede praktische Bedeutung*.

3. Auf dem *grossen Bereich der Betriebsströme*, die für die grösste Zahl der Schaltungen wohl in Betracht kommen, ist stets der Leistungsfaktor so viel höher als im Kurzschlusskreis, dass der bei diesen Vorgängen auftretende Verlauf der wiederkehrenden Spannung so stark gedämpft ist, dass sozusagen *keine hochfrequenten Schwingungen und nur ganz ungefährliche Amplituden* entstehen können.

4. Der einzige Fall im Betriebe, der noch Bedeutung haben könnte, wo sehr steile und hohe Spannungsschwingungen möglich sind, tritt, wie allgemein bekannt ist, bei der *Abschaltung von leerlaufenden Transformatoren auf*.

Von diesen Spannungen werden neben dem Schalter selbst nur der Transformator und die aller nächsten Anlageteile der Ober- und Unterspannungsseite betroffen. Es war bisher üblich, die Transformatoren wegen der Beanspruchung durch die Sprungwellen atmosphärischen Ursprungs derart zu bauen, dass sie die Abschaltspannung ohne weiteres ertragen. Sollten irgendwo doch Schwierigkeiten auftreten, so könnte wieder das frühere Mittel des Stufenwiderstandes angewendet werden. Jedenfalls empfiehlt es sich, für Transformatoren Schalter zu verwenden, deren Löscheinrichtungen nicht überbemessen sind und ausserdem die Leer-ausschaltung auf der Unterspannungsseite vorzunehmen, wo die Leerlaufströme die höheren Werte annehmen.

5. Die *Bauart der verwendeten Schalter* spielt eine grosse Rolle auf das vorzeitige Verlöschen des Lichtbogens, obgleich im Verhalten der verschiedenen Schaltertypen keinerlei prinzipielle, sondern

nur graduelle Unterschiede vorhanden sind. Je wirksamer die Löscheinrichtung eines Schalters ist, um so grösser wird der Anstieg der Lichtbogen-spannung, um so grösser der Strom  $i_E$  und die Zeit  $t_E$  sein. Die kleinsten Werte weist der Oelschalter auf; mit ähnlichen Werten folgt der Wasserschal-ter und mit höheren Werten der Luftschalter.

Aus denselben Gründen ergibt sich, dass ein Schalter, der für eine höhere Nennspannung ge-baut ist als die Betriebsspannung des Netzes, in welchem er verwendet wird, bei kleinen Strömen zu vorzeitiger Löschung neigt. Dasselbe ist der Fall, wenn Schalter, die für sehr hohe Abschalt-leistungen bemessen sind, kleine Ströme abschalten müssen. Praktische Bedeutung erhält diese Tat-sache jedoch nur bei der unter 4. erwähnten Ab-schaltung leerlaufender Transformatoren.

Zum Schluss möchten wir unseren verbindlich-sten Dank denjenigen Elektrizitätswerken ausspre-chen, die uns die Vornahme solcher Untersuchun-gen in ihren Netzen erlaubt und zum grossen Teil bei der Durchführung mit Eifer mitgeholfen ha-ben. Es betrifft dies in erster Linie die Schweiz. Bundesbahnen, das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich und das Elektrizitätswerk der Stadt Basel. Bei diesen Versuchen zeigte sich, dass unter Beach-tung der entsprechenden Vorsichtsmassnahmen Kurzschlüsse, ohne Störungen zu verursachen, mit-ten im Betriebe durchgeführt werden können. Wir hoffen, dass diese Feststellung den andern grossen Werken den Entschluss zur Ausführung gleicher Versuche erleichtern wird.

Der Vorsitzende dankt Herrn Oberingenieur Puppikofer bestens für den Vortrag. Herr Puppikofer hat die Ausführ-ungen von Herrn Dr. Wanger in schönster Weise ergänzt; er hat besonders auch das Gebiet der kleinen Ströme be-handelt und ist damit auf eine sehr aktuelle Frage eingetreten.

Der Vorsitzende eröffnet die

## Diskussion

in der vielleicht u. a. folgende Punkte zur Sprache kommen sollten: die Einführung einer Bestimmung über die wieder-kehrende Spannung in die Vorschriften für Schalter, die direkte Prüfmethode und die Wahl der Schalter in Abhängig-keit von der Eigenfrequenz.

Herr Dr. A. Roth, Direktor der Sprecher & Schuh A.-G., Aarau: Es freut mich, dass die Frage der indirekten Prüf-methode zur Diskussion gestellt wurde. Sie ist schon lange mein Steckenpferd. Untersuchungen über die Möglichkeiten, Schalter ohne grosse Kurzschlusshäuser zu prüfen, wurden gemacht in Italien, in Holland, in Deutschland. Die Frage muss gelöst werden. Man braucht heute zur Schalterprüfung 10- oder 20mal zu grosse Maschinen. Die Maschine sollte eigentlich nur die Lichtbogenleistung liefern müssen. Die ganze Sache kommt einem noch irgendwie unheimlich vor. Wir dürfen Herrn Dr. Wanger zu seinen initiativen Unter-suchungen gratulieren. — Die Frage der wiederkehrenden Spannung in Vorschriften aufzunehmen ist verfrüht. In 5 oder 10 Jahren darf man vielleicht daran denken.

Herr Dr. W. Wanger, Referent<sup>1)</sup>: Herr Dr. Roth hat in der Diskussion sehr anerkennende Worte für die bei meiner Firma durchgeführten Forschungen über «indirekte» Schalter-prüfungen gefunden. Er beurteilt aber diese Prüfmethode

m. E. viel zu optimistisch, so dass es mir unbedingt nötig scheint, einzelne seiner Behauptungen, oder besser gesagt: Erwartungen, mit Hilfe der zur Verfügung stehenden Ver-suchsresultate zu widerlegen. Wenn ich an der Versammlung selber Herrn Dr. Roth nichts erwidert habe, so deswegen, weil eine Diskussion über dieses Thema gar nicht möglich war, nachdem man mich durch Beschränkung der Redezeit genötigt hatte, den betreffenden Abschnitt meines Vortrages wegzulassen.

Herr Dr. Roth hat darauf aufmerksam gemacht, dass Kurzschlußstrom und wiederkehrende Spannung nicht zu gleicher Zeit vorkommen und dass es daher unverantwort-lich sei, die Kurzschlußleistung der Prüfanlage gleich dem vollen Produkt aus Kurzschlußstrom und wiederkehrender Spannung zu wählen. Da gleichzeitig mit dem Kurzschluss-strom nur die Lichtbogenspannung aufgebracht werden müsse, würde eine vielleicht 20mal kleinere Spannung der Anlage genügen. Man könnte daraus schliessen, dass man durchweg mit 20mal kleinerer Maschinenleistung, als man bisher für erforderlich hielt, einen Schalter vollwertig prüfen könnte. Aber so extrem liegen denn die Verhältnisse doch nicht.

Zunächst einmal ist die Lichtbogenspannung nicht durch-weg nur  $\frac{1}{20}$  der wiederkehrenden Spannung, sondern sie erreicht bei gewissen Schaltertypen sogar die gleiche Grössen-ordnung wie die wiederkehrende Spannung. Sodann genügt eine treibende Spannung, die nur gleich der Lichtbogenspan-

<sup>1)</sup> Beitrag nachträglich schriftlich eingesandt.