

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band:	20 (1929)
Heft:	20
Artikel:	Die Abschaltung von Kurzschlüssen am Ende unverzweigter Leitungen und die sich dabei ergebenden Ueberspannungen, nach Versuchen mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen
Autor:	Berger, K. / Habich, H.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1060780

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: 17.02.2026

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN BULLETIN ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke | REDAKTION Zürich 8, Seefeldstr. 301 | Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union de Centrales Suisses d'électricité

Verlag und Administration | Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G. Zürich 4, Stauffacherquai 36/38 | Editeur et Administration

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet | Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XX. Jahrgang
XX^e Année

Bulletin No. 20

Oktober II
Octobre II 1929

Die Abschaltung von Kurzschlüssen am Ende unverzweigter Leitungen und die sich dabei ergebenden Ueberspannungen, nach Versuchen mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen.

Von K. Berger, Ingenieur beim S.E.V. und H. Habich, Ingenieur, Sektionschef der S.B.B.

Die Autoren beschreiben Kurzschluss-Abschaltversuche an einer 132-kV-Leitung. Die beim Abschalten entstehenden steilen Wanderwellen bewirken eine wesentliche Erschwerung des Schaltvorganges infolge der Trägheit des Schalterlichtbogens und einer relativ kleinen, auf die Leitung arbeitenden Maschinenleistung. Die Erklärung der Vorgänge ist mit Hilfe der aufgenommenen Kathoden-Oszillogramme möglich geworden. Es geht daraus hervor, dass ein Schalter in Netzen gefährlicheren Beanspruchungen ausgesetzt sein kann als an den Klemmen eines Prüffeld-Generators. Die Abhilfmaßnahmen für den gefährlichen Vorgang werden angegeben und Schlüsse gezogen betreffend die Prüfung von Hochleistungs-Oelschaltern.

621.374.7 : 621.317.35 (0068)
Les auteurs décrivent des essais de rupture de courts-circuits effectués sur une ligne à 132 kV. Les ondes à front raide qui prennent naissance dans ce cas entraînent sensiblement la rupture, par suite de l'inertie de l'arc dans l'interrupteur et de la puissance relativement faible des machines travaillant sur la ligne. Les oscillogrammes relevés au moyen de l'appareil cathodique ont permis d'analyser ce processus. Il s'ensuit qu'un interrupteur peut être astreint à des efforts plus considérables dans le réseau qu'aux bornes d'une génératrice d'essai. Les auteurs indiquent les mesures à prendre pour parer aux effets dangereux et tirent des conclusions relatives à l'essai d'interrupteurs à huile de grande puissance.

1. Einleitung.

Bei Kurzschlussversuchen mit Oelschaltern, die im Unterwerk Rapperswil am Ende der 132 kV-Uebertragungsleitung Vernayaz-Rapperswil der S.B.B. ausgeführt wurden, zeigten sich in den bei gewissen Betriebszuständen mit dem gewöhnlichen Schleifen-Oszillograph aufgenommenen Oszillogrammen rasch verlaufende Spannungsvariationen, die nicht mehr zuverlässig aus den Oszillogrammen ersichtlich waren und die es deshalb sehr wünschenswert erscheinen liessen, diese Vorgänge gleichzeitig auch mit dem Kathodenstrahl-Oszillograph des S.E.V. zu verfolgen. Die Deutlichkeit, mit welcher mit diesem Apparat rasch verlaufende Vorgänge festgehalten werden können, und die bisher unbekannte Klarheit, mit der sich die Vorgänge selber nun erkennen lassen, machen eine kurze Beschreibung einiger weniger Beispiele von Oszillogrammen des Kathodenstrahl-Oszillographen, sowie einen Vergleich derselben mit den zugleich mittels des Schleifenoszillographen aufgenommenen Oszillogrammen wünschenswert¹⁾.

¹⁾ Für die Zurverfügungstellung der letztern sei der Maschinenfabrik Oerlikon auch an dieser Stelle bestens gedankt.

2. Netzdaten.

Das Schema der bei den hier beschriebenen Versuchen benutzten Anlageteile geht aus Fig. 1 hervor. Das Bahnnetz der S.B.B. wird bekanntlich mit Einphasenstrom von $16\frac{2}{3}$ Per/s betrieben. Der heutige Ausbau des elektrifizierten Bahnnetzes der S.B.B. findet sich beschrieben von Dr. E. Huber-Stockar im Neujahrsblatt der Naturforschenden Gesellschaft Zürich 1929²⁾. Die speisenden Transfor-

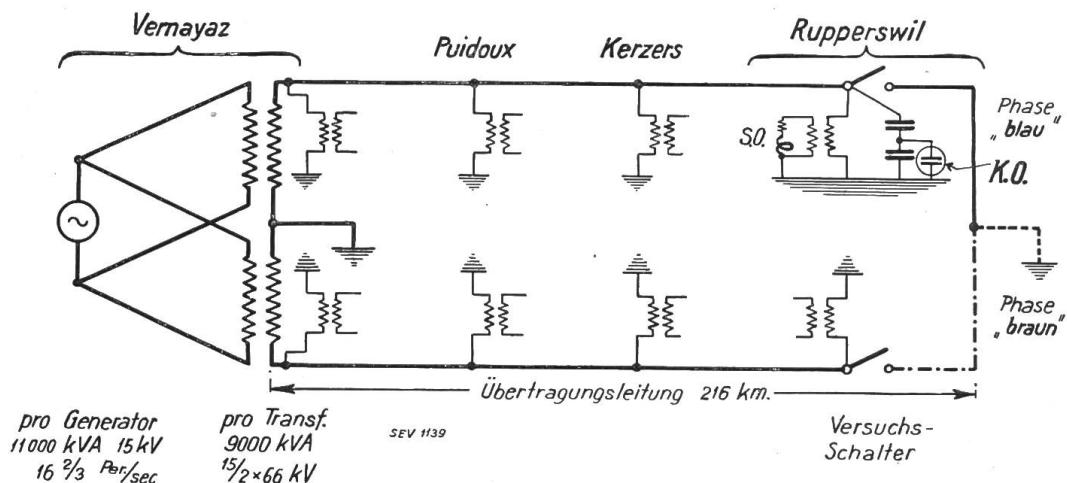


Fig. 1.
Schema der Versuchsanlage.
SO = Schleifenoszillograph. KO = Kathodenstrahlzoszillograph.

toren besitzen zwei bewickelte Säulen, eine für die Transformierung von 15 auf 132 kV, die andere von 15 auf 66 kV. Eine dritte unbewickelte Säule mit ca. 15 % des Eisenquerschnittes einer Hauptsäule dient dem Ausgleich magnetischer Flüsse der 132 und 66 kV-Säule. Die 66 kV-Wicklung war bei den Versuchen stets offen. Ihre Säule befindet sich immer im Leerlauf; die Wicklung kann für die vorliegende Betrachtung als unwesentlich weggelassen werden. Der Mittelpunkt der 132 kV-Wicklung ist betriebsmäßig direkt geerdet. Die Uebertragungsleitung für 132 kV zwischen den beiden Leitern führt von Vernayaz über die Unterwerke Puidoux und Kerzers nach Rapperswil. Von Rapperswil bis Puidoux befinden sich auf dem gleichen Gestänge zwei Leitungsschleifen (4 Leiter). Von Puidoux nach Vernayaz liegen beide Schleifen auf getrennten Gestängen, jede zusammen mit andern Leitungen für 60 kV. Auf einem Teilstück Deitingen-Gösgen von ca. 32 km Länge befindet sich überdies noch eine Drehstromleitung für 80 kV auf demselben Gestänge. Eine Beschreibung der 132 kV-Leitung findet sich ebenfalls im erwähnten Neujahrsblatt. Für die meisten Versuche wurde nur eine Leitungsschleife von 216 km totaler Länge benutzt, während die andere dem Bahnbetrieb diente.

Die Kurzschlüsse wurden in Rapperswil durch den Versuchsschalter eingeschaltet. Bei einem Teil dieser Versuche war nur ein Leiter der Uebertragungsleitung direkt hinter dem Schalter mittels starker Cu-Seile an die Betriebserde verbunden (einphasiger Kurzschluss nach Erde); bei andern Versuchen waren beide Leiter hinter dem Schalter fest geerdet (zweiphasiger Kurzschluss nach Erde); bei einer dritten Versuchsschaltung waren beide Phasenleiter unter sich hinter dem Schalter kurzgeschlossen, aber nicht geerdet (zweiphasiger Kurzschluss ohne Erde). Das Relais des Versuchsschalters war auf Momentan-Auslösung eingestellt, so dass der Schalter in Bruchteilen einer Sekunde den selber eingeleiteten Kurzschluss wieder unterbrach.

²⁾ Zu beziehen durch das Generalsekretariat des S.E.V. und V.S.E., Seefeldstr. 301, Zürich 8.

Die Konstanten der benutzten Maschinen, Transformatoren und Leitungen sind folgende:

a) Kurzschluss-Impedanz pro Generator in Vernayaz, bezogen auf 15 kV:

$$Z_K = 3,2 \text{ Ohm}, R = 0,108 \text{ Ohm}.$$

Die Z_K -Werte sind aus Oszillogrammen bei plötzlichem Kurzschluss des Generators gewonnen, die R -Werte aus Gleichstrom-Widerstandsmessungen.

b) Kurzschluss-Impedanz pro Transformator in Vernayaz, bezogen auf 15 kV:

bei zweiphasigem Kurzschluss $Z_K = 1,9 \text{ Ohm}$, $R = 0,126 \text{ Ohm}$,

bei einphasigem Kurzschluss $Z_K = 3,2 \text{ Ohm}$, R (wurde nicht gemessen).

Die Z_K - und R -Werte sind aus dem Kurzschlussversuch bestimmt.

c) Die gemessene Kurzschluss-Impedanz der Leitung Vernayaz-Rupperswil (Länge 216 km):

bei zweiphasigem Kurzschluss $Z_K = 0,375 \text{ Ohm/km}$, $R = 0,266 \text{ Ohm/km}$,

bei einphasigem Kurzschluss $Z_K = 0,288 \text{ Ohm/km}$, $R = 0,165 \text{ Ohm/km}$.

Die Teilkapazitäten der Leitung nach Fig. 2 wurden berechnet zu:

$$\begin{aligned} C_{10} &= C_{20} = C_e = 0,0063 \mu\text{F/km}, \\ C_{12} &= 0,0022 \mu\text{F/km}. \end{aligned}$$

In Fig. 1 sind auch die *Messtellen* des Schleifen-Oszillographen (*SO*) und des Kathodenstrahl-Oszillographen (*KO*) bezeichnet. Der Anschluss des Kathodenstrahl - Oszillographen an die 132 kV-Leitung geschah mittels einer kapazitiven Spannungsteilung, wozu der Flansch einer Spannungswandler-Durchführung gegen Erde auf ca. 3000 V isoliert und über eine Glimmer-Kapazität geerdet wurde. Der Kathodenstrahl-Oszillograph war am Ende eines kurzen abgeschirmten Verbindungskabels angeschlossen. In den Figuren S. 692 bis S. 695 sind jeweils unter a) die mit dem Kathodenstrahl-Oszillograph erhaltenen, unter b) die zugehörigen mit dem Schleifen-Oszillograph erhaltenen Oszillogramme dargestellt. Der Kürze halber sind die ersten als Kathodenstrahl-Oszillogramme, die letzteren als Schleifen-Oszillogramme bezeichnet. Die Masstäbe der Oszillogramme sind stets eingetragen; es ist dazu noch folgendes zu bemerken: Die mit dem *SO* gewonnenen Oszillogramme sind mit ablaufendem Filmband von ca. 3 m Länge aufgenommen. Die Zeitmassstäbe entsprechen der grössten praktisch möglichen Vorschubgeschwindigkeit des Filmbandes, nämlich knapp $\frac{1}{2}$ m/s. Die mit dem *KO* aufgenommenen Oszillogramme sind auf rotierendem Film über einer schraubenförmigen Nulllinie aufgezeichnet. Das Achsensystem ist daher nicht genau rechtwinklig, sondern je nach der Steigung der Schraubenlinie etwas mehr oder weniger davon abweichend. Der Zeitmasstab wurde 5 bis über 10 mal grösser gewählt als mit dem *SO*, um rasche Spannungsänderungen deutlicher sichtbar zu machen als dies mit dem *SO* möglich ist. In den Figuren ist jeweils nur das Zeitintervall der eigentlichen Abschaltung reproduziert.

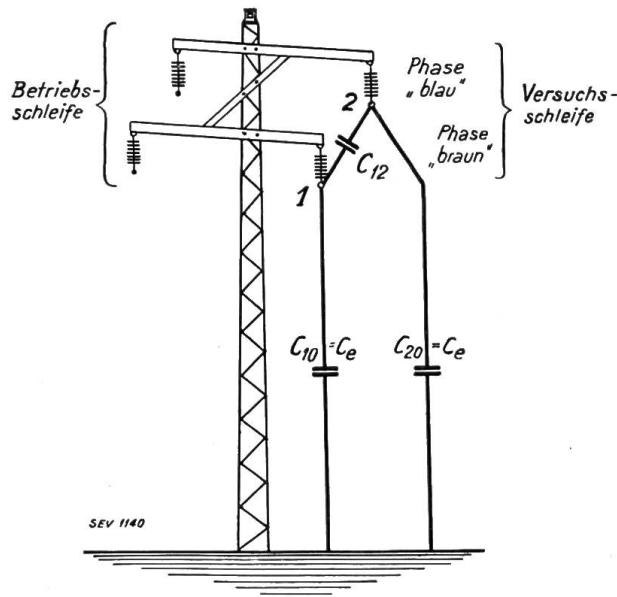


Fig. 2.
Schematisches Mastbild.

3. Einpolige Kurzschlüsse nach Erde.

In den Fig. 3 und 4 (Seite 692 und 693) ist die Spannung der an Erde kurzgeschlossenen Phase bei der Abschaltung dargestellt.

Betrachten wir zunächst Fig. 3. Die Abschaltung dauert 3 volle Halbwellen. Die Lichtbogenspannung des Schalters steigt am Schluss der letzten Halbwelle auf hohe Werte; eine scharfe Löschspitze kommt aber nicht zustande, wie das Kathodenstrahl-Oszillogramm zeigt. Der definitive Stromunterbruch im Schalter geschieht bei Punkt U_1 , was aus dem Schleifen-Oszillogramm noch mit knapper Mühe aus der Lage für Strom- und Spannungskurve ersehen werden kann. Die nun einsetzende *Wiederkehr der Spannung* ist insbesondere aus dem Kathodenstrahl-Oszillogramm ersichtlich. Deren Steilheit verdient wegen der damit im Zusammenhang stehenden Abschalt-Ueberspannungen besonderes Interesse. Zunächst nähert sich die Spannung an der Unterbrechungsstelle vom Löschwert von ca. $32 \text{ kV}_{\text{eff}}$ nicht dem Momentanwert der vorhandenen EMK des Generators, der sich in diesem Zeitpunkt beinahe beim Spannungsmaximum $66 \text{ kV}_{\text{eff}}$ befindet, wie sich aus der Rückwärtsverlängerung der stationären Spannungskurve ergibt. Sondern die Schalterspannung springt in entgegengesetzter Richtung auf ca. $V_{U2} = 45 \text{ kV}_{\text{eff}}$ hoch, täuscht also gewissermassen eine zu hohe „Löschspitze“ vor, und verharrt auf diesem Wert während $1,5 \times 10^{-3} \text{ s}$. Dann springt sie erneut noch etwas höher auf den Wert V_R , um dann erst in der erwarteten Richtung gegen den momentanen Wert der stationären EMK des Kreises einzulaufen.

Nun entspricht die Zeit von $1,5 \times 10^{-3} \text{ s}$ mit sehr guter Näherung derjenigen, die zum Durchlaufen der Uebertragungsleitung bis zum Generator und wieder zurück nötig ist (zweifache Leitungslänge Rapperswil-Vernayaz ca. $432 \text{ km} \cong 1,5 \times 10^{-3} \text{ s}$). Das Kathodenstrahl-Oszillogramm lässt daher die Ursache der Spannungserhöhung zwischen U und R sofort erkennen: Es ist die Spannungserhöhung am Schalter, die durch die Löschstrom-Wanderwelle aufgebaut wird. Als Löschstrom wollen wir jenen Strom bezeichnen, der im Moment des Stromunterbruches im Schalter auf der genannten Leitung noch fliesst. Er bewirkt am Schalter infolge des Stromunterbruchs einen Spannungsanstieg, der sich als rücklaufende Spannungswelle zum Generator hin fortpflanzt, und die dann gewissermassen den im Schalter stattgehabten Stromunterbruch dem Generator meldet. Erst jetzt ist auch für den Generator der Kurzschluss vorbei und die Spannungswiederkehr am Generator beginnt. Trägt man diesen Zeitpunkt ins Kathodenstrahl-Oszillogramm, so gelangt man in die Mitte zwischen U und R . Am Generator-Transformator wird die Rückmeldewelle anfangs überwiegend auf die Leitung zurückgeworfen. Mit ihr wandert der Beginn des Spannungsaufbaues vom Generator aus gegen die Unterbrechungsstelle im Schalter. Die Ankunft am Leitungsende und Oszillographen geschieht im Zeitpunkt R (Rückkehrpunkt der Löschwelle). Jetzt erst beginnt auch dort der vom Generator diktierte Spannungsaufbau des nun in den Leerlauf einschwingenden Kreises.

Die Fortsetzung des Vorganges vom Punkt R an zeigt nun die Geschwindigkeit der Spannungswiederkehr beim Schalter. Da der Strom im Transformator sich etwa beim Nullwert befindet, arbeiten nun Generator und Transformator auf die Leitungskapazität, ähnlich wie wenn die offene Leitung mit dem Leitungsschalter eingeschaltet würde. Der entsprechende Strom durch die Wicklung bildet sich mit der folgenden Zeitkonstante T :

$$T = \frac{L}{R+Z} = \frac{\text{Resultierende Streuung von Generator + Transformator pro Phase}}{\text{Widerstand von Generator + Transformator pro Phase} + \text{Wellenwiderstand } Z} \cong 2 \cdot 10^{-3} \text{ s.}$$

Als treibende Spannung wirkt die Spannung über die Transformatorwicklung, d.h. die momentane Generator-EMK minus die auf der Leitung infolge der Löschwelle

vorhandene Restspannung. Für die kurze Zeit von weniger als $1/_{100}$ s bleibt wohl die EMK des Generators einigermassen konstant; dies gilt aber nicht für die von den Wanderwellen am Transformator erzeugten Spannungen. Jede Wellenankunft verändert die leitungsseitige Spannung am Transformator und damit das Tempo der Stromentstehung durch die Transformatorenwicklung, analog einem Generator mit einer EMK gleich der doppelten Wellenspannung und dem innern Widerstand Z^3). Die Oszillogramme bestätigen die mittlere Zeitkonstante, da sie einen Spannungsaufbau innert ca. 3×10^{-3} s anzeigen, nämlich etwa der vierfachen Laufzeit einer Wanderwelle über die Leitung. Das mittlere Tempo der Spannungswiederkehr gehorcht also in der Tat einer berechenbaren Zeitkonstante, wie das Kathodenstrahl-Oszillogramm zeigt. — Die Front der Löschwelle kann die Transformatorwicklung nicht passieren; sie wird mehrmals am Transformator auf die Leitung zurückgeworfen und erscheint daher mehrmals im KO als schwache Spitze im Abstand der zweifachen Laufzeit der Wellen über die Leitung. Wir werden auf die Erscheinung bei Besprechung der Ueberspannungen noch zurückkommen. Der Spannungsanstieg am Schalter nach Abschaltung des Kurzschlusses erfolgt mit einer Geschwindigkeit von ca. $42 \text{ kV}_{\text{eff}}$ in 10^{-3} s, das sind ca. $6 \times 10^7 \text{ V/s}$.

Im weiteren Spannungsverlauf zeigt sich dann der besser bekannte Teil des Einschwingvorganges des Netzes in den Leerlaufzustand. Wie noch gezeigt werden soll, besitzt das beschriebene 132 kV-Netz zwei Möglichkeiten, Eigenschwingungen auszuführen. Beide Eigenschwingungen kommen infolge der unsymmetrischen Spannungen der beiden Pole gegen Erde im Abschaltmoment zum Vorschein. Das Oszillogramm bestätigt die errechneten Eigenfrequenzen des Netzes von ca. 80 und ca. 160 Per/s, denn die erscheinende Spannungslinie zeigt sich deutlich als aus den zwei genannten Frequenzen zusammengesetzt. Es bleibt noch zu wiederholen, dass dieses Einschwingen anfänglich wanderwellenartig vor sich geht. Dies zeigt sich wieder in dem Kathodenstrahl-Oszillogramm. Die Spannung kehrt stufenweise wieder, die einzelnen Stufen haben eine Breite, die durchwegs der Laufzeit einer elektrischen Welle über die Leitung vom Schalter zum Generator hin und zurück entspricht. Dieser Zeitstrecke entspricht im Kathodenstrahl-Oszillogramm eine Zeitanstrecke von 1,8 mm. Die Geschwindigkeit der Wellen längs der Leitung ergibt sich als wenige Prozent kleiner als die Lichtgeschwindigkeit. Besondere Erwähnung verdient die Höhe und Art der entstandenen *Abschalt-Ueberspannungen*. Wir kommen darauf am Ende der Besprechung der einpoligen Kurzschlüsse noch zurück.

Ganz ähnlich wie beim beschriebenen Oszillogramm der Fig. 3 ist der Spannungsverlauf bei dem unter genau gleichen Umständen aufgenommenen Oszillogramm der Fig. 4. Einzig die Polarität der Halbwelle, in der der Lichtbogen endgültig abreißt (Punkt U), ist umgekehrt. Die mittlere Geschwindigkeit der Spannungswiederkehr ist ungefähr dieselbe wie in Fig. 3, nämlich ca. $36 \text{ kV}_{\text{eff}}$ in 10^{-3} s; die Höhe der entwickelten Ueberspannung ist etwas geringer. Wir kommen darauf noch zurück.

Neu dazu kommt in diesem Oszillogramm eine Rückzündung im Schalter im Zeitpunkt Z. Interessant ist deren Dauer. Sie währt nämlich genau so lange als die entstehende Stromwelle braucht, um zum Generator hin und zum Schalter zurückzulaufen, das sind wieder $1,5 \cdot 10^{-3}$ s. Dieser Zeitspanne entspricht im KO die Zeitanstrecke von 2,3 mm. Während dieser Zeit fällt die Schalterspannung auf kleine Werte ab, die dem Abfall im Lichtbogen entsprechen. Betrachten wir rasch den bei der Rückzündung sich abspielenden *Einschaltvorgang*: Die plötzliche Zündung bedeutet im Schalter einen erneuten Kurzschluss der Leitungsphase an Erde. Vom Leitungsende (Schalter) aus dringt eine Entladewelle gegen den Leitungsanfang (Generator und Transformator) hin vor, welche die Leitung von ihrer Plus-

³⁾ L. Binder. Wanderwellenvorgänge, Berlin, 1928, S. 119.

Spannung entlädt. Für diese steile Entladewelle stellt die Wicklung des Transformators als Drosselpule zuerst ein undurchdringliches Leitungsende dar. Die *Front* der Entladewelle wird daher am Transformator zurückgeworfen mit gleichzeitiger Entladung der Leitung nicht nur auf Spannung Null, sondern unter Umladung auf negative Werte. Sobald nun die gespiegelte Entladewelle auf ihrem Rückweg den Schalter erreicht, tritt dort eine weitere Reflexion ein. Da die beschriebene Welle die Leitung nicht nur auf Null, sondern an ihrer Front auf negative Werte entladen hat, müsste jetzt vom Kurzschlusspunkt eine Ladewelle in die Leitung entsendet werden, welche die übermässige Leitungsentladung wieder aufhebt und die Leitung wieder auf Spannung Null bringt. Das heisst mit andern Worten, dass der Entladewellenstrom im Schalterlichtbogen jetzt durch Null hindurchgeht, um in einen umgekehrt-gerichteten Ladestrom überzugehen. Das Kathodenstrahl-Oszillogramm zeigt, dass bei diesem Stromnulldurchgang der Lichtbogen abreisst. Damit ist der Rückzündungs-Kurzschluss wieder aufgehoben. Er dauerte in der Tat genau die doppelte Laufzeit einer Wanderwelle über die Leitung.

Infolge der Unterbrechung kommt die vom Generator und Transformator her rücklaufende Spannungswelle, die oben beschrieben wurde, im Kathodenstrahl-Oszillogramm zum Vorschein. Die Leitung erweist sich tatsächlich anfangs als umgeladen auf negative Spannung, und zwar auf etwa denselben Betrag, der im Moment der Rückzündung am Schalter vorhanden war, nämlich ca. $60 \text{ kV}_{\text{eff}}$. Dieser Zündspannung gleiche Wert ist nun zwar ein Zufall, der sich nur einstellt, wenn im Zeitabschnitt der Zündung kein Ladestrom über den Transformator bestände. In Wirklichkeit besteht ein beginnender Entladestrom, d. h. ein Spannungsrückgang im Zündungsmoment Z. Die wiederkehrende Spannungsspitze erweist sich denn auch, wie es sein muss, etwas höher als die Zündspannung. Dies wird noch deutlicher, wenn die aus dem Oszillogramm ersichtliche Dämpfung der Wellen durch den Ohmschen Widerstand berücksichtigt wird. Kaum ist die Spannungsspitze von ca. $60 \text{ kV}_{\text{eff}}$ erreicht, so wird schon die beginnende Stromnachlieferung des Transformators merklich, indem die Spannung allmählich gegen den stationären Wert der Transformatklemmenspannung abbiegt. Von da an folgt wieder das bekannte Einschwingen in den stationären Leerlaufzustand des Kreises, das auch hier gekennzeichnet ist durch die zwei gleichzeitig auftretenden Frequenzen 80 und ca. 160 Per/s. Der Wanderwellencharakter tritt in diesem Oszillogramm noch deutlicher zutage als im ersten, weil durch den plötzlichen Stromunterbruch im Schalter die Ladung der gespiegelten Zündwelle auf der Leitung von der Verbindung zur Erde abgeschnitten wurde und sich nun durch fortgesetztes Hin- und Herwandern auf

der Leitung ausgleichen muss. Die Front der vom Transformator her rücklaufenden Entladewelle kehrt infolgedessen noch mehrmals im Kathodenstrahl-Oszillogramm wieder, wobei ihre Steilheit und Höhe jedesmal etwas kleiner geworden sind. Die Steilheit dieser Wellenfront ist zugleich das Mass für die Raschheit des Spannungsanstieges im Schalter, während der Wellenstrom durch Null hindurch geht und

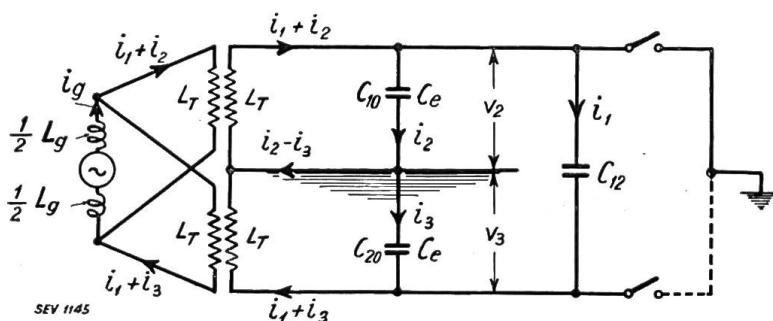


Fig. 5.

Schema zur Berechnung der Eigenschwingungen der Versuchsanlage.

der Lichtbogen abreisst. Wie das Kathodenstrahl-Oszillogramm zeigt, erfolgt nach dem Löschen des Lichtbogens der Spannungsanstieg auf ca. $60 \text{ kV}_{\text{eff}}$ in ca. 10^{-4} s . Das gibt ungefähr $8 \cdot 10^8 \text{ V/s}$ Geschwindigkeit des Spannungsanstieges am Lichtbogen, ohne dass dieser dadurch neu zündet. Die Erscheinung zeigt, wie ausserordentlich rasch der Lichtbogen im Oelschalter entionisiert sein kann. Jedoch ist

dieses Löschen des Lichtbogens beim Wellenstrom-Nulldurchgang nicht jedesmal zu konstatieren. Wir werden darauf noch zurückkommen.

Nachdem die Kathodenstrahl-Oszillogramme den Zustand des Netzes im Moment der endgültigen Stromunterbrechung haben erkennen lassen, muss es möglich sein, den gesamten Spannungsverlauf beim Einschwingen des Netzes in den anschliessenden Leerlaufzustand zu berechnen. Die Oszillogramme haben dabei das Schlussurteil über die Richtigkeit der Rechnung zu liefern. Da dieser Rechnung wegen der Höhe und des Verlaufes der Abschaltüberspannung auch praktische Bedeutung beikommt, soll sie hier angeführt werden. Mit den Bezeichnungen der Fig. 5 ergeben sich für die Spannungen und Ströme folgende Gleichungen, wobei wir quasistationär rechnen, das heisst unter Voraussetzung unendlich grosser Wanderwellengeschwindigkeit auf der Leitung an Stelle der Lichtgeschwindigkeit⁴⁾ und wobei wir ferner die Spannungsübersetzung der Transformatoren zu 1:1 annehmen, d. h. die Kreiskonstanten nach dem Steinmetz-Ersatzschema reduzieren und ferner den Magnetisierungsstrom des Transformators vernachlässigen:

$$2v_o = 2L_g \frac{d}{dt} i_g + L_T \frac{d}{dt} i_g + v_2 + v_3 \quad (1)$$

$$0 = L_T \frac{d}{dt} (i_2 - i_3) + v_2 - v_3 \quad (2)$$

oder als Gleichungen für die Ströme:

$$\frac{1}{C_e} \int (i_2 - i_3) dt = -L_T \frac{d}{dt} (i_2 - i_3) \quad (4)$$

$$2v_o = 2L_g \frac{d}{dt} i_g + L_T \frac{d}{dt} i_g + \frac{1}{C_e} \int (i_2 + i_3) dt \quad (3)$$

ferner gilt: $i_1 = \frac{C_{12}}{C_e} (i_2 + i_3)$, $i_g = 2i_1 + i_2 + i_3 = \frac{2C_{12} + C_e}{C_{12}} i_1 = \frac{2C_{12} + C_e}{C_e} (i_2 + i_3)$

Durch Differenziation ergeben sich die Grundgleichungen für die Ströme, wobei wir zugleich, um die Ausgleichswerte zu erhalten, die Generator-EMK $v_o = 0$ machen:

$$\left. \begin{aligned} i_g &= -(2L_g + L_T)(2C_{12} + C_e) \frac{d^2 i_g}{dt^2} \\ i_2 - i_3 &= -C_e L_T \frac{d^2}{dt^2} (i_2 - i_3) \end{aligned} \right\}$$

Die Gleichungen lassen erkennen, dass das Netz fähig ist, zwei verschiedene Ausgleichsschwingungen auszuführen, deren Frequenzen betragen:

$$f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(2L_g + L_T)(2C_{12} + C_e)}} \text{ Einschaltschwingung des Generators.}$$

$$f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_e L_T}} \text{ Systemschwingung infolge Unsymmetrie beider Phasen gegen Erde.}$$

Für die Ausgleichswerte des Systems ergeben sich unter Vernachlässigung der Dämpfung durch den Ohmschen Widerstand folgende Lösungen:

$$i_g = K_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1), \quad i_1 = \frac{C_{12}}{2C_{12} + C_e} K_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$$

$$i_2 - i_3 = K_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$$

⁴⁾ Eine Berechnung mit Berücksichtigung der Wanderwellen wäre nach einer von Bucksath in E.T.Z. 1923 angegebenen Methode zwar möglich, aber recht zeitraubend und unübersichtlich.

$$\begin{aligned} i_2 &= \frac{C_e}{2 C_{12} + C_e} \cdot \frac{K_1}{2} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \frac{K_2}{2} \sin(\omega_2 t + \varphi_2) \\ v_1 &= -\frac{K_1}{\omega_1 (2 C_{12} + C_e)} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \\ v_2 &= -\frac{K_1}{2 \omega_1 (2 C_{12} + C_e)} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) - \frac{K_2}{2 \omega_2 C_e} \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \end{aligned}$$

Die Konstanten K_1 , K_2 , φ_1 und φ_2 hängen vom Strom- und Spannungszustand des Netzes im Abschaltmoment ab. Hier sind zwei prinzipiell verschiedene Fälle möglich:

a) Die Ströme in den Wicklungen der Transformatoren und Generatoren, d. h. die magnetischen Energien im Moment der Schalterstromunterbrechung sind = 0. Die Systemenergie zu Beginn des Ausgleichsvorganges besteht nur in geladenen Kapazitäten, also elektrischer Energie.

b) Die Unterbrechung im Schalter erfolgt derart, dass im Unterbrechungsmoment noch Ströme in einzelnen Induktivitäten und damit magnetische Energien vorhanden sind. Die Systemenergie zu Beginn des Ausgleichsvorganges besteht in diesem Fall sowohl aus elektrischer als auch magnetischer Energie.

Fall a entspricht einer relativ langsamen, sanften Unterbrechung im Schalter, bei der der Lichtbogenwiderstand langsam anwächst und dadurch dem Strom ermöglicht, bis zum Unterbrechungsmoment sehr angenähert längs der stationären Stromkurve dem Wert 0 zuzulaufen.

Fall b entspricht einer raschen, erzwungenen Abschaltung, bei der der Kurzschlusstrom im Schalter in der letzten Stromhalbwelle rascher dem Wert 0 zustrebt, als im stationären Kurzschlusszustand.

Die Konstanten K und φ ergeben sich für die zwei Fälle wie folgt:

Fall a: $\varphi_1 = 0$, $K_1 = -\Delta V_1 (2 C_{12} + C_e) \omega_1$,
 $\varphi_2 = 0$, $K_2 = (\Delta V_1 - 2 \Delta V_2) C_e \omega_2 = (\Delta V_3 - \Delta V_2) C_e \omega_2$.

Fall b: $\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{-\Delta I_g}{\Delta V_1 (2 C_{12} + C_e) \omega_1} = \frac{-\Delta I_g}{I_g \Delta V_1}$,
 $\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{-(\Delta I_2 - \Delta I_3)}{(\Delta V_2 - \Delta V_3) C_e \omega_2} = \frac{-(\Delta I_2 - \Delta I_3)}{(I_2 - I_3) \Delta V_{23}}$,
 $K_1^2 = \Delta I_g^2 + [\Delta V_1 (2 C_{12} + C_e) \omega_1]^2$,
 $K_2^2 = (\Delta I_2 - \Delta I_3)^2 + [(\Delta V_2 - \Delta V_3) C_e \omega_2]^2$.

Darin bedeuten ΔV und ΔI die Ausgleichswerte der durch die Indizes der Fig. 5 bezeichneten Spannungen und Ströme im Moment des Stromunterbruches im Schalter. Sie ergeben sich als Differenzen der im Abschaltmoment wirklich vorhandenen und derjenigen Werte, die in diesem Augenblick im stationären Endzustand (Leerlaufzustand) vorhanden wären. Erstere Werte sind aus den Oszillogrammen ersichtlich; letztere erhält man durch Rückwärtsverlängerung der stationären Kurve des Endzustandes (Leerlaufzustandes).

Nach Einsetzen der Konstanten erhalten wir für die Ausgleichswerte der Spannungen:

Fall a: $\left. \begin{array}{l} V_1 = \Delta V_1 \cos(\omega_1 t) \\ V_2 - V_3 = (\Delta V_2 - \Delta V_3) \cos(\omega_2 t) \end{array} \right\} V_2 = \frac{V_1}{2} + \frac{V_2 - V_3}{2}$.

Fall b: $\left. \begin{array}{l} V_1 = \Delta V_1 \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_1} \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \\ V_2 - V_3 = (\Delta V_2 - \Delta V_3) \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_2} \cos(\omega_2 t + \varphi_2) \end{array} \right\} V_2 = \frac{V_1}{2} + \frac{V_2 - V_3}{2}$.

Die gegebenen Gleichungen erlauben, den Ausgleichsvorgang genau zu berechnen, abgesehen von den wanderwellenartigen Einzelheiten. Diese können nicht erscheinen, da wir quasistationär gerechnet haben, das heisst unter Voraussetzung unendlich grosser Wellengeschwindigkeit längs der Leitung.

Die Figuren 6 und 7 geben zwei auf diese Weise gerechnete Kurven für die Ausgleichsspannung v_2 einer Phase gegen Erde. Die Dämpfung durch den ohmschen Widerstand ist darin weggelassen; sie könnte einfach durch ein allmähliches Kleinerwerden der Amplituden berücksichtigt werden. Die dargestellte Ausgleichsspannung muss der Leerlaufsspannung des Netzes überlagert werden, um die gesamte Spannung der Phase gegen Erde zu erhalten, wie sie im Oszillogramm zum

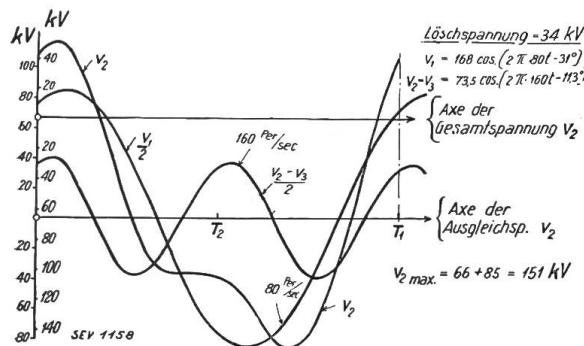
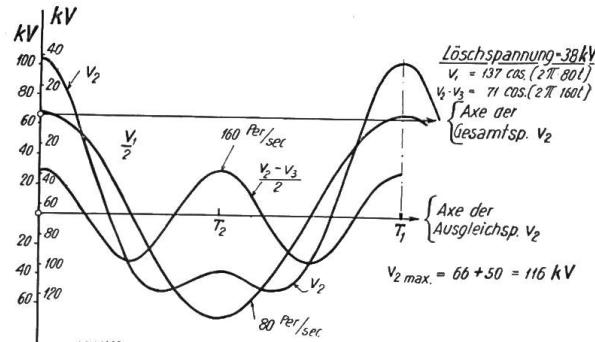


Fig. 6.
Gerechneter Spannungsverlauf nach Abschalten des einpoligen Kurzschlusses.



Vorschein kommt. Da sich der Ausgleich in der Nähe des Maximums der Leerlaufspannung vollzieht, kann an Stelle der Ueberlagerung der Frequenz $16\frac{2}{3}$ einfach die Nulllinie um den Betrag von $66 \text{ kV}_{\text{eff}}$ gehoben werden; damit erhalten wir den Anfang der in den Oszillogrammen aufgenommenen Spannungskurve. Nur dieser Anfang hat praktisches Interesse, weil dort die höchste Ueberspannung auftritt. Die Aufzeichnung auch des weiteren Verlaufes bietet übrigens keinerlei Schwierigkeiten.

Die der Rechnung der zwei Kurven zu Grunde gelegten Werte ΔV_2 sind den Kathodenstrahl-Oszillogrammen der Fig. 3 und 4 entnommen; die übrigen Werte ΔV_1 und ΔI wurden geschätzt. Ihre Messung würde die Aufstellung eines Kathodenstrahl-Oszillographen auch beim Generator erfordern, was bei den Versuchen nicht möglich war.

Fig. 6 entspricht dem Fall b) oder dem Oszillogramm der Fig. 3. Darin ist eine „erzwungene“ Abschaltung dargestellt, bei der im Abschaltmoment in den Generator- und Transformatorwicklungen noch ein Strom fliest, der sich dann in einer Spannungserhöhung an der Leitungskapazität geltend macht. Diese Spannungserhöhung ist sowohl aus Fig. 6, wie aus dem Oszillogramm der Fig. 3, unmittelbar nach Punkt U deutlich zu sehen; sie könnte bei oberflächlicher Betrachtung eine „Löschtspitze“ vortäuschen, die aber nicht in diesem Mass vorkommt. Erst nach dieser Spannungserhöhung biegt die Kurve gegen die stationäre Seite ab und bildet dort zwei Maxima, von denen erst das zweite deutlich ausgesprochen ist, sowohl in der gerechneten wie in der gemessenen Spannungskurve.

Fig. 7 entspricht dem Fall a) oder dem Oszillogramm der Fig. 4. Dies betrifft eine Abschaltung, wo die Ströme in den Wicklungen sehr angenähert längs der stationären Kurzschlusstromkurve dem Wert Null zustreben. Die Spannungserhöhung sogleich nach dem Stromunterbruch im Schalter fehlt hier. Die zwei Maxima, zu denen die Spannungskurve hin schwingt, sind in diesem Fall gleich hoch.

Die Dämpfung der Ausgleichsschwingungen gibt eine Verminderung der erreichten Spannungen um ca. 25 % gegenüber den gerechneten, was infolge des im Kreise liegenden Erd- und Leitungswiderstandes nicht verwunderlich scheint. Immerhin zeigen die wenigen Oszillogramme Spannungen von ca. 1,75-facher normaler

Phasenspannung (114 kV), welcher Wert sich bei grösserer Anzahl der Beobachtungen vermutlich noch etwas erhöhen würde.

Zusammenfassend können wir sagen: Im betrachteten dämpfungsfreien Stromkreis können beim Abschalten einpoliger Kurzschlüsse im schlimmsten Fall Abschaltspannungen von ca. 120 kV_{eff} gegen Erde entstehen, sofern der Schalter dem Strom in der letzten Halbwelle das Ausklingen längs der stationären Kurzschlusstromkurve gestattet. Die Dämpfung verringert diese Spannung schätzungsweise auf ca. 100 kV_{eff}. Bei zu rascher Abschaltung können diese Werte wesentlich überschritten werden, wie die Rechnung zeigt. Diese Erhöhung der Abschaltüberspannung ist dann in erster Linie vom Schalter verursacht.

Der Vergleich der Oszillogramme und der gerechneten Spannungskurven zeigt, dass für das vorliegende Netz mit $16\frac{2}{3}$ Per/s die Ausschaltgeschwindigkeit des Schalters bereits so hoch ist, dass eine Steigerung nicht mehr zulässig wäre wegen der dadurch bedingten Erhöhung der Abschaltüberspannung. Das noch in zulässigen Grenzen bleibende Tempo des Stromrückganges im Schalter ist aus dem Schleifen-Oszillogramm der Fig. 3 ersichtlich; es erfolgt dort bereits etwas rascher als längs der stationären Stromkurve. Darin liegt eine Bestätigung der gemessenen und gerechneten Spannungskurven.

Vergleichen wir zum Schluss die mit den beiden Oszillographen erhaltenen Oszillogramme, so ist ersichtlich, dass sich beide in wertvoller Art ergänzen. Der Schleifen-Oszillograph gibt das altgewohnte und daher heute leicht leserliche Gesamtbild des Vorganges. Er lässt aber gerade im kritischen Abschaltmoment die Einzelheiten, welche die zweifellose Erkennung der Vorgänge ermöglichen, nicht erkennen. Dies einmal wegen seiner Massenträgheit und zweitens auch wegen der ungenügenden Helligkeit seiner Lichtquelle, wodurch der Strich gerade im kritischen Moment unsichtbar wird. Das Kathodenstrahl-Oszillogramm dagegen lässt alle Einzelheiten erkennen; insbesondere ermöglicht es wanderwellenartige und plötzliche Spannungsveränderungen deutlich zu unterscheiden von langsamern Anstiegen infolge Stromentstehung über Wicklungen. Seine Strichhelligkeit ist so gross, dass auch die raschesten Spannungszusammenbrüche sichtbar gemacht werden können. Eine Massenträgheit kommt bei ihm nicht in Frage.

4. Kurzschluss beider Phasen.

Während die beschriebenen einpoligen Kurzschlüsse nach Erde stets harmlos abgeschaltet wurden, zeigten sich bei der Abschaltung zweipoliger Kurzschlüsse ganz unerwartete Ueberspannungen, die sich in der Länge der Abschaltzeit und in Ueberschlägen an verschiedenen Stellen des 132 kV-Netzes nur zu deutlich bemerkbar machten. Die mit dem Schleifen-Oszillographen aufgenommenen Bilder wiesen im Verlaufe der Abschaltung eine Reihe von Rückzündungen nach, deren Ursache aber auf Grund dieser Oszillogramme nicht gefunden werden konnte. Die in der Folge mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen erhaltenen Oszillogramme liessen dann erkennen, dass es sich um eine durch das Zusammenwirken von Netzkonfiguration und Lichtbogeneigenschaften bedingte Ueberspannungserregung bei der Kurzschlussabschaltung handelte, die den Abschaltvorgang wegen der entstehenden Rückzündungen erschwerte und die zu den konstatierten Ueberschlägen in andern Anlage-teilen führte. Die Bauart des verwendeten Schalters spielte innerhalb der Versuchsgrenzen keine Rolle, was die Oszillogramme nachweisen.

Die Erkenntnis des Vorganges zeigt, dass sich dieselbe Erscheinung auch in andern Hochspannungsnetzen in bestimmten Schaltungszuständen erwarten lässt. Der Weg zur Abhilfe ist durch die Versuche gegeben. Einige Oszillogramme sollen im folgenden besprochen werden.

a) Kurzschlüsse beider Phasen nach Erde.

Die Fig. 8 und 9 stellen zwei Oszillogramme dar für die Spannungen an einem der beiden Schalterpole nach Fig. 1, die zugleich Phasenspannung gegen Erde und

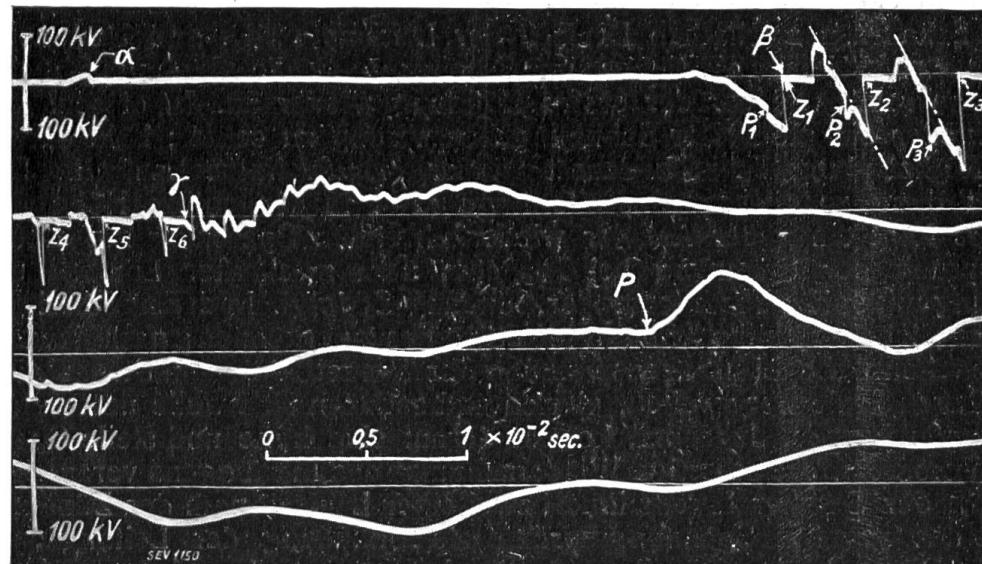
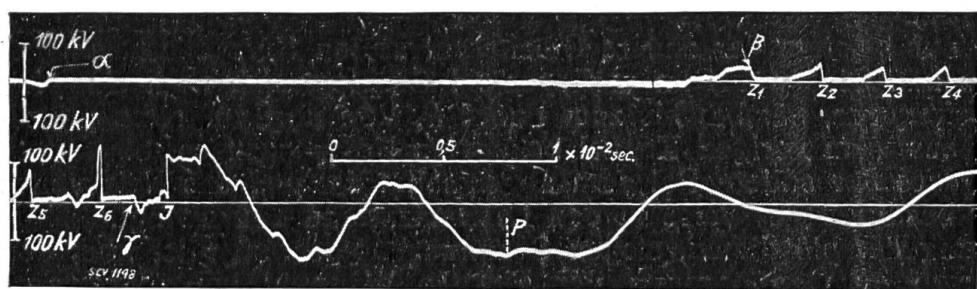
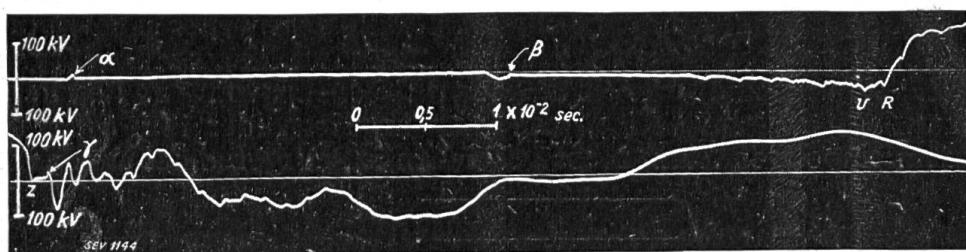
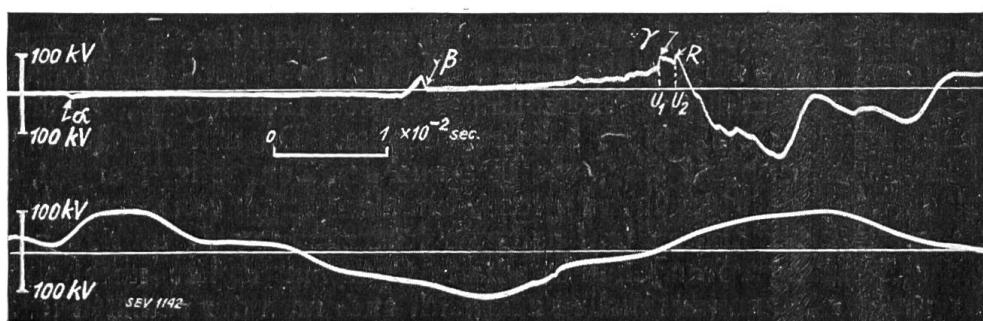
Lichtbogenspannung eines Schalterpols ist. Beide Figuren gelten für relativ günstig verlaufene Abschaltungen. Fig. 8 zeigt in der letzten Halbwelle vor der Unterbrechung des gemessenen Schalterpols mehrere Rückzündungen des Lichtbogens, zunächst ohne aus der Spannungskurve ersichtliche äussere Ursache. Da seit der Kontaktöffnung erst zwei Halbwellen vorbei sind, wie sich aus den Zündspitzen ergibt, so ist die Kontaktdistanz noch nicht genügend gross, um den definitiven Stromunterbruch zu ermöglichen. Bei der fünften und sechsten Rückzündung Z_5 und Z_6 zeigt sich deutlich eine der Zündung vorangehende scharfe Spannungsspitze nach oben. Ein analoger, sehr rascher Spannungsanstieg zeigt sich auch nach der sechsten Rückzündung nach dem letzten definitiven Stromunterbruch dieses Schalterpols, im Punkt I_3 , ohne dass es dabei zu weiteren Rückzündungen im Schalter kommt. Die allmähliche Zunahme der Zündspannung ist deutlich zu ersehen. Die Spannung verharret dann auf etwa demselben Wert während genau derjenigen Zeit, die zum Durchlaufen der Leitung bis zum Generator und zurück nötig ist. Nach einem weiteren schwachen Hochsprung biegt die Kurve ab und es folgt der abgerundete Einschwing-Vorgang des Netzes in den Leerlaufzustand mit einer neuen Frequenz von ca. 120 Per/s. Diese Frequenz kann auf analoge Weise, wie dies an Hand der Fig. 5 für das Einschwingen aus dem einpoligen Kurzschluss geschehen ist, ausgerechnet werden zu:

$$f_3 = \sqrt{\frac{1}{\left(L_T + \frac{L_T L_g}{L_T + L_g}\right) C_e}}.$$

Die Formel kann mit einiger Uebung ohne Rechnung aus dem Schema abgelesen werden. Es ergibt sich mit den unter 3. angegebenen Werten: $f_3 \approx 120$ Per/s. Dieser Wert gilt nur solange der andere Schalterpol seinen Kurzschlusstrom noch nicht unterbrochen hat. Dies währt im vorliegenden Oszillogramm noch eine Halbwelle der Betriebsfrequenz, nämlich bis zum Punkt P . Von dort an treten plötzlich wieder die zwei aus dem vorigen Kapitel bekannten Frequenzen ca. 80 und 160 auf, was anzeigt, dass der andere Pol auch abgeschaltet hat und das Netz von da an auf die früher beschriebene Weise in den Leerlaufzustand einschwingt.

Die Erscheinung der plötzlichen, steilen Spannungshochsprünge ist noch deutlicher wahrzunehmen im Oszillogramm der Fig. 9. Während bei allen andern Versuchen nur ein Generator und ein Transformatorm in Vernayaz die Leitung speiste, waren es in diesem Falle zwei parallele Einheiten.

Ein erster kleiner Spannungssprung ist ersichtlich schon beim ersten Anstieg der wiederkehrenden Spannung bei Punkt P_1 . Dann folgt eine erste Zündung Z_1 . Nach der bereits bekannten zweifachen Laufzeit der Leitung wird deren Umladung ersichtlich infolge des Stromunterbruches im Schalter, und die Spannung steigt ungefähr doppelt so rasch wie vor der ersten Zündung wieder an. In diesem Anstieg ist bei P_2 wieder ein plötzlicher Spannungshochsprung zu sehen; bald darauf folgt die zweite Rückzündung Z_2 . Sie dauert wieder die zweifache Laufzeit. Die Umladung kommt dann zum Vorschein, allerdings nicht in der vollen Höhe der Zündspannung. Es folgt ein neuer Ast der wiederkehrenden Spannung mit einem plötzlichen Hochsprung der Spannung bei P_3 , dem nach zweifacher Laufzeit ein weiterer Hochsprung mit sofort anschliessender Zündung Z_3 folgt. In der nachherigen Lichtbogenspannung ist deutlich die Richtung des Stromes zu erkennen; nach jeweils zweifacher Laufzeit kehrt die Lichtbogenspannung ihr Vorzeichen, der Strom also seine Richtung. Gegen Ende der zweiten, vierten und sechsten Halbwelle unterbricht der Schalterlichtbogen jeweils. Jedesmal kommt darauf eine hohe und steile Spannungsspitze zum Vorschein, die sofortige Wiederzündung des Lichtbogens veranlasst. Nach Z_6 unterbricht der Schalter bereits innert zweifacher Laufzeit nach der Zündung definitiv, worauf der negative Spannungssprung als Umladung der Leitung zum Vorschein kommt. Diese Spannungsspitze wandert jetzt mehrmals auf der offenen Leitung hin und her; sie kommt jeweils nach zweifacher Laufzeit wieder in Rup-



Sich in den Oszillogrammen α und β entsprechende Punkte sind mit a , β , γ bezeichnet.

Fig. 3 b.
Abschalten eines
einpoligen Kurz-
schlusses nach
Erde.
Schleifenoszillo-
gramm.

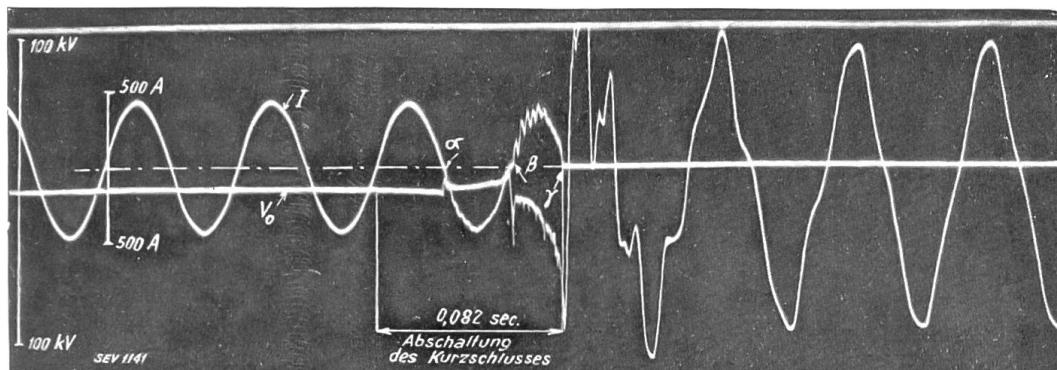


Fig. 4 b.
Abschalten eines
einpoligen Kurz-
schlusses nach
Erde.
Schleifenoszillo-
gramm.

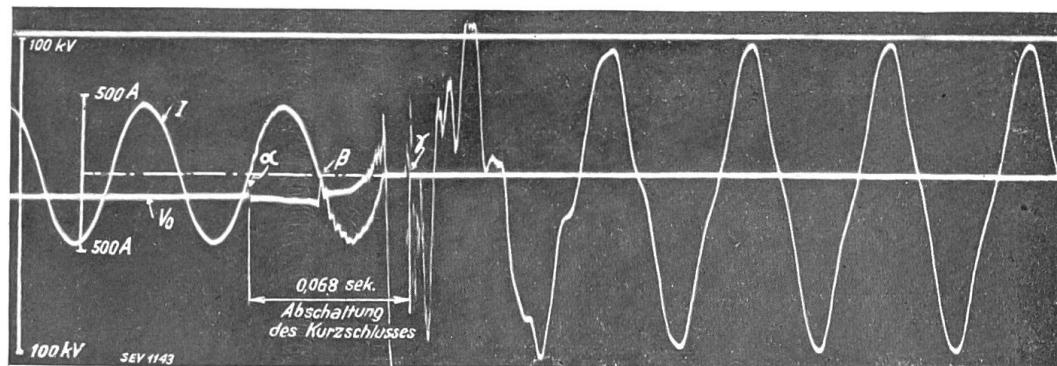


Fig. 8 b.
Abschalten eines
zweipoligen
Kurzschlusses
nach Erde.
Schleifenoszillo-
gramm.

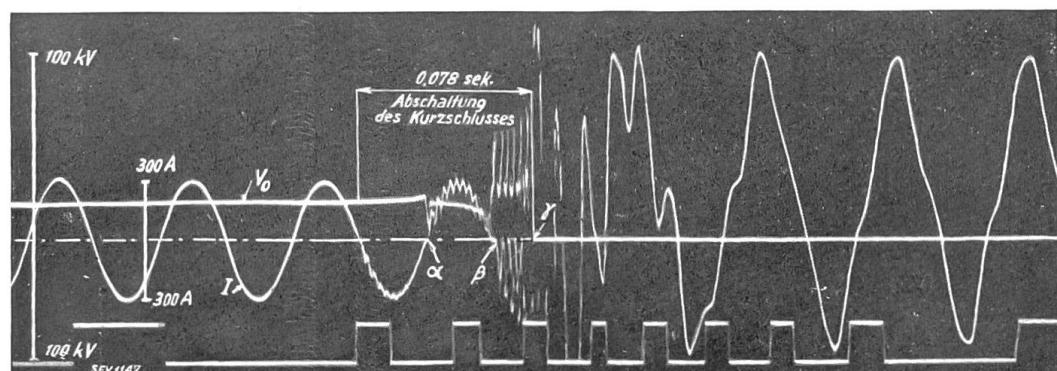
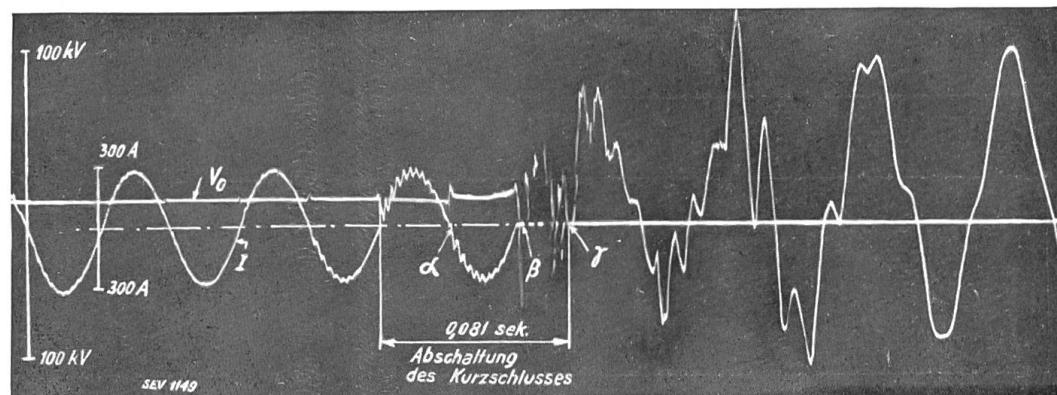


Fig. 9 b.
Abschalten eines
zweipoligen
Kurzschlusses
nach Erde.
Schleifenoszillo-
gramm.



Sich in den Oszillogrammen a und b entsprechende Punkte sind mit α , β , γ bezeichnet.

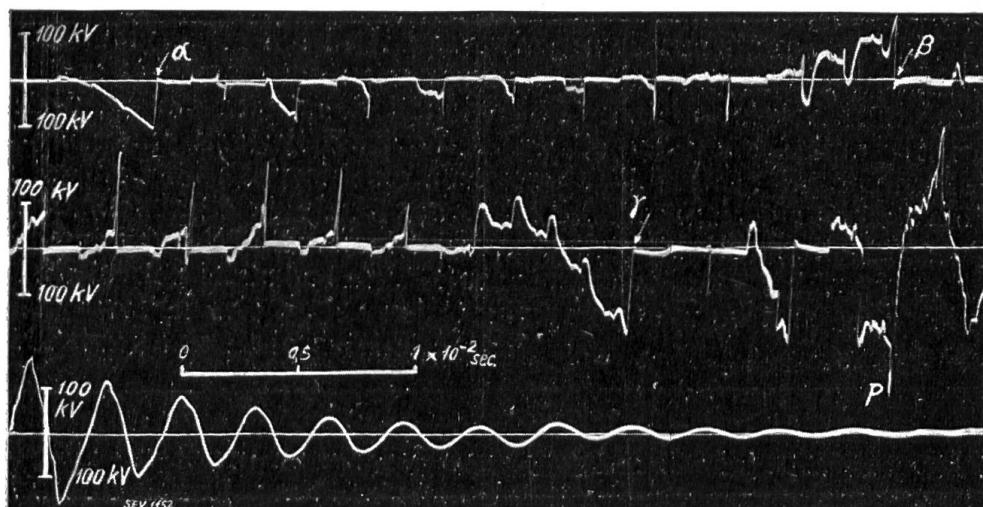


Fig. 10 a.
Abschalten eines zweipoligen Kurzschlusses nach Erde.
Kathodenstrahlzosillogramm.

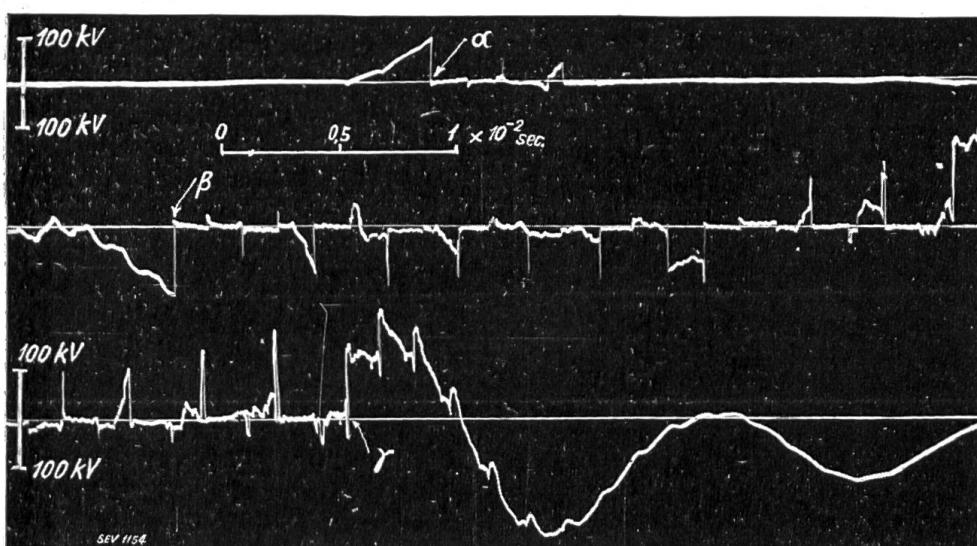


Fig. 11 a.
Abschalten eines zweipoligen Kurzschlusses ohne Erde.
Kathodenstrahlzosillogramm.

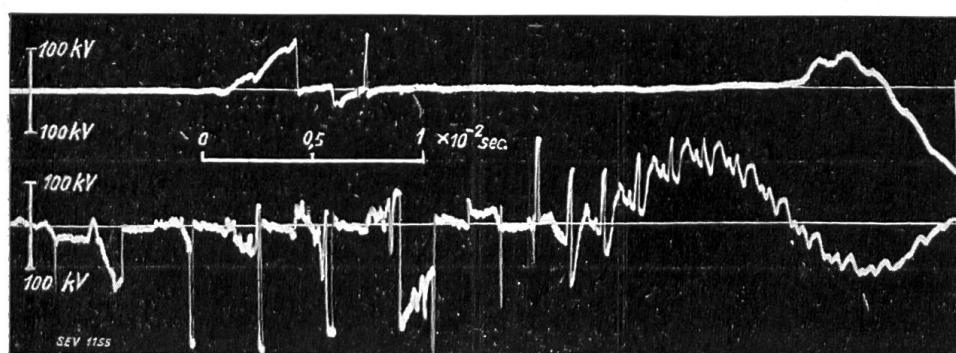


Fig. 12.
Abschalten eines zweipoligen Kurzschlusses ohne Erde.
Kathodenstrahlzosillogramm.

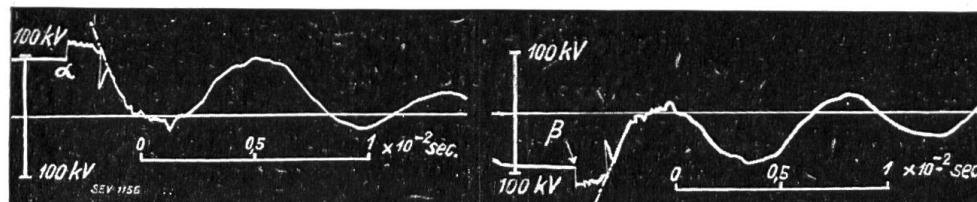


Fig. 13.
Zwei Influenzspannungserhöhungen.
Kathodenstrahlzosillogramm

Sich in den Oszillogrammen *a* und *b* entsprechende Punkte sind mit *a*, *b*, *γ* bezeichnet.

Fig. 10 b.
Abschalten eines zweipoligen Kurzschlusses nach Erde.
Schleifenoszillogramm.

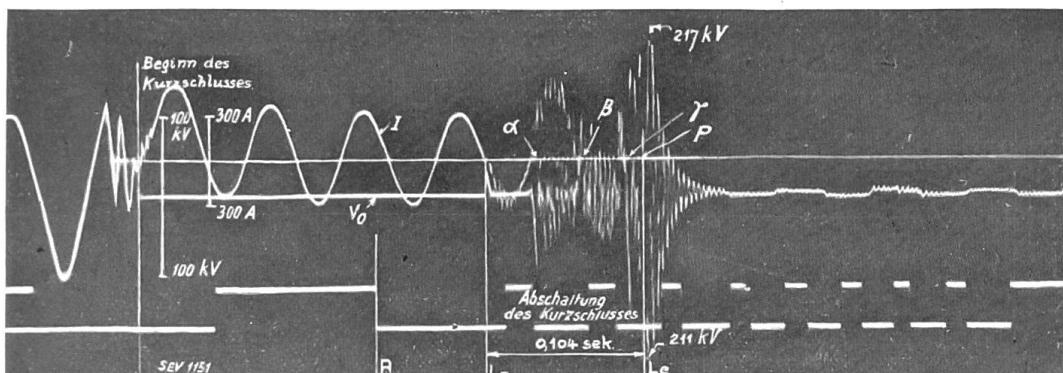
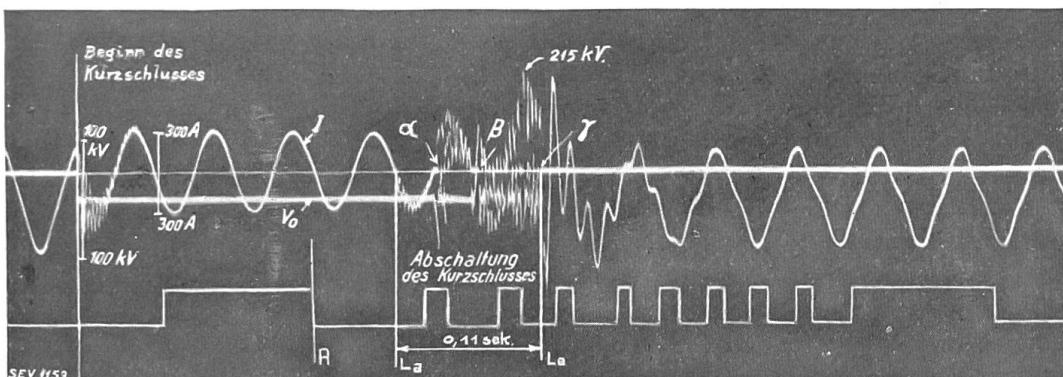


Fig. 11 b.
Abschalten eines zweipoligen Kurzschlusses ohne Erde.
Schleifenoszillogramm.



Sich in den Oszillogrammen *a* und *b* entsprechende Punkte sind mit *a*, *b*, *γ* bezeichnet.

perswil zum Vorschein, mit allmählich abgeflachter Front und abnehmender Höhe. Die anschliessende Schwingung hat wieder ca. 120 Per/s, bis nach zwei Halbwellen der Betriebsfrequenz auch der andere Pol abgeschaltet hat und sich dann die aus 80 und 160 Per/s zusammengesetzte Spannungskurve des Einschwingens in den Leerlaufzustand des Netzes einstellt.

Anschliessend sei noch ein Oszillogramm angeführt, das mit einem Schalter anderer Bauart unter genau denselben Versuchsbedingungen aufgenommen wurde. Bei den bisherigen Versuchen war der Schalter ein Löschkammerschalter mit Zweifach-Unterbrechung. Das folgende Oszillogramm der Fig. 10 stammt von einer Abschaltung mit einem Oelschalter ohne Löschkammern und Sechsach-Unterbrechung. Zugleich ist die Figur ein Beispiel einer nicht harmlos verlaufenen Abschaltung, indem im Punkte *P* ein Ueberschlag mit Lichtbogen am andern Leitungsende auftrat, der innert zwei Sekunden von selbst wieder abriss. Im Oszillogramm erscheint zunächst eine ununterbrochene Lichtbogenhalbwelle. In der zweiten beginnen nach einem ersten Anlauf der wiederkehrenden Spannung bereits die Rückzündungen; es sind neun solche in dieser Betriebshalbwelle. In der nächsten läuft zuerst die Spannung wieder an, bricht aber wieder zusammen; es gibt acht Zündungen in dieser Halbwelle. Nach einem neuen Ast der wiederkehrenden Spannung beginnen auch in der vierten Halbwelle die Rückzündungen wieder, begünstigt durch die von der dritten Halbwelle her verbliebene Restspannung auf der Leitung. In der vierten Halbwelle ergeben sich dann infolge der bereits grossen Kontaktöffnung recht hohe Ueberspannungen, die im Punkte *P* zum Ueberschlag der Leitung führen. Die Lage des entstandenen Leitungskurzschlusses ergibt sich aus der Frequenz der aus dem Oszillogramm ersichtlichen Entladeschwingung als kurz vor dem Kraftwerk Vernayaz befindlich, was durch die dortige Lärmbeobachtung bestätigt wird. Die mit dem Oszillographen gemessene Spannungsspitze beträgt in Rapperswil noch ca. das 3,5-fache des normalen Wertes, das sind ca. $230 \text{ kV}_{\text{eff}}$ resp. ca. 330 kV Scheitelwert gegen Erde. Aus der Tatsache, dass die Ueberschlagsspannung der Isolatorenketten

grösser ist als diese Werte, muss geschlossen werden, dass die Spannung an der Ueberschlagsstelle die in Rapperswil gemessene noch übertrifft.

Das Oszillogramm zeigt genau wie die vorigen die typischen Spannungshochsprünge, die stets im Zeitpunkte $4T$ nach erfolgter Rückzündung vorkommen ($T =$ einfache Laufzeit einer Wanderwelle über die Leitung Rapperswil-Vernayaz). Im letzten Bild zeigt sich noch etwas deutlicher als in den ersten zwei, dass der Zeitpunkt der Lichtbogenlöschung im Schalter meistens mehr als die zweifache Laufzeit gegen den Zündmoment verschoben ist; durchwegs liegt er zwischen $2T$ und $4T$ nach erfolgter Rückzündung. Bevor wir auf die Erklärung der Erscheinung eingehen, wollen wir noch zwei Oszillogramme von Kurzschlussabschaltungen ohne Verbindung mit Erde anführen.

b) Kurzschluss zwischen beiden Phasen ohne Verbindung zur Erde.

Wir erwähnen zuerst das Oszillogramm der Fig. 11, das wie jenes der Fig. 10 mit dem Oelschalter mit Sechsach-Unterbrechung erhalten wurde. Dargestellt ist die Spannung einer Phase gegen Erde, wie in Fig. 1 gezeichnet ist. Die dort gestrichelte Erdung in Rapperswil war entfernt worden. Der Strom beider Phasen ist jetzt zwangsläufig entgegengesetzt gleich gross. Die gemessene Spannung hat als Lichtbogenspannung keine unmittelbare Bedeutung mehr, weil beide Schalterpole in Serie geschaltet und ihre Mitte nicht geerdet ist. Die Oszillogramme zeigen nichts prinzipiell Neues. Zeitpunkt und Steilheit der plötzlichen Spannungshochsprünge, sowie Löschzeitpunkt nach erfolgter Rückzündung sind etwa dieselben. Auch die mit dem Löschkammerschalter in dieser Versuchsschaltung aufgenommenen Oszillogramme zeigen denselben Charakter der Spannung. Ein wesentlicher Unterschied bestand in keiner Beziehung; auf die Wiedergabe weiterer Oszillogramme kann verzichtet werden.

Weiter wurde noch untersucht, ob die starre Erdung der Mitte des speisenden Transformatoren in Vernayaz irgend einen Einfluss auf den Vorgang habe. Fig. 12 gibt ein mit dem Löschkammerschalter aufgenommenes Oszillogramm, wobei vorher die Erdung des speisenden Transformatoren in Vernayaz (siehe Fig. 1) entfernt worden war, so dass die 132 kV-Leitung nunmehr nirgends mehr mit der Erde in leitender Verbindung stand als über die Spannungswandler der vier Werke längs der Leitung. Die Spannung ist wieder nach dem Schema der Fig. 1 gemessen, d.h. zwischen einer Phase und Erde. Man ersieht aus dem Bild ohne weiteres den prinzipiell ganz gleichen Verlauf der Erscheinung beim Abschalten des Kurzschlusses. Die nach erfolgter Abschaltung auftretende freie Schwingung besitzt in den letzten zwei Bildern denselben Frequenzwert, wie er sich beim Einschalten der offenen Leitung ergibt, nämlich ca. 80 Per/s. Es ist der kleinere der bereits aus den Fig. 3 und 4 bekannten Werte 80 und 160 Per/s.

5. Erklärung der Ueberspannungserscheinung.

Zur Erklärung verhilft vor allem die grosse Steilheit der auftretenden Spannungssprünge. Es kann sich demnach nur um Wellenvorgänge auf der Leitung handeln, weil die Ströme über die Transformatorenwicklungen nicht so rasch variieren können infolge der grossen Drosselwirkung des Transformatoren. In Betracht gezogen wurden zuerst die von einer Phase auf der andern induzierten *Influenzwanderwellen*. In Fig. 13 ist der gemessene Spanningsverlauf auf einer Phase dargestellt, wenn die andere Phase in ihrem Schalterpol plötzlich an Erde kurzgeschlossen wird.

Wie man sieht, entsteht auf dem nicht geerdeten Leiter eine sprunghafte Spannungserhöhung während genau der zweifachen Laufzeit einer Welle über die Leitung. Da im gemessenen Einphasennetz die erdgeschlossene Phase genau entgegengesetzt gleiche Spannung hat wie die gemessene, kann man ohne weiteres aus der Figur die relative Spannungserhöhung ablesen.

Die Höhe der induzierten Welle zur induzierenden Zündspannung verhält sich wie $1 : 3,7 = 0,27$. Dieser Wert stimmt ziemlich gut mit dem gerechneten überein, der sich nach Fig. 2 ergibt zu⁵⁾ $\frac{1}{C_{10}} : \left(\frac{1}{C_{10}} + \frac{1}{C_{12}} \right) = \frac{C_{12}}{C_{10} + C_{12}} = 0,26$.

Die Form der Influenzspannungskurve entspricht dem erwarteten Werte, abgesehen von einer aufgesetzten Spitze des Spannungsrückgangs, zur Zeit $2T$. Dieser Hügel ist in der Figur über der gestrichelten Linie deutlich zu ersehen. Der Zeitpunkt der Spitze lässt vermuten, dass es sich dabei um einen durch den plötzlichen Kurzschluss der andern Phase vom Transformator erzeugten Vorgang handelt. Die regelmässig auf einer nicht geerdeten Phase bei plötzlichen Erdschlüssen der andern auftretenden Influenzspannungshügel lassen zuverlässig Zeitpunkt und Höhe der Zündspannung der nicht gemessenen Phase erkennen. Die Höhe der Influenzüberspannung ist aber zu klein, um die gemessenen Spannungshochsprünge der Oszillogramme zu erklären. Ueberdies käme diese Erklärung nur bei zweipoligen Kurzschlüssen nach Erde in Frage, während sich die gleiche Erscheinung auch bei andern Schaltungen gezeigt hat.

Die wesentliche Erscheinung zur Erklärung der Ueberspannungen ergibt sich aus dem Zeitpunkt des jeweiligen Stromunterbruches im Schalter nach erfolgten Rückzündungen und aus dem Zeitpunkt $4T$, wo der plötzliche Spannungshochsprung stets eintritt. Betrachten wir an Hand der Fig. 14 zunächst den sich abspielenden Vorgang, sofern im Zeitabschnitt der Zündung kein Transformatorenstrom fliesst. Die ganze Leitung sei im Zeitpunkt der Zündung aufgeladen auf die Spannung $+V_0$ (Fig. a). Wie bei den einpoligen Kurzschlüssen beschrieben wurde, entlädt die Rückzündung zunächst die ganze Leitung (Fig. b). Die Reflexion der Entladewelle am andern Leitungsende (Vernayaz) bedingt zuerst dort die Umladung der Leitung. Nach zweifacher Laufzeit $2T$ ist die ganze Leitung umgeladen auf $-V_0$ (Fig. c). Nun wird vom Kurzschlusspunkt eine Ladewelle $+V_0$ in die Leitung entsendet, wobei der Lichtbogenstrom durch Null hindurchgeht und seine Richtung umkehrt. Reißt der Lichtbogen dabei nicht ab, so entsteht dieser Ladestrom; im Oszillogramm kehrt sich die Polarität der Lichtbogenspannung um (Fig. d). Zur Zeit $3T$ (Fig. e) kommt die Ladewelle in Vernayaz an und wird dort in der Folge am Transformator gestaut auf das doppelte des Spannungswertes (Zeitpunkt $3\frac{1}{4}T$ in Fig. f), wobei die totale Spannung dort von $-V_0$ auf $+V_0$ aufspringt. Nach einer weiteren Laufzeit, also im Zeitpunkt $4T$, langt die reflektierte Ladewelle wieder beim Schalter und Oszillographen an. Nun zeigen die Oszillogramme fast durchwegs eine Stromunterbrechung im

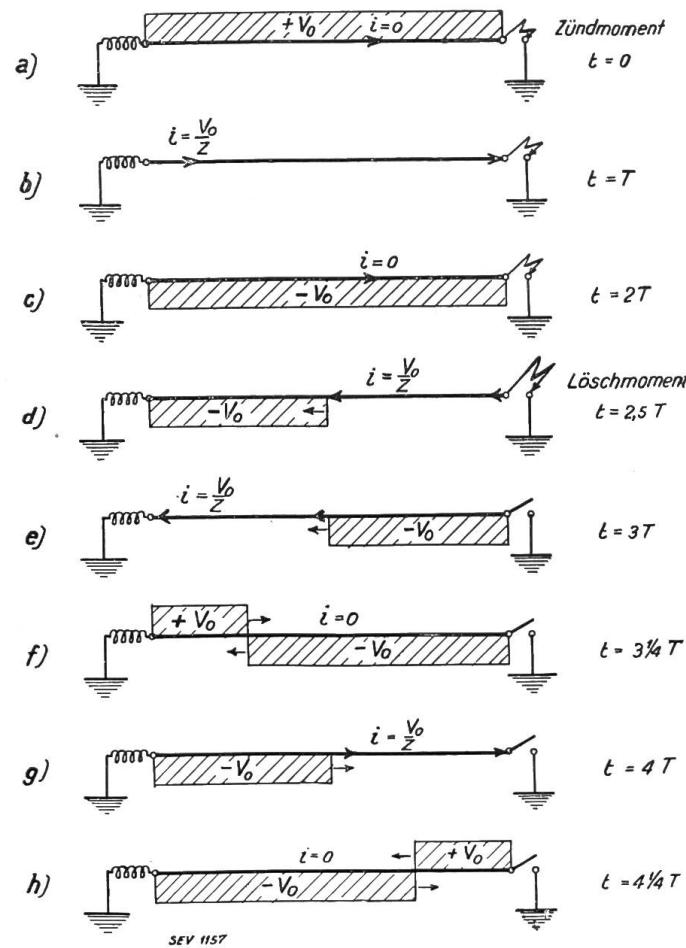


Fig. 14.
Erklärung des Spannungshochsprungs im Zeitpunkt $4T$ nach
erfolgter Rückzündung.

⁵⁾ R. Rüdenberg, Elektr. Schaltvorgänge, 1923, S. 394.

Schalter zwischen $2T$ und $4T$, deren Ursache wir noch erkennen werden. Die genannte Ladewelle wird deshalb als begrenzte Ladewelle nur während eines Bruchteiles von $2T$ in die Leitung geschickt. Ausserdem trifft ihr Kopf im Zeitpunkt $4T$ beim Schalter nicht mehr auf Erde, sondern auf ein inzwischen geöffnetes Leitungsende. Derselbe Reflexionsvorgang wie vorher in Vernayaz vollzieht sich jetzt hier: Die Spannung springt infolge der Stauung am offenen Schalter plötzlich von $-V_0$ auf $+V_0$ in die Höhe. Das ist der doppelte Betrag der Zündspannung, der jetzt als Sprung auftritt. Damit ist der in Oszillogrammen ersichtliche plötzliche Spannungshochsprung im Zeitpunkt $4T$ aufgeklärt, der, wie beschrieben, annähernd den doppelten Betrag der jeweiligen Zündspannung erreichen kann.

Im Beispiel ist angenommen, dass der Lichtbogen zur Zeit $2,5T$ lösche. Die in die Leitung entsandte Ladewelle ist dann eine Sprungwelle von der Höhe $+V_0$ und der Länge der halben Leitung. Die Spannungsverteilung im Zeitpunkt $3T$ ist aus Fig. e, der Zeitpunkt $3\frac{1}{4}T$ aus Fig. f, $4T$ aus Fig. g und endlich der Zeitpunkt $4\frac{1}{4}T$ aus Fig. h ersichtlich, sofern der Schalter bei der aufgetretenen Spannungs-erhöhung nicht inzwischen neu gezündet hat. Sofern der Lichtbogen im Zeitabschnitt $6T$ bis $8T$ nach erfolgter Neuzündung wieder abreisst, kann dieses Wellenspiel sich in entsprechender Weise fortsetzen. Unerklärt blieb bisher die Ursache des Strom-unterbruches im Schalter zwischen $2T$ und $4T$, $6T$ und $8T$ usw. Um diese Erscheinung noch zu verstehen, lassen wir jetzt die gemachte Voraussetzung fallen, dass der Transformatorstrom gleich Null sei. Man erkennt, dass bei der ersten Zündung, die beim Wiederanstieg der Spannung erfolgt, die Richtung des Transformatorstromes derart ist, dass dieser zwischen $2T$ und $4T$ den im Schalter fliessenden Ladewellen-strom ganz oder teilweise aufheben kann. Auch bei jeder weiteren Zündung beginnt der Transformator vom Zeitpunkte T an Strom nachzuliefern, womit vom Zeitpunkt $2T$ an nach der Zündung der Totalstrom im Schalter ganz oder annähernd auf Null zurückgeht und der Lichtbogen löscht. Damit ist die Leitung dort von Erde geöffnet und die Möglichkeit zum Spannungshochsprung geschaffen. Das Fliessen des Trans-formatorstromes während des Zündspiels bewirkt ferner die allmähliche Leitungs-aufladung, so dass auch im Löschenmoment nicht die Spannung $-V_0$ zum Vorschein kommt, sondern weniger, gerade so, wie die Oszillogramme dies zeigen.

Der Vorgang liesse sich auch durch ein mechanisches Modell veranschaulichen, wo nämlich ein langgestrecktes Reservoir (Leitungskapazität) auf der einen Seite über eine träge Leitung (Transformatorinduktivität) gefüllt, und auf der andern Seite durch ein Ueberdruckventil mit steigender Federspannung (öffnender Oelschalter) entleert wird. Die Ueberspannungen im elektrischen Falle entstehen gewissermassen, weil zeitweise die Leitung nicht nur von der Generatorseite, sondern auch vom Kurzschlusspunkte aus aufgeladen wird.

Die Erklärung zeigt auch, dass die grossen Ueberspannungen überwiegend an den Leitungsenden auftreten, erstmalig am Transformator, dann am Schalter. Auf dem mittleren Teile der Leitung entsteht dieselbe hohe Spannung nur, wenn der Löschenmoment erst kurz vor dem Zeitpunkt $4T$ liegt. Die Versuche ergaben in dieser Hinsicht zwei Ueberschläge am transformatorseitigen Ende der Leitung (Ver-nayaz), zwei Ueberschläge am schalterseitigen Ende (Rapperswil) und ein Ueber-schlag etwa in der Mitte der Leitung (Kerzers). Ergänzend muss gesagt werden, dass die Ueberschlagsspannung der 7-gliedrigen Hängekette der $132 \text{ kV}_{\text{eff}}$ - Leitung mit beidseitigen Lichtbogenhörnern im trockenen Zustand bei 50 Per/s $270 \text{ kV}_{\text{eff}}$, bei 40 000 Per/s $340 \text{ kV}_{\text{eff}}$ beträgt. Die Prüfspannung der Transformatoren betrug $280 \text{ kV}_{\text{eff}}$ bei 50 Per/s, jene des schwächsten Teiles der Anlage, nämlich der Spannungs-wandler in Puidoux, Kerzers und Rapperswil $170 \text{ kV}_{\text{eff}}$.

Auf die genaue mathematische Formulierung der Entstehungsbedingungen der Ueberspannung kann hier nicht eingegangen werden. Die Formulierung ist ziemlich einfach, solange das Löschen des Lichtbogens ausschliesslich und momentan beim Stromnulldurchgang vorausgesetzt wird. Es ergibt sich, dass Gefahr nur in einem

engbegrenzten Gebiet vorhanden ist, sofern nämlich folgende Bedingung annähernd erfüllt ist:

$$\frac{L}{2T} \cong 4Z,$$

wobei L = Streuinduktivität der speisenden Maschinen- und Transformatorengruppe,
 T = Laufzeit einer Welle vom Kraftwerk bis zum Kurzschlusspunkt,
 Z = Wellenwiderstand der Uebertragungsleitung (in unserem Falle sehr ange-
nähert 500 Ohm).

In praktischen Einheiten heisst dieselbe Bedingung, dass ungefähr sein muss:

$$P \cong 120 \cdot \frac{V_p^2 m p}{f \cdot D}$$

wobei P = Leistung der auf die Leitung arbeitenden Einheiten in kVA,
 V_p = Phasenspannung des Netzes in kV,
 m = Phasenzahl (symmetrischer Einphasenstrom $m = 2$),
 p = Kurzschlussspannung der auf die Leitung arbeitenden Einheiten in Prozent,
 f = Netzfrequenz,
 D = Distanz der Schalter oder Kurzschlusstelle vom Kraftwerk in km.

Die Versuche haben aber gezeigt, dass die oben genannten Voraussetzungen über den Lichtbogen bei den raschen Stromänderungen in der Wellenfront nicht mehr erfüllt sind und sich deshalb die Erscheinung unter Umständen in einem ganz wesentlich breiteren Bereich zeigt, als obige Rechnung erwarten liesse. Wir wollen daher im folgenden Kapitel noch auf die für die Kenntnis des Lichtbogens an sich wichtigen Konstanten der Zünd- und Löschverzögerung eingehen, da sich diese Werte und ihre direkten Folgen ohne weiteres aus den Oszillogrammen ablesen lassen.

6. Zünd- und Löschverzögerung des Oelschalter-Lichtbogens.

Als *Zündverzögerung* bezeichnen wir die Zeit zwischen dem Auftreten der plötzlichen Spannungsspitze und dem erneuten Durchbruch im Schalter. In der Regel ist diese Zeit sehr kurz, wesentlich kürzer als 10^{-5} bis 10^{-4} s, was daraus hervorgeht, dass der Spannungszusammenbruch in der Regel bereits in der Front der an kommenden steilen Spannungswelle erfolgt. Doch treten hie und da auch Verzögerungen von $(1 \div 3) \times 10^{-4}$ s auf, zum Beispiel in den Oszillogrammen der Fig. 11 und 12. In letztern Fällen ist der plötzliche Spannungshochsprung bereits deutlich vom darauf folgenden Spannungszusammenbruch zu unterscheiden. Eine Folge davon ist, dass im Zeitpunkt $4T$ nach einer Zündung nicht nur der zur Zeit $t=0$ stattgehabte Spannungszusammenbruch wieder als Hochsprung sichtbar wird, sondern kurz vorher ein Spannungssprung abwärts, der von der zweitletzten Zündung herrührt, die vor ca. $8T$ stattfand. Nachdem bereits mehrere Zündungen erfolgt sind, tritt in solchen Fällen an Stelle des einfachen Spannungshochsprungs zur Zeit $4T$ nach einer erfolgten Zündung jeweils eine um die Zeitdistanz der Zündverzögerung versetzte Folge von Spannungs- Ab- und Aufsprüngen. Das Ergebnis ist ein Spannungsverlauf, der vor dem starken Hochsprung einer Schwingung ähnlich sieht. Da die Wellen um so mehr gedämpft sind, je öfter diese bereits über die Leitung hin und her gewandert sind, hat diese Wellenfolge stets das umgekehrte Bild einer gedämpften Schwingung, nämlich dasjenige einer sich immer höher aufpumpenden Schwingung.

Die *Löschverzögerung* ist eine Folge der Trägheit des Lichtbogens, die sich darin äussert, dass sich die statischen Werte der Stromspannungscharakteristik nicht momentan einstellen und die Leitfähigkeit hinter den Strom- oder Spannungsänderungen nachhinkt. Insbesondere verliert der Lichtbogen beim plötzlichen Verschwinden des Stromes seine Leitfähigkeit nicht momentan, sondern in einer end-

lichen Zeit. Auch diese Verzögerung zeigt interessante Folgen, die bezüglich der Ueberspannungsentstehung wichtig sein können, wie wir sehen werden. Wir haben bereits gezeigt (Fig. 4), dass der Lichtbogen sehr rasch, nämlich beim Nulldurchgang des Wellenstromes einpoliger Kurzschlüsse, löschen kann. Er ist in diesem Falle in ca. 10^{-4} s nichtleitend geworden, so dass er beim Wiederanstieg einer Spannung von ca. $60 \text{ kV}_{\text{eff}}$ in etwa 10^{-4} s nicht mehr neu zündet. Während bei einpoligen Kurzschlüssen nach Erde der Lichtbogen immer beim Nulldurchgang des Wellenstromes lösche, blieb er jedoch bei Abschaltung von Kurzschlüssen zwischen beiden Phasen beim Nulldurchgang des Wellenstromes noch während einer messbaren Zeit weiter bestehen.

Die Löschverzögerung ergibt sich aus den Versuchen zu einigen hunderttausendstel bis zu wenigen zehntausendstel Sekunden. Diese Zeit brauchte der Lichtbogen im Schalter zur Entionisierung, d. h. zum Uebergang vom leitenden in den isolierenden Zustand. Die Erscheinung zeigte sich unabhängig von der Schalterbauart; sie war für beide untersuchten Schalttypen etwa gleich. Offenbar ist die Löschverzögerung eine dem Lichtbogen innewohnende Konstante, wahrscheinlich aber nur solange der Lichtbogen nicht künstlich gekühlt wird, wie z. B. in den Druckluftschaltern⁶⁾.

Eine häufig in den Oszillogrammen konstatierbare Folge der Löschverzögerung sei an Fig. 9 erläutert. Nach der ersten Zündung Z_1 erfolgt der Unterbruch U_1 im Zeitpunkt $2T$ nach der Zündung, d. h. beim Nulldurchgang des Wellenstromes. Die erscheinende Spannungsspitze ist aber merklich weniger hoch als die Zündspannung und zugleich sanft abgerundet. In dem folgenden Anstieg der wiederkehrenden Spannung tritt nun aber genau $4T$ nach der Zündung ein kleiner Spannungshochsprung auf, wie wir diesen ausführlich erklärt haben, sofern die Unterbrechung etwas später als im Zeitpunkt $2T$ erfolgte. Dieselbe Erscheinung zeigt sich nach der zweiten Zündung in verstärktem Masse. zieht man die gestreckte schräge Linie der wiederkehrenden Spannung, so fehlt jeweils die bei $4T$ aufgesetzte Spitze in Form und Grösse beim Zeitpunkt $2T$ mit umgekehrtem Vorzeichen. Die Löschverzögerung ist somit auch ein Grund, weshalb bei der Stromunterbrechung im Zeitpunkt $2T$ nicht der volle Spannungswert $-V_0$ auftritt, der bei der Zündung als zusammenbrechende Spannung $+V_0$ vorhanden war. Physikalisch gesprochen muss aus den Oszillogrammen geschlossen werden, dass die heisse Gasflamme des Schalterlichtbogens ihre Leitfähigkeit langsamer verliert, als der Strom auf den Wert Null absinkt. Wenn nun der Strom rasch wieder ansteigen will (Wellenstrom-Richtungsumkehr), so kann er das noch in beschränktem Masse tun. Die Leitfähigkeit sinkt aber, bevor der Strom seinen vollen Wert wieder erreicht hat, soweit ab, dass der volle Strom nicht mehr entsteht, sondern der Lichtbogen etwas vorher definitiv löscht. Die Erscheinung ist denkbar, sobald das Tempo der Stromänderung rascher erfolgt als die Geschwindigkeit der Entionisierung („Abkühlung“) des Lichtbogens.

Die grosse zum Nicht-Abreissen des Lichtbogens erforderliche Wellensteinheit ist, wie aus den Oszillogrammen ersichtlich, bei den gemachten Kurzschlüssen zwischen

⁶⁾ Erst bei der Durchsicht dieses Aufsatzes kamen uns die wertvollen Arbeiten von J. S. Slepian (J. A. I. E. 1929, Juni), F. Kesselring (ETZ 1929, No. 28) und J. Biermanns (ETZ 1929, No. 30 u. 31) zur Kenntnis.

Die vorliegenden Versuche ergänzen die Slepianschen und Biermannsschen Versuche für die der Berechnung nach Slepian am wenigsten zugänglichen langen und relativ dünnen Lichtbogen und hohen Spannungen. Sie zeigen, dass diese Lichtbogen noch rascher entionisiert sein können als die von Slepian und Biermanns bis 7500 V untersuchten. Besonders interessant ist die Tatsache, dass es sich bei den vorliegenden Versuchen gerade um den der theoretischen Voraussicht nach am günstigsten erscheinenden Fall grosser Leistungskapazität handelt (Slepian S. 2 unten, Kesselring S. 1011 oben, Biermanns S. 1074 und 1075). In der Tat ist das vom Transformator bedingte Tempo der Spannungswiederkehr entsprechend der tiefen Netzeinschwingung von nur ca. 100 Per/s der Theorie entsprechend sehr langsam. Daneben hat sich aber eine andere unerwartet rasche Spannungswiederkehr in der Front der reflektierten Zündwellen ergeben, deren Raschheit das Tempo der an Prüfmaschinen erhältlichen Spannungswiederkehr erreichen und sogar überschreiten kann. Ohne der Theorie zu widersprechen, geben die Versuche ein Beispiel jener grossen Menge von Erscheinungen, die sich erst im Werksbetrieb zu erkennen geben und uns mahnen, theoretische Folgerungen nicht allgemein zu ziehen, ohne die Erfahrung zu Hilfe genommen zu haben.

zwei Phasen vorhanden, aber nicht mehr bei der Kurzschlussabschaltung zwischen einer Phase und Erde, wo die Erde als Rückleiter dient. Ueberspannungsgefahr besteht darnach vorwiegend bei der Abschaltung von Kurzschlüssen zwischen zwei Phasenleitern von Höchstspannungsnetzen, weniger bei Kurzschlüssen zwischen einer Phase und Erde, was die Versuche durchweg bestätigen. Die kleinere Steilheit von Wanderwellen zwischen einer Phase und Erde ist vermutlich in vorliegendem Falle durch die stark gekrümmte geographische Leitungsführung in verstärktem Masse bedingt. In dieser Richtung ergänzende Oszillogramme werden vielleicht noch folgen. Die praktische Erkenntnis aus den Versuchen ist für den Oelschalterbau die Wichtigkeit der raschen Entionisierung des Lichtbogens von Höchstspannungsschaltern, für den Betrieb von Anlagen die aufgedeckte Gefährdung des Abschaltvorganges durch steile Wellen an unverzweigten Leitungen, bei Maschinenleistungen, die in die Größenordnung der angegebenen Werte fallen.

7. Zusammenfassung und Folgerungen für die Prüfung von Oelschaltern.

1. Bei der Kurzschlussabschaltung am Ende einer unverzweigten Uebertragungsleitung für 132 kV zeigten sich bei Abschaltung einpoliger Kurzschlüsse bis knapp zweifache Ueberspannungen und bei Abschaltung zweipoliger Kurzschlüsse solche bis zum etwa vierfachen Betrage der normalen Spannung, die mehrmals zum Ueberschlag von Anlageteilen führten. Im letzteren, einzig gefährlichen Fall wurde folgendes festgestellt:
2. Die Erscheinung liess sich mit Hilfe des Kathodenstrahl-Oszillographen aufklären als eine Rückzündungsscheinung im Schalter, die bedingt ist durch die Steilheit der auftretenden Wanderwellen, die konstatierte Trägheit des Lichtbogens („Löscherzögerung“) und eine der Netzspannung und -Länge in angegebener Weise zugeordnete Maschinenleistung.
3. Die Oszillogramme erlauben die ungefähre Messung der Entionisierungsgeschwindigkeit des Lichtbogens und dessen Zünd- und Löscherzögerung unter praktischen Bedingungen. Die Entionisierungsgeschwindigkeit des Lichtbogens erweist sich als zu klein, um das Löschen in der Front der steilen Wanderwellen, wie sie auf Höchstspannungsleitungen vorkommen, noch momentan zu ermöglichen.
4. Entsprechend der grösseren Wellensteilheit hat sich die starke Ueberspannungsscheinung nur gezeigt bei Kurzschlüssen zwischen zwei Phasen, nicht aber bei solchen zwischen einer Phase und Erde, wo die Wellenrückleitung über Erde erfolgte.
5. Ebenso zeigte sich die regelmässig auftretende Rückzündungsscheinung nur an der unverzweigten Leitung; sobald andere Netzteile gekuppelt wurden, verschwand sie.
6. Die Ueberspannungsgefahr verschwand ebenfalls, wenn die Kurzschlusstelle nicht mehr nahe hinter dem Versuchsschalter, sondern 95 km weit davon entfernt war.
7. Die Erscheinung war innerhalb der Versuchsgrenzen, d. h. mit einem Löschkammerschalter mit Zweifach-Unterbrechung und einem Schalter ohne Löschkammer mit Sechsach-Unterbrechung dieselbe. Ein Einfluss des Vorkontaktwiderstandes war, wie zu erwarten, nicht vorhanden.
8. Derselbe Löschkammerschalter hat sich bei Versuchen mit Abschaltleistungen bis annähernd 300 000 kVA gut bewährt.
9. Die unter Voraussetzung sehr kleiner Lichtbogenträgheit durchgeführte Rechnung zeigt, dass die gefährliche Erscheinung nur bei einer ziemlich genau bestimmten, relativ kleinen Maschinenleistung auftreten würde. In Wirklichkeit zeigte sich die Erscheinung auch bei Maschinenleistungen, die um das mehrfache vom gerechneten Werte abwichen; die Lichtbogenträgheit erhöht also die Gefahr.
10. Abhilfe ist auf verschiedene Art möglich: Durch Vermaschung des Netzes, durch Verflachung der Wellenfront von Leitungswanderwellen, z. B. durch im Leitungszug liegende Drosselpulsen, oder durch raschere Entionisierung des Lichtbogens auf künstliche Art.

10. Die bei plötzlichem Erdschluss einer Phase auftretende Influenzwanderwelle und die dadurch bedingte Spannungserhöhung der gesunden Phase hat eine Höhe von 27 % der Zündspannung zur Folge.
11. Bei den Ueberschlägen infolge der Versuche waren die speisenden Transformatoren und Spannungswandler Sprungwellen von wesentlich grösserer Höhe ausgesetzt als sie bei der Sprungwellenprüfung verwendet werden. Ein Windungsschluss oder sonstiger Defekt einer Transformatorwicklung trat nicht auf.
12. In Drehstromnetzen ist dieselbe Ueberspannungserscheinung auch zu erwarten, und zwar noch ausgesprochener bei relativ kleinem Maschineneinsatz. Ueber die zahlenmässige Höhe der entstehenden Ueberspannungen können nur Versuche Aufschluss geben.

Für die Prüfung von Oelschaltern ergeben sich aus den Versuchen nachstehende Folgerungen:

Erstens haben die Versuche gezeigt, dass die Beanspruchung eines Schalters bei der Abschaltung von Kurzschlüssen in einer elektrischen Anlage schlimmer war als jene, die bei der Prüfung desselben mittels eines Prüffeldgenerators auftreten würde. In Netzen können zusätzliche Erscheinungen auftreten, die nicht einmal qualitativ, noch weniger quantitativ vorauszusehen sind.

Zweitens hat sich gezeigt, dass die Abschaltung relativ kleiner Kurzschlussleistungen, nämlich ca. 20000 kVA nach S.E.V.-Richtlinien gerechneter Abschaltleistung pro Pol, demselben Schalter mehr Schwierigkeit machte als die Abschaltung schwerer Kurzschlüsse von annähernd 300000 kV pro Schaltergruppe⁷⁾). Es geht daraus hervor, dass die Angabe der kVA-Abschaltzahl noch nicht durchaus entscheidend ist für das Verhalten des Schalters in einem bestimmten Netz⁸⁾.

Drittens zeigt der gemessene Verlauf der beanspruchenden Schalterspannung, wie schlecht unter Umständen die Annäherung ist, die wiederkehrende Spannung eines Schalterpoles in einem Mehrphasennetz aus dem stationären Vektordiagramm zu berechnen. Diese Aufteilung der Spannung ist wohl berechtigt für die Abschaltung eines Kurzschlusses in der Nähe eines Generators ohne angehängte Leitung; in Hochspannungsanlagen mit Leitungen sind die Verhältnisse komplizierter.

Für die Prüfung von Schaltern bezüglich ihres Verhaltens in elektrischen Anlagen scheint uns nur *ein* Versuch das entscheidende Urteil zu geben: Das ist der Netz-kurzschlussversuch. Der heute von den Schalterfabrikanten eingeführte Prüffeldversuch mit Turbogenerator als Stromquelle hat den grossen Vorteil einfacher Prüfverhältnisse, unter denen sich verschiedene Konstruktionen vergleichen lassen; er ist auch allein berufen, die zur Entwicklung von Hochleistungsschaltern erforderliche grosse Anzahl von Entwicklungsversuchen durchzuführen⁹⁾). Er kann aber den Netz-kurzschlussversuch nicht voll ersetzen.

Es wird daher immer wieder Fälle geben, wo eine Betriebsleitung zur Prüfung eines Schalters in ihrem Netz gezwungen ist. Eine möglichst gründliche Ausmessung und Auswertung solcher Versuche ist mit Hinsicht auf die Wichtigkeit derselben sehr angezeigt. Bei solchen Messungen wird der Kathodenstrahl-Oszillograph gute Dienste leisten. Mit seiner Hilfe scheint es möglich, Schalter- und Netzeigenschaften zu trennen, den kritischen Vorgang genau zu erkennen und, wenn nötig, bei abnormalen, im Netz begründeten Schwierigkeiten die Wege zur Abhilfe anzugeben.

Schalterprüfung mit Prüfmaschinengruppe für die konstruktive Entwicklung der Schalter und Netzversuch zur Feststellung von Betriebstüchtigkeit und Eignung für bestimmte Netze in kritischen Fällen scheint uns der technisch richtige Weg zur Schalterprüfung zu sein.

⁷⁾ Ueber diese Erscheinung liegen bereits zahlreiche Beobachtungen vor, z. B. J. Biermanns AEG-Mitt. März 1929.

⁸⁾ J. Fallou, Bull. Soc. Franç., 1927, p. 280.
A. Roth, Bull. Soc. Franç., 1927, p. 286.

⁹⁾ Heusser, Bull. S.E.V. 1929, No. 5.