Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 19 (1928)

Heft: 17

Artikel: Neuere Forschungsergebnisse über Vorgänge beim Schalten unter Oel

Autor: Kopeliowitsch, J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060567

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: 30.11.2025

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

XIX. Jahrgang XIXe Année | Bulletin No. 17 | September I Septembre I 1928

Neuere Forschungsergebnisse über Vorgänge beim Schalten unter Oel.

Erweiterter Vortrag, gehalten an der Generalversammlung des Schweiz. Elektrotechn. Vereins in Baden, am 17. Juni 1928

von Dr. *J. Kopeliowitsch*, Baden.

621.317.35

Der Autor skizziert einleitend die ersten grundlegenden Forschungsarbeiten über Abschaltvorgänge in Oelschaltern und geht kurz auf die von den verschiedenen Forschern aufgestellten Charakteristiken des Gleich- und Wechselstromlichtbogens ein. Anhand eines grossen Versuchsmaterials untersucht er sodann den Einfluss der Spannung, Schaltgeschwindigkeit, Zahl der Unterbrechungsstellen, des Kontaktmaterials, der Stromstärke, der Kontaktform, des statischen Druckes, der Beschaffenheit des Öles, der Eigenfrequenz des Netzes, der beanspruchenden Spannung, des cos φ und der Frequenz auf die Lichtbogenlänge, und vergleicht die Resultate dieser Untersuchungen mit bereits bekannten Arbeiten. Eingehende Betrachtungen macht er alsdann über die Vorgänge im Schalterinnern und über die Oelkolbentheorie, deren Richtigkeit sich experimentell bestätigt, und teilt interessante Resultate seiner Untersuchungen über die Eigenschaften der beim Abschalten sich bildenden Gasblase mit. Die Laboratoriumsversuche, welche zur Erforschung dieser Erscheinungen durchgeführt wurden, fanden an einem Spezialschalter statt, der, um kinematographische Zeitlupenaufnahmen zu ermöglichen, in ein Glasgehäuse eingebaut wurde. Sodann untersucht der Autor die Vor- und Nachteile von Druckkammern und weist anhand zahlreicher Versuche nach, dass Vielfachunterbrechung dem Druckkammersystem überlegen ist. Zuletzt vergleicht er die Ergebnisse der Prüffeldversuche mit denjenigen von Abschaltversuchen mit grossen Leistungen und streift die elektrodynamischen Erscheinungen beim Einschalten auf heftige Kurzschlüsse.

L'auteur esquisse, pour commencer, les premières recherches fondamentales effectuées sur les phénomènes de rupture dans les interrupteurs à huile et examine brièvement les caractéristiques de l'arc à courant continu et de l'arc à courant alternatif, indiquées par les différents expérimentateurs. En s'appuyant sur de nombreux résultats d'essais, il détaille ensuite l'influence des facteurs suivants sur la longueur de l'arc: tension et intensité de rupture, vitesse de déclenchement, nombre de points de rupture, métal et forme des pièces de contact, pression statique, propriétés de l'huile, fréquence propre du réseau, cos φ et fréquence; puis il compare les résultats de ses recherches à ceux de travaux déjà connus. Il étudie ensuite les phénomènes à l'intérieur des interrupteurs, en particulier la théorie du piston d'huile, que l'expérience justifie entièrement. Les essais exécutés dans ce but étaient faits avec un interrupteur placé dans un récipient en verre, pour pouvoir cinématographier le processus et le reproduire ensuite au ralentisseur. De très intéressantes communications suivent sur les propriétés de la bulle de gaz qui se développe à toute rupture du circuit. L'auteur passe ensuite à l'examen des avantages et des inconvénients des pots d'explosion et montre, à l'aide de documents d'essai, les avantages du disjoncteur à rupture multiple. Enfin, il compare les résultats d'essais de laboratoire avec ceux obtenus au moyen de grandes puissances, et touche les phénomènes électrodynamiques qui accompagnent la fermeture sur forts courants de courts-circuits.

1. Einleitung.

Zwecks grösserer Sicherheit der Energielieferung, besserer Ausnützung der Reserven, möglichst wirtschaftlicher Energieerzeugung gelangt man in den letzten Jahren zu immer weitgehenderer Vermaschung der Uebertragungs- und der Verteilungsnetze und zu einer fortwährend wachsenden Konzentration der Energieproduktion. Die Zentralenleistungen von mehreren 100 000 kW sind keine Seltenheit mehr. Die Beherrschung der in Störungsfällen auftretenden, aus diesen Gründen oft gewaltigen Kurzschlussleistungen bereitet manche Schwierigkeiten. Ganz besonders bilden die ungenügend dimensionierten Oelschalter eine Gefahr für die Anlage, da sie Explosionen und Oelbrände verursachen können. Eine zweckmässige Durchbildung des Ueberstromschutzes schliesst somit ausser der Relaisfrage und des elektrodynamischen und thermischen Sicherheitsgrades verschiedener Anlageteile auch die Aufgabe einer richtigen Wahl der Oelschalter ein.

Der Lösung des Oelschalterproblems glaubten viele Konstrukteure dadurch näher treten zu können, dass auf Grund gewisser Schätzungen und Erfahrungen gebaute Schalter nach Möglichkeit Abschaltversuchen zwecks Bestimmung ihrer Leistungsfähigkeit unterzogen wurden. Durch Beseitigung der bei solchen Leistungsversuchen zum Vorschein kommenden Konstruktionsmängel sollte man allmählich zu einer allen Anforderungen genügenden Schalterkonstruktion gelangen. Allerdings, um erfolgreich zu sein, bedingt diese Methode grosse Kurzschlussleistungen, die im allgemeinen nur selten zur Verfügung stehen, ausserdem ist die parallel mit den Versuchen gehende Umänderung der Schalterkonstruktion sehr zeitraubend.

Viel fruchtbarer erscheint hingegen eine systematische Erforschung der Abschaltvorgänge in Oelschaltern. Aus den eingehenden Studienversuchen über den Einfluss von Spannung und Stromstärke, von Kontaktform und Kontaktmaterial, von Kontaktanordnung, von Ausschaltgeschwindigkeit und Anzahl der Unterbrechungen, von Stromart usw. auf den Abschaltvorgang ist es möglich, mit verhältnismässig einfachen Mitteln die Beanspruchung der Schalter im Betrieb vorauszubestimmen und sich somit eine sichere Basis für ihre Berechnung und Bemessung zu verschaffen.

Die ersten Grundlagen dieser letztern Methode sind zweifellos durch die wertvollen Arbeiten von Dr. B. Bauer in den Jahren 1915 bis 1917 geschaffen worden [1]). Eine eingehende theoretische Bearbeitung des Stoffes durch B. Bauer konnte jedoch nicht die Lücke ausfüllen, welche wegen zu kleiner für die experimentelle Erforschung zur Verfügung gestellten Abschaltleistungen geblieben war. Die seitdem bekannt gewordenen Arbeiten [2]), und ganz besonders die von G. Brühlmann [3]), ebenso wie die veröffentlichten Versuchsresultate an verschiedenen Schalterkonstruktionen [4]) haben zur Klärung der Oelschalterfrage viel beigetragen. Weitere Erforschung mit grösseren Abschaltleistungen war jedoch notwendig, um die vollständigen Unterlagen zur Vorausberechnung der Leistungsfähigkeit zu schaffen. Solche Kurzschlussversuche werden seit Jahren auch im Versuchsfeld der A.-G. Brown, Boveri & Cie. in Baden mit Leistungen bis 150 000 kVA durchgeführt und haben bereits wertvolles Material und in wesentlichen Punkten volle Klarheit über die Vorgänge im Schalterinnern verschafft.

---

[1]) Berichte der Kommission für Hochspannungsapparate und Brandschutz des S. E. V. und V. S. E., Bulletin S. E. V. 1915, S. 137, 300; 1916, S. 85; 1917, S. 225 und 273.

[2]) J. D. Hilliard, Gen. El. Review 1924, S. 822.
S. D. Norberg, Handlingar Nr. 44, Nr. 17, III, Ingeniörs Vetenskaps Akademien, Stockholm 1925.
F. Kesselring, E. T. Z. 1927, Heft 35 und 36, S. 1278 und 1312.

[3]) G. Brühlmann, Bulletin S. E. V. 1925, Heft 2, S. 81.

[4]) H. C. Louis und A. F. Bang, J. A. I. E. E. 1922, Bd. 39, S. 399.
J. D. Hilliard, J. A. I. E. E. 1922, S. 530.
Mac Neill, J. A. I. E. E. 1922, S. 537.
P. Sporn und St. Clair, El. World, May 1925.
P. Sporn und St. Clair, J. A. I. E. E. 1927, Bd. 46, S. 698.
E. T. Z., vergl. auch 1928, Heft 17, S. 651.
J. Biermanns, E. T. Z. 1927, Heft 32 und 33, S. 1185.
Dr. J. Kopeliowitsch, E. T. Z. 1928, Heft 18, S. 676.

Das Verhalten eines Schalters beim Abschalten ist in erster Linie durch die Schalterarbeit bestimmt, die ihrerseits von der Lichtbogenspannung und der Lichtbogenlänge abhängt. Die Vorausbestimmung dieser Faktoren ist deshalb für die Konstruktion des Schalters von ausschlaggebender Bedeutung. Wir werden darum unsere Betrachtungen mit diesen Fragen beginnen.

2. Charakteristiken des Gleich- und Wechselstrom-Lichtbogens.

Die Charakteristiken des Gleichstrom-Lichtbogens in Luft sind von vielen Forschern seit Jahren untersucht worden. Von den zahlreichen Formeln, die aufgestellt worden sind, erwähnen wir hier nur die wichtigsten, diejenige von Mrs. Ayrton[5]) und die von Steinmetz[6]). Guye & Zébrikoff[7]) haben im Jahre 1907 gezeigt, dass die Ayrton'sche Gleichung auch auf Metallbogen in Luft anwendbar ist.

Die Gleichung von Steinmetz ist aus der Betrachtung der Wärmebilanz des Lichtbogens unter Annahme einer konstanten Stromdichte an den Elektroden und im Bogen, sowie einer konstanten Temperatur des Bogens abgeleitet.

Für den Wechselstrom-Lichtbogen können zwei verschiedene Charakteristiken aufgestellt werden, je nachdem für Strom und Lichtbogenspannung die Effektivwerte — statische Charakteristik — oder die Momentanwerte während einer Periode — dynamische Charakteristik — eingesetzt werden.

Guye und Monasch[8]) haben die statische Charakteristik für eine Reihe von Metallen aufgenommen und gefunden, dass im normalen Bogen die Elektrodenspannung linear mit der Bogenlänge zunimmt und dass die Spannungs-Stromkurven fallenden Charakter haben. Eine Gleichung für diese Kurven wurde nicht angegebn.

Die Form der dynamischen Charakteristik des Bogens ist prinzipiell durch die für den Gleichstrombogen gültigen Gesetze gegeben. Während des Durchganges von einer Halbperiode zur nächsten verlöscht der Bogen solange Spannung und Effekt die für das Brennen des Bogens notwendigen Minimalwerte unterschreiten; die Neuzündung erfolgt jedesmal infolge Durchschlag des Dielektrikums zwischen den Elektroden.

Die dynamische Charakteristik des Lichtbogens ist für zunehmenden Strom nicht die gleiche wie für abnehmenden; da die Temperaturänderungen im Bogen nicht genau gleichzeitig mit den Aenderungen in der zugeführten Leistung vor sich gehen, sondern diesen mehr oder weniger nacheilen, ist die Zeitdauer des Nullwertes des Stromes am Ende einer Halbperiode kürzer als am Anfang der nachfolgenden. Die Lichtbogenspannung ist also bei abnehmendem Strom kleiner als bei wachsendem Strom und die ganze Charakteristik hat eine Schleifenform. Die Erscheinung, die Simon[9]) als Lichtbogenhysteresis bezeichnet, ist bei induktionslosem Stromkreis ziemlich ausgeprägt; im Kurzschluss, d. h. in einem induktiven Kreis, kommt sie infolge der oft kaum merklichen Dauer des Stromnullwertes weniger zum Vorschein.

Ueber die Charakteristiken des Wechselstrom-Lichtbogens unter Oel finden sich in der ältern Literatur[10]) keine Angaben. In den letzten Jahren hat Norberg[11]) in Anlehnung an Steinmetz[6]) für Gleichstrom eine Gleichung folgender Form aufgestellt:

$$e = k_1 + k_2 \frac{l}{\sqrt{i}}$$

wo k_1 und k_2 Konstante sind.

[5]) H. Ayrton, The El. Arc, The Electrician Co. Ltd., London, 1902.
[6]) C. P. Steinmetz, Transactions of the A. I. E. E. 1906, S. 789.
[7]) Ch. E. Guye und L. Zébrikoff, Ph. Z. 1907, S. 703.
[8]) Ch. E. Guye und Monasch, L'Eclairage Electrique 1903, Heft 34, S. 305; Heft 35, S. 18.
[9]) Simon, Ph. Z. 1905, S. 297.
[10]) Vergl. z. B. A. Hagenbach, der el. Lichtbogen, Leipzig 1924.
M. Leblanc, L'arc électrique Paris 1922.
[11]) S. Norberg, A. S. E. A.-Journal 1927, Nr. 3, S. 28.

Für die Anwendung der Gleichung auf die dynamische Charakteristik des Wechselstrombogens wird noch ein Glied $k_3 \frac{l}{i} \frac{di}{dt}$ (i = Momentanwert des Stromes) eingeführt, das den Wärmeaustausch zwischen dem Bogen und dem umgebenden Medium berücksichtigt. Bei praktischen Rechnungen werden das erste und das dritte Glied vernachlässigt. Zu erwähnen ist noch ein etwas komplizierter Ausdruck, der den Kathoden- und Anoden-Fall berücksichtigen soll und von Traverse [12]) vorgeschlagen wurde.

Vor der Anwendung irgend einer Formel für die Lichtbogenspannung im Schalterbau sollte zuerst die *Strom-Spannungs-Charakteristik* des Wechselstrombogens unter Oel bei grossen Strömen bestimmt werden. Unsere Untersuchungen bezweckten, ausgehend von der Lichtbogenspannung und der Lichtbogenlänge, auf die Schalterarbeit, die durch das Integral

$$A = \int_0^t eidt$$

gegeben ist, schliessen zu können. Es war daher angebracht, statische Charakteristiken aufzustellen. Die Resultate stützen sich auf die Auswertung mehrerer hundert Oszillogramme. Sie erfolgten in der Weise, dass für einen gewissen Abschaltstrom die mittlere Lichtbogenspannung für veränderliche Lichtbogenlänge ermittelt wurde. Es zeigte sich dabei, dass diese Abhängigkeit durch eine Gerade dargestellt ist. An Hand solcher Mittelwerte für mehrere Stromstärken wurden dann die gesuchten Charakteristiken aufgezeichnet, deren Verlauf für zwei verschiedene Längen in Fig. 1 gezeigt ist. Die Kontrolle der oben angeführten Formeln ergab, dass keine einzige die abgeleiteten Kurven darzustellen vermag. Auch die Anwendung der

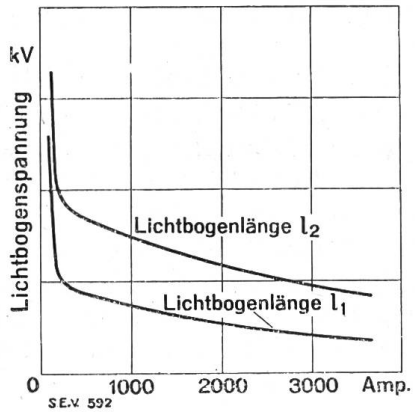

Fig. 1.
Statische Strom-Spannungs-Charakteristiken des Wechselstromlichtbogens in Oel für zwei verschiedene Lichtbogenlängen.

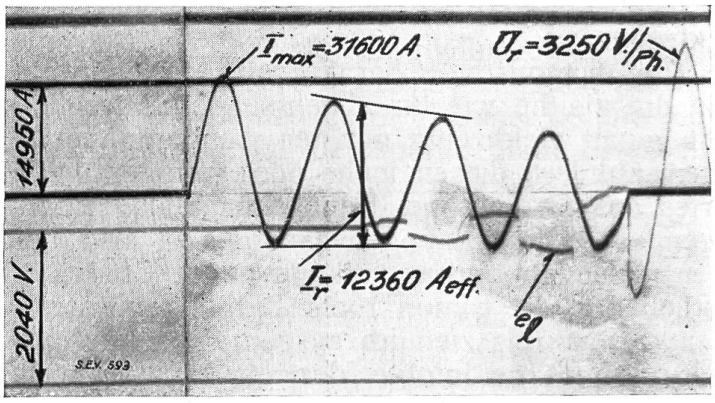

Fig. 2.
Oszillogramm einer Abschaltung von 12360 $A_{eff.}$ unter 3250 V/Ph. Die Lichtbogenspannung e weist scheinbar eine positive Charakteristik auf (Einfluss der magnetischen Blasung).

dynamischen Charakteristiken erwies sich als zwecklos, da bei grossen Strömen die negative Charakteristik des Lichtbogens wegen magnetischer Blasung, die die geradlinige Bahn der Elektronen beeinträchtigt und die Krümmung des Bogens im Moment des Strommaximums verursacht, nicht immer in gleicher Weise zum Vorschein kommt, wie dies aus der Fig. 2 deutlich hervorgeht. Das abgebildete Oszillogramm stellt eine Abschaltung von rund 12360 A eff. bei 3250 V pro Phase dar und zeigt, dass die Lichtbogenspannung e mit wachsendem Strom ebenfalls zunimmt. Wie wir weiter noch sehen werden, hängt e auch vom statischen Druck im Schalter ab, was gleichfalls berücksichtigt werden muss. Mit Rücksicht auf diese Erscheinungen gestaltet sich die mathematische Formel der Lichtbogenspannung recht kompliziert,

[12]) Traverse R. G. E., 28. April 1928.

und es erweist sich vorteilhafter, für praktische Berechnungen experimentell aufgenommene Charakteristiken zu benützen.

3. Lichtbogenlänge.

Zur Bestimmung der Schalterarbeit muss man noch die Lichtbogendauer kennen, die eine Funktion der Lichtbogenlänge und der Ausschaltcharakteristik des Schalters ist. Bei der Festlegung der Ausschaltgeschwindigkeit, die in weiten Grenzen verändert werden kann, soll man einerseits die zweckmässige Konstruktion des beweglichen Schalterteiles und andererseits die Verkleinerung der Lichtbogendauer bezw. der Schalterarbeit ins Auge fassen. Auch hier konnte nur das Experiment über die günstigste Lösung entscheiden. Auf diesen Punkt kommen wir noch zurück; zuerst wollen wir die Frage der Lichtbogenlänge behandeln.

a) Abhängigkeit von der Spannung.

Die Untersuchungen des Abschaltvorganges unter Oel zeigen, dass der Lichtbogen eigentlich in einer Gassphäre brennt und dass die Erscheinungen grundsätzlich ähnlich wie in Luft sind. Solange der Lichtbogen zwischen den Kontakten besteht, sind in erster Linie die Stromstärke und der Abstand zwischen den Elektroden für die Lichtbogenspannung bestimmend; diese ist somit von der Betriebsspannung unabhängig. Bei jedem Nulldurchgang des Stromes löscht der Lichtbogen aus und zündet wieder unter der Einwirkung der wiederkehrenden Spannung, wie wir das bereits gesehen haben. Der Vorgang bei der Neuzündung ist mit dem Durchschlag einer mehr oder weniger vorionisierten Gasstrecke identisch. Man kann leider aus dieser Betrachtung die Lichtbogenlänge in Funktion der wiederkehrenden Spannung nicht ableiten, da die Temperatur der Elektroden in nächster Umgebung des Kathodenfleckes und hauptsächlich der momentane Druck und die Temperatur der heissen Gasblase dabei zweifellos eine grosse Rolle spielen. Die gesuchten Charakteristiken wurden deshalb direkt durch ausgedehnte Versuche aufgenommen. Bei der Schalterkonstruktion kommt es auf die maximalen Lichtbogenlängen an, die bei den gegebenen Spannungen und Strömen auftreten können. Infolge der grossen Messtreuung [13]), die für diese Messungen kennzeichnend ist, sind für die Bestimmung eines Punktes der Kennlinie zahlreiche Abschaltungen notwendig gewesen; die Gesetzmässigkeit der Resultate liess sich erst nach vielen hunderten, ja tausenden von Messungen ableiten. Wir geben in Fig. 3 einige der erhaltenen Kurven wieder, deren Verlauf, wie zu erwarten war, der Durchschlagsspannung einer Funkenstrecke ähnlich ist, wobei bei grösseren Strömen grössere Lichtbogenlängen auftreten.

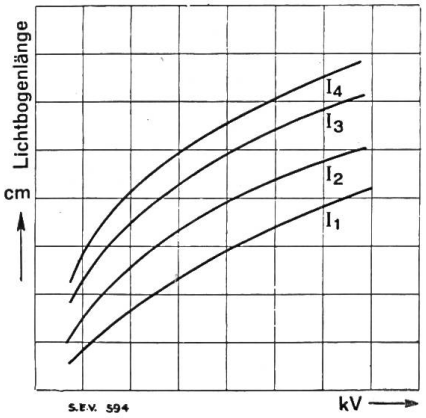

Fig. 3.
Abhängigkeit der Lichtbogenlänge bei gegebenem Strom von der Abschaltspannung. Mit I_1, I_2, I_3, I_4 sind Ströme in wachsender Reihefolge bezeichnet.

b) Einfluss der Schaltgeschwindigkeit.

Ueber die Beeinflussung des Abschaltvorganges durch die Schaltgeschwindigkeit sind in der Fachliteratur stark auseinandergehende Meinungen vertreten. Dementsprechend sind auch verschiedene Schalterkonstruktionen entwickelt worden. Die Untersuchungen von B. Bauer haben bereits im Jahre 1915 gezeigt, dass eine Vergrösserung der Schaltgeschwindigkeit eine Verlängerung des Lichtbogens mit sich bringt. Da die damaligen Untersuchungen nur mit kleinen Leistungen und bis 1,4 m/sec Schaltgeschwindigkeit durchgeführt wurden, haben wir die Frage neu aufgegriffen und weiter verfolgt. Unsere Versuche umfassen Messreihen bei verschiedenen Span-

[13]) Z. B. Wedmore, W. B. Whitney, C. E. R. Bruce, The Rupturing Capacity of an Oil Circuit Breakers, Journ. of the Inst. of El. Eng., Oct. 1927, Vol. 65, Nr. 370, p. 913.

nungen und Strömen bis 3000 A und 8 kV pro Unterbrechungsstelle und Schaltgeschwindigkeiten bis 3,5 m/sec. Wie weit eine Steigerung der Geschwindigkeit nützlich sein kann, ersieht man aus der Fig. 4, die die Lichtbogenlänge und die Lichtbogendauer in Funktion der Ausschaltungsgeschwindigkeit darstellt. Die Versuche wurden in einem Spezialschalter (Fig. 5) unter sonst gleichen Bedingungen ausgeführt und haben im Einklang mit den Untersuchungen von B. Bauer gezeigt, dass mit zunehmender Geschwindigkeit die Lichtbogenlänge ebenfalls anwächst. Diese Erscheinung ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Lichtbogenansatzstelle am beweglichen Kontakt durch das umgebende Oel weniger gekühlt wird, was eine Verkleinerung der Zündspannung bedingt. Eine abgerundete Kontaktform (Kugelkontakte) ergibt in der Tat etwas andere Resultate (Fig. 6), indem die Zunahme der Lichtbogenlänge mit wachsender Geschwindigkeit eine langsamere ist.

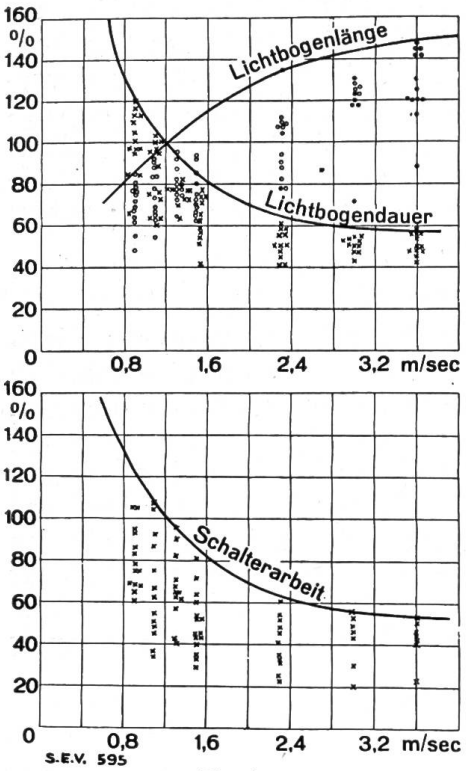

Fig. 4.
Abhängigkeit der Lichtbogenlänge, der Abschaltdauer und der Schalterarbeit von der Schaltergeschwindigkeit auf Grund von Abschaltversuchen mit Klotzkontakten bei 22000 kVA, $f = 50$.

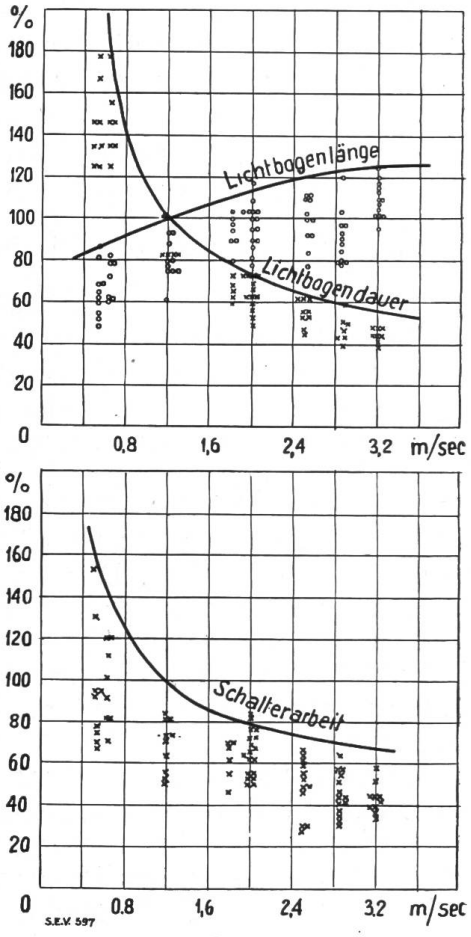

Fig. 6.
Abhängigkeit der Lichtbogenlänge, der Abschaltdauer und der Schalterarbeit von der Schaltgeschwindigkeit auf Grund von Abschaltversuchen mit Kugelkontakten bei 2200 kVA, $f = 50$.

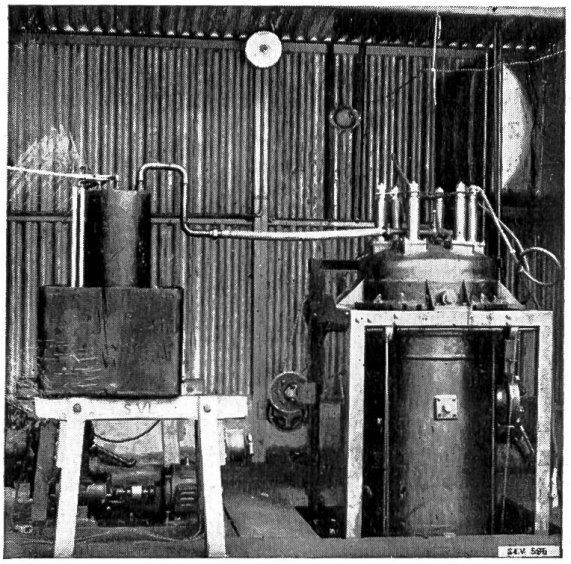

Fig. 5.
Spezialschalter für Versuche unter Druck mit verschiedenen Kontaktanordnungen, Schaltgeschwindigkeiten usw. Druckfestigkeit 60 Atm.

Diese Versuchsergebnisse zeigen deutlich, dass die günstigste Abschaltgeschwindigkeit im Bereiche von 1,2 bis 2 m/sec liegt. Eine weitere Steigerung beeinflusst die Lichtbogendauer praktisch nicht, bewirkt aber eine Vergrösserung des Schaltweges und der mechanischen Beanspruchung der beweglichen Kontaktordnung, deren kinetische Energie mit v^2 wächst. Die Frage, ob die Anwendung der sogenannten Schnell- oder Abreisskontakte zweckmässig sein kann, muss somit im negativen Sinne beant-

wortet werden, weil diese Kontaktform nur eine mechanische Schwächung der Schalterkonstruktion bedeutet und praktisch keine Begünstigung des Abschaltvorganges mit sich bringt.

c) Die Vorteile der Vielfachunterbrechung.

Aus den angeführten Charakteristiken für die Lichtbogenlänge in Funktion der Spannung pro Unterbrechungsstelle kann geschlossen werden, dass mit abnehmender Spannung die Lichtbogenlänge und dementsprechend die Lichtbogendauer kleiner werden. Verwendet man deshalb mehrere Kontaktpaare in Serie, so unterteilt man die beanspruchende Spannung im gleichen Verhältnis und es ist auf diese Weise möglich, ohne eine Erhöhung der Traversengeschwindigkeit, durch Vielfachunterbrechung den Abschaltvorgang in bedeutendem Masse zu erleichtern, wie dies aus den Kurven der Fig. 7 hervorgeht. Die abgebildeten Messergebnisse wurden aus Versuchsreihen von je 50 bis 80 Schaltungen abgeleitet und stellen die mit der Wahrscheinlichkeitsformel von Gauss ausgerechneten Maximalwerte dar. Die gün-

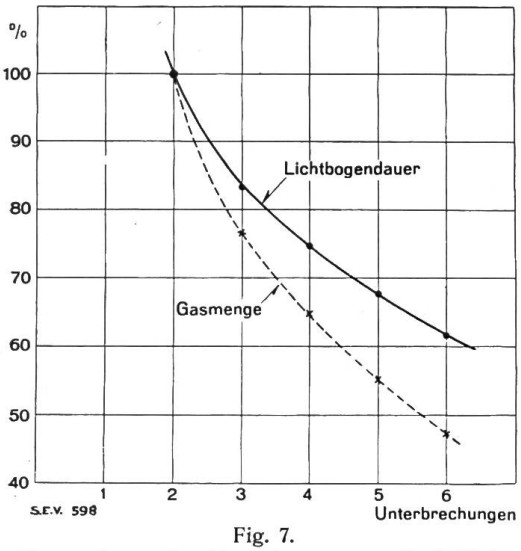

Fig. 7.
Begünstigung des Abschaltvorganges durch Vielfachunterbrechung. Zur Ableitung dieser Kurven wurden Versuchsreihen von 50—80 Schaltungen bei 24000 kVA gemacht.

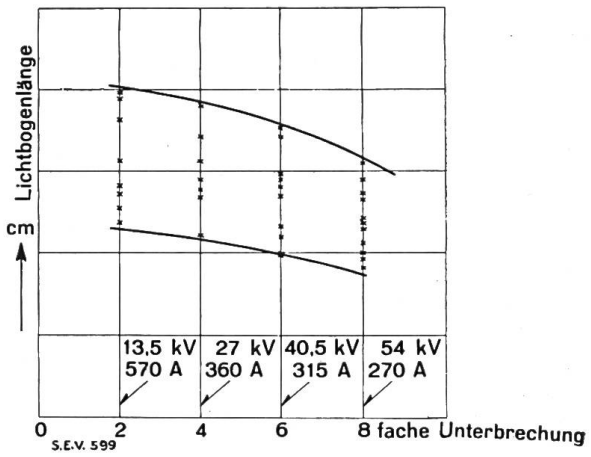

Fig. 8.
Untersuchung der Lichtbogenlänge bei gegebener Spannung pro Unterbrechungsstelle. Kugelkontakte, Abschaltgeschwindigkeit 12 m/sec.

stige Wirkung der Vielfachunterbrechung beruht auf der Tatsache, dass die Reihenschaltung mehrerer Kontaktpaare bei gegebener Spannung pro Unterbrechungsstelle die Lichtbogenlänge pro Unterbrechung nicht vergrössert. Diesbezügliche Untersuchungen ergeben in der Tat, dass bei gegebenem Strom und Spannung pro Kontaktpaar die Lichtbogenlänge pro Unterbrechung unabhängig von der Anzahl der verwendeten Unterbrechungen ist. Zu den in Fig. 8 wiedergegebenen Messresultaten sei bemerkt, dass der abfallende Verlauf der Kurven durch die Abnahme des Kurzschlusstromes bedingt ist. Berücksichtigt man den Stromeinfluss, der durch andere Messungen ermittelt wurde, so bekommt man eine wagrechte Gerade. Dieses Ergebnis ist von grösster Bedeutung, denn es ermöglicht aus den systematischen Versuchen an einer einzigen Unterbrechungsstelle über das Verhalten eines Schalters mit n-facher Unterbrechung und n-mal grösserer Abschaltleistung sichere Schlüsse zu ziehen. Es kann z. B. die Konstruktion eines 110 kV-Schalters mit 10 Unterbrechungsstellen von 1 000 000 kVA Abschaltleistung, welcher im Betrieb im Maximum mit 5250 A und rund 9,5 kV pro Unterbrechung beansprucht wird, aus den Versuchen mit 5250 A $\times$ 9,5 kV = 50 000 kVA an einer Unterbrechung abgeleitet werden. Zur Entwicklung einer Schalterkonstruktion, welche nur zwei Unterbrechungsstellen besitzt, müssen offenbar die Versuche mit viel grösseren Leistungen durchgeführt werden, da pro Unterbrechung die Hälfte der Abschaltleistung entfällt.

d) Kontaktmaterial.

Die theoretischen Betrachtungen über die Vorgänge im Lichtbogen, die auf Grund gewisser Annahmen entwickelt wurden, wie z. B. bei S. Norberg[14]), ergeben, dass Elektrodenmaterial mit kleinem Atomgewicht und niedriger Schmelztemperatur, wie Aluminium, für die rasche Löschung des Lichtbogens ganz besonders geeignet sein soll. Wir haben gesucht, in dieser Frage durch eine vergleichende Untersuchung mehr Klarheit zu verschaffen.

Die Versuche, deren Resultate in Tabelle I zusammengefasst sind, wurden mit Klotzkontakten bei 3,8 kV pro Unterbrechung, rund 2700 A eff., 1 m/sec Ausschalt-

Einfluss des Kontaktmaterials auf die Lichtbogen-Charakteristik.
2fache Unterbrechung, Abschaltspannung 7,6 kV, Kurzschlusstrom 2600—2700 Amp. eff., Schaltgeschwindigkeit 1 m/sec.

Tabelle I.

Kontakt-material	Atomgewicht	Spez. Gewicht	Schmelz-tempe-ratur °C	Ver-damp-fungs-tempe-ratur °C	Spez. Wärme-kapazität	Schmelz-wärme	Ver-damp-fungs-wärme	Wärmeleitzahl Cal. / °C, cm², sec	Licht-bogen-länge in %	Anzahl von Schaltungen
Kupfer	63,57	8,9	1083	2310	0,091	43	1110	0,9	100	25
Messing	$\frac{2\times 63{,}57+65{,}37}{3}$	8,55	900	2200	0,093	37	1050	0,15 + 0,3	95	20
Eisen	55,84	7,84	1530	2450	0,111	49		0,14 + 0,17	100	15
Aluminium	27,1	2,55	657	1800	0,214	82	1770	0,48	135	34
Wolfram	184	19,1	3400	—	0,033	—	1180	0,48	131	32

geschwindigkeit und zwei Unterbrechungen in genau gleicher Versuchsanordnung durchgeführt. Wie man sieht, ist die Lichtbogenlänge bei Kontakten aus Aluminium die grösste. Wenn die niedrigere Schmelztemperatur und das kleine Atomgewicht bei Aluminium auf die Schwächung der Ionisierung der Gasstrecke günstig einwirken, so wird diese Wirkung anscheinend durch den grösseren Abbrand des Kontaktmaterials und dementsprechend höhern Gehalt des Bogens an Metalldämpfen neutralisiert.

e) Einfluss der Stromstärke.

Wie bereits oben erwähnt (Fig. 3), hängt die Lichtbogenlänge auch vom Strom ab, dessen Grösse den Querschnitt des leitenden Gasstranges und die Fläche des Kathodenfleckes bedingt. Mit steigender Stromstärke behalten deshalb die Lichtbogenansatzstellen ebenso wie die ionisierte Gasstrecke während jedes Nulldurchganges höhere Temperatur, wodurch die Zündspannung verkleinert und dementsprechend die Lichtbogenlänge vergrössert wird.

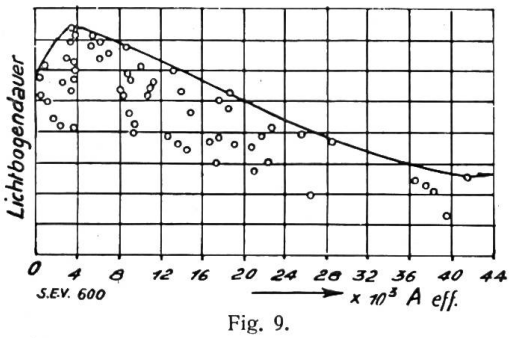

Fig. 9.
Lichtbogendauer in Funktion des Abschaltstromes: Einfluss der magnetischen Blasung (nach J. D. Hilliard, Gen. El. Rev. 1924, S. 822).

Zu dieser Wirkung gesellt sich eine andere, die den Abschaltvorgang wieder erleichtert. Die Fig. 9 gibt nach Hilliard [15]) die Abschaltdauer in Funktion des Kurzschlusstromes bei einem gegebenen Schalter an. Die Kurve weist ein ausgesprochenes Maximum auf. Die Verkürzung der Abschaltdauer muss auf die mit dem Quadrat des Stromes steigende Blaswirkung der magnetischen Felder zurückgeführt werden. Die kritische Stromstärke hängt von der Kontaktanordnung und von der Kontaktform ab und ist zweifellos von Schalter zu Schalter verschieden. Unsere Versuche bestätigten diese Erscheinung, indem festgestellt wurde, dass die günstige

[14]) S. D. Norberg, Handlingar Nr. 44, Nr. 17, III, Ingeniörs Vetenskaps Akademien, Stockholm 1925.
[15]) J. D. Hilliard, Gen. El. Review, Dez. 1924, S. 822.

Wirkung der Blasung (Fig. 10) einerseits durch die Bogenkrümmung in der Richtung der Blaskraft, was einer Bogenverlängerung gleichkommt, und andererseits durch das Abwandern der Lichtbogenansatzstellen bedingt ist.

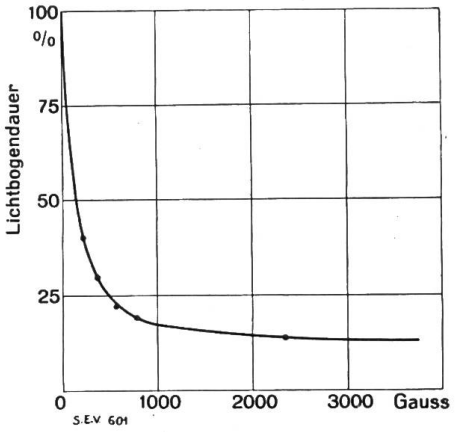

Fig. 10.
Lichtbogendauer in Funktion der Blasfeldstärke, erzeugt mittels einer Spule. 1 Unterbrechungsstelle bei 2700 A und 4 kV.

f) Eigenblasung der Solenoidkontakte.

In diesem Zusammenhang ist es interessant, auf die Eigenblasung der Solenoidkontakte hinzuweisen. Diese Kontaktart wird von Brown Boveri zur Neutralisierung der Abhebungserscheinungen beim Einschalten auf heftige Kurzschlüsse verwendet, indem durch geeignete Anzahl von Windungen eine Anziehungskraft zwischen beiden Kontakten erzeugt wird, die in jedem Moment die Abhebekraft vollkommen kompensiert. Neben dem Hauptfluss, der die Anziehung bewirkt, entstehen bei der Abschaltbewegung magnetische Streufelder, deren Verlauf aus Fig. 11 ersichtlich ist. Auf dem ganzen Umfang der oberen, einander gegenüberliegenden Windungen beider Kontakte haben die Streulinien entgegengesetzte Richtung und wirken nach dem Biot-Savart'schen Gesetz auf den Lichtbogen in der Weise ein, dass ein Ausblasen des Lichtbogens in Form einer Schraubenlinie zustande kommt (vergl. Fig. 11c). Diese Eigenschaft äussert sich in einer bedeutenden Verkleinerung der Lichtbogendauer, wie dies aus vergleichenden Abschaltversuchen hervorgeht. Bei rund 3000 A eff. und 1,2 m/sec Schaltgeschwindigkeit haben die Solenoidkontakte gegenüber den Klotzkontakten die in Fig. 12 dargestellte Begünstigung der Abschaltdauer ergeben. Zur Aufstellung dieser Kurve wurden gegen 100 Schaltungen unter sonst genau gleichen Bedingungen durchgeführt. Einzelne Messungen bei bedeutend höheren Strömen lassen eine noch grössere Verkleinerung der Lichtbogendauer bei diesen Kontakten erwarten.

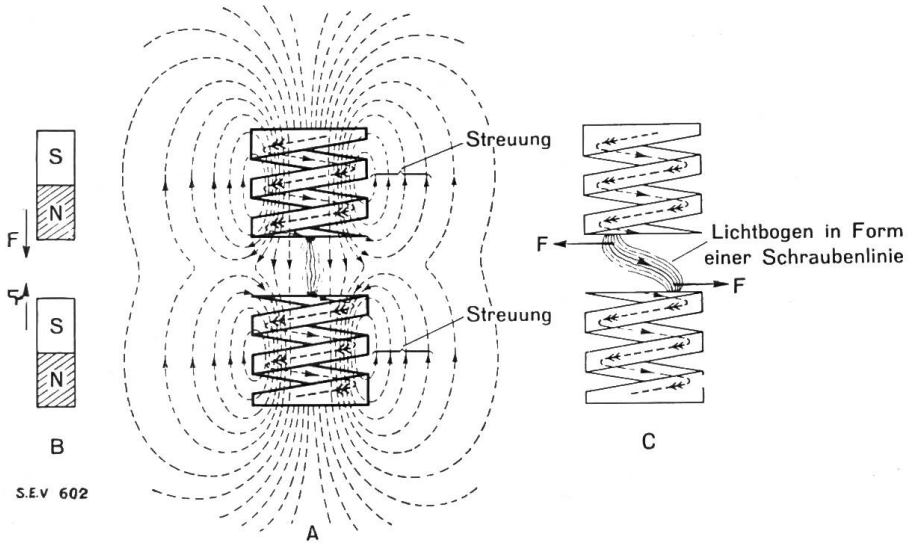

Fig. 11.
Schematische Erklärung der Eigenblasung bei Solenoidkontakten. Die Streufelder bewirken eine Ausblasung des Lichtbogens in Form einer Schraubenlinie.

g) Beeinflussung der Lichtbogenlänge durch den statischen Druck.

Die Rückwirkung des statischen Druckes auf die Charakteristik des Lichtbogens in Luft oder Gas wurde schon vor vielen Jahren für Niederspannungs-Lichtbogen kleiner Leistung untersucht [16]). Durch diese Messungen konnte eindeutig festgestellt werden, dass zur Unterhaltung eines Lichtbogens bestimmter Länge und Stromstärke die Spannung zwischen den Elektroden um so höher sein muss, je

[16]) Monasch, Der elektrische Lichtbogen bei Gleichstrom und Wechselstrom. Jul. Springer, Berlin 1904.

höher der Druck des umgebenden Gases ansteigt. Aus dieser Eigenschaft kann abgeleitet werden, dass der Existenzbereich des Abschaltlichtbogens bei gegebener Spannung und Strom umso kleiner sein muss, je höher der Ueberdruck im Schalter ist. Eine erste eingehende Prüfung der Abschaltverhältnisse unter Druck wurde von B. Bauer [17]) angestellt, wobei bis 1000 kW ohmscher Belastung bei 8000 V unter 0 bis 8 kg/cm² Druck im Schalter abgeschaltet wurden. Zur Gewinnung zuverlässiger Mittelwerte wurden zahlreiche Messreihen durchgeführt und daraus folgendes geschlossen: Bei gegebenen elektrischen Bedingungen im Stromkreis strebt die Lichtbogenlänge mit ansteigendem Druck zunächst einem Minimum zu, dieses

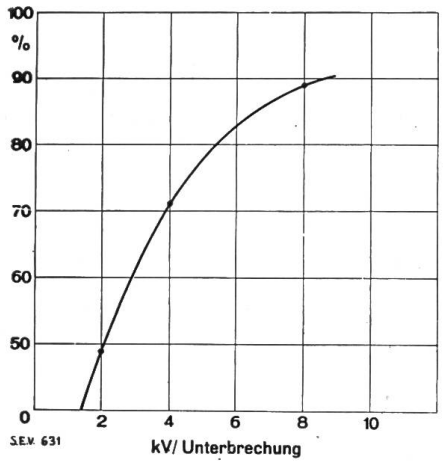

Fig. 12.
Verkleinerung der Lichtbogendauer infolge der Eigenblasung von Solenoidkontakten gegenüber Klotzkontakten. Versuche bei 3000 $A_{eff.}$ Abschaltstrom und 1,2 m/sec. Abschaltgeschwindigkeit.

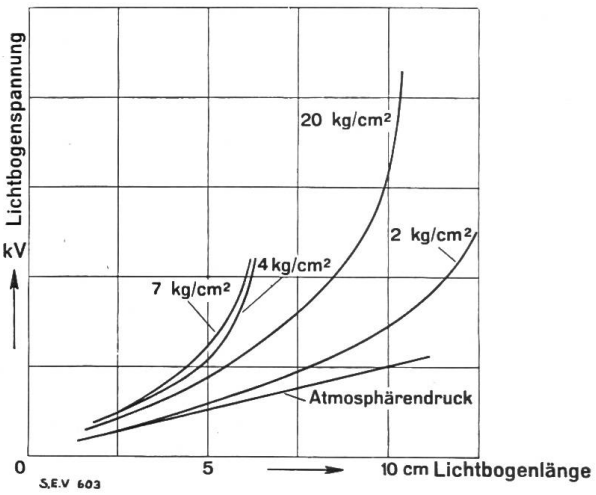

Fig. 13.
Zunahme der Lichtbogenspannung mit dem statischen Ueberdruck im Schalter. Abschaltversuche bei 2600 $A_{eff.}$ und 4 kV mit zweifacher Unterbrechung. Schaltgeschwindigkeit 1,1 m/s.

ist aber schon für geringe Ueberdrücke erreicht, um bei weiterer Drucksteigerung wieder grössere Werte zu erlangen, die um so rascher ansteigen, je grösser die Abschaltleistung gewählt wird. Dieser Zusammenhang zwischen Druck und Lichtbogendauer wiederholt sich im Verlauf der mittleren Schalterarbeit.

Um das Verhalten des Abschaltlichtbogens im induktiven Kreis bei noch höherer Kompression und grösseren Leistungen zu erforschen, wurden ähnliche Untersuchungen im in der Fig. 5 abgebildeten Spezialschalter angestellt. Es konnten Messungen unter einem zwischen 0 und 20 kg/cm² veränderlichen Druck bei rund 25 000 kVA durchgeführt werden, welche die von B. Bauer gemachte Feststellung vollkommen bestätigten.

Die Existenzbedingungen des Wechselstrombogens und seine Länge hängen bekanntlich von verschiedenen Faktoren ab, die einerseits auf die Energiebilanz während des Brennens und anderseits auf die Zündspannung bei jedem Nullwert des Stromes Rückwirkung haben. Die theoretischen Betrachtungen lassen zunächst eine Zunahme der Lichtbogenspannung mit zunehmendem Druck erwarten, da die mittlere freie Weglänge der Elektronen mit dem Druck abnehmen muss. Zur Erzeugung eines bestimmten Elektronenstromes ist somit eine höhere Spannung pro Längeneinheit notwendig, was auch bei den Messungen deutlich zum Vorschein kam (Fig. 13). Die Lichtbogenspannung nimmt zwar nicht proportional mit dem Druck zu, und die Abhängigkeit vom Elektrodenabstand folgt nicht dem gleichen Gesetz wie unter Atmosphärendruck, da an Stelle einer Geraden eine stark gekrümmte Charakteristik auftritt. Bemerkenswert ist dabei, dass die höchste Lichtbogenspannung bei gegebener Länge im Bereiche von 4 bis 7 Atmosphären zu liegen scheint. Diese Erscheinung steht wahrscheinlich im Zusammenhang mit der mittleren

[17]) B. Bauer, 4. Bericht über die Untersuchungen an Oelschaltern, Bulletin S. E. V. 1917, S. 291.

Temperatur des Lichtbogenstranges, die bei noch stärkerer Kompression der Gasblase höhere Werte aufweisen muss, was eine entsprechend niedrigere Ionisationsspannung zur Erzeugung eines bestimmten Elektronenstromes bedingt. In obigem Druckbereich tritt auch die kürzeste Lichtbogenlänge bezw. Lichtbogendauer, sowie die kleinste Schalterarbeit auf. Nach dem Paschen'schen Gesetz nimmt bekanntlich die Durchbruchspannung der Gase mit steigendem Druck zu; dieses Gesetz scheint nach unseren Messungen im Bereiche von 0 bis 7 kg/cm² Kompression auf die Abschaltung einen überwiegenden Einfluss auszuüben. Bei einer weiteren Vergrösserung des Druckes bis 20 kg/cm² kehren die Verhältnisse wieder um, indem der Abschaltvorgang unter immer grösserer Gasentwicklung und längerem Lichtbogen vor sich geht. Der Umkehrpunkt kommt höchst wahrscheinlich unter der Wirkung der zunehmenden Stromdichte und der Temperatur des Lichtbogenstranges und derjenigen des Kathodenfleckes [18]) auf die Durchbruchfeldstärke, die dadurch eine Verkleinerung erfährt, zustande. Die Verhältnisse sind recht verwickelt und ein quantitativer Zusammenhang der Vorgänge kann nicht gegeben werden. Die praktische Bedeutung unserer Feststellungen ist jedoch von grosser Tragweite, indem daraus geschlossen werden kann, dass eine Erhöhung des Druckes über 7 kg/cm² den Abschaltprozess in grossem Masse erschwert und im Schalterbau somit vermieden werden muss.

h) Oeleinfluss.

Die Beschaffenheit des Oeles, soweit es sich um normale Oelsorten handelt, ist ohne Einfluss auf die Lichtbogenlänge. Insbesondere spielt die Durchschlagsfestigkeit des Oeles keine Rolle, da die Wiederzündung des Lichtbogens durch den elektrischen Durchschlag der Gasblase bewirkt wird. Wir haben z. B. in einem Schalter mehr als 150 Kurzschlüsse bei Leistungen bis 50 000 kVA abgeschaltet, wodurch naturgemäss das Oel stark verrusst wurde. Seine Durchschlagsfestigkeit sank um 33 %. Mit diesem Oel wurden dann Vergleichsversuche angestellt, die in bezug auf die Lichtbogenlänge sowie die Schalterarbeit keinen Unterschied gegenüber den Schaltungen im neuen Oel gezeigt haben.

Vergleichende Abschaltversuche zur Ermittlung des Oeleinflusses. Tabelle II.

	Anzahl Schaltungen	Spannung pro Unterbrechungsstelle kV	Abschaltstrom A	Lichtbogenlänge in %		
				maximal	minimal	mittel *)
Neues Oel . . .	20	7	800	100	70	88
Verrusstes Oel .	20	7	800	95,3	68,5	86,5

*) Alle Werte sind auf die maximale Lichtbogenlänge bei neuem Oel bezogen.

Starke Verschlammung und Verrussung des Oeles sind also nur wegen der Schwächung des Isolationszustandes zu vermeiden, weil dadurch leicht Kriechwege und leitende Brücken zwischen den spannungsführenden Teilen oder zwischen diesen letzteren und Erde eingeleitet werden können.

i) Rückwirkung der Eigenfrequenz des Netzes auf die Lichtbogenlänge.

Bei jedem Nullwert des Stromes reisst während einer kurzen Zeitspanne der Lichtbogen ab und unterbricht kurzzeitig den Stromkreis; die Spannung kann hernach auf der betreffenden Phase wieder erscheinen, bis sie den für die Neuzündung nötigen Wert erreicht. Dieser Vorgang ist mit einer mehr oder weniger gedämpften Schwingung des entsprechenden Netzteiles verbunden, wie dies an Hand des einphasigen Schemas (Fig. 14a) gezeigt werden kann. Die Leitungskapazitäten c

[18]) R. Seeliger, Entstehung und Eigenschaften des Lichtbogens, E. T. Z. 7. Okt. 1926.
R. Seeliger, E. T. Z. 1928, Heft 23.
K. T. Compton, J. A. I. E. E. 1927, S. 1192.

besitzen vor der Löschung des Bogens nur eine relativ kleine Ladung entsprechend der Lichtbogenspannung und dem Abfall in der Leitung. Die im Moment der Lichtbogenlöschung im Generator induzierte EMKE hat in einem vorwiegend induktiven Kreis beinahe den Amplitudenwert und es entsteht ein Ladevorgang, dessen mathematische Behandlung uns zu weit führen würde. Nimmt man z. B. an, dass der

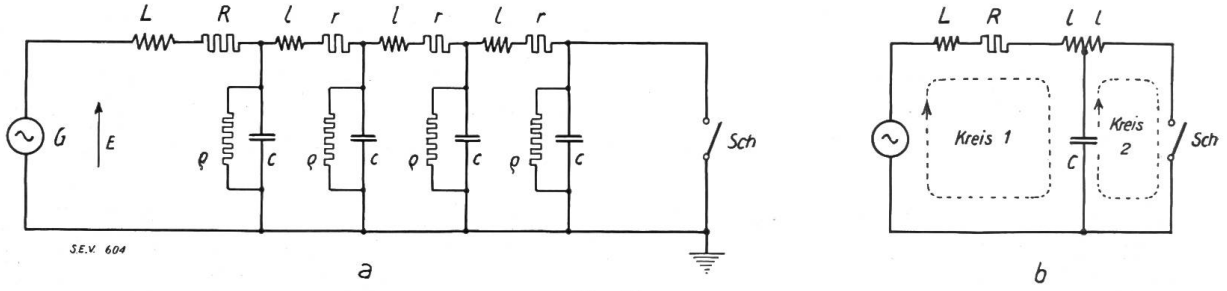

Fig. 14.
Ersatzschema des Kurzschlusskreises:

c = verteilte Leiterkapazität.
l = verteilte Leitungsinduktivität.
r = verteilter Leitungswiderstand.
ρ = verteilter Ableitungswiderstand.
R = ohmscher Widerstand des Maschinenkreises.
L = Kurzschlussinduktivität des Maschinenkreises.
G = Spannungsquelle.
Sch = Kurzschlussschalter.

Kurzschluss über ein Kabel mit grosser Kapazität gespeist wird, so kann das Schema der Fig. 14a mit guter Annäherung in dasjenige der Fig. 14b umgewandelt werden. Vernachlässigt man die kleine Leitungsinduktivität l und den Dämpfungswiderstand R, sowie r, so bekommt man für die Eigenfrequenz des Kreises die wohlbekannte Formel $f_e = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$. Die Amplitude der wiederkehrenden Spannung, die für die Neuzündung massgebend ist, kann an den Schalterklemmen erst nach Ablauf von $t_v = \frac{1}{4}T = \frac{1}{4 f_e} = \frac{\pi\sqrt{LC}}{2}$ Sekunden erscheinen. Der Ladevorgang ist aber mit einer Ausschwingung auf den doppelten Wert begleitet, der nach $2\,t_v = \pi\sqrt{LC}$ Sekunden erreicht wird, wenn allerdings der Lichtbogen nicht schon vorher zündet. Der langsame Anstieg der Spannung an den Klemmen des Schalters bedingt eine Verlängerung des stromlosen Zustandes und damit eine weitgehende Neutralisierung bezw. Abkühlung der heissen Gasblase sowie der Elektroden; die Zündspannung kann während dieser Verzögerung erheblich erhöht und dementsprechend der Abschaltvorgang stark gekürzt werden. Mit sinkender Frequenz f_e muss deshalb die Lichtbogenlänge bedeutend kleiner ausfallen, und im extremen Fall für f_e = 50 Hertz soll die Abschaltung des Kurzschlusses mit derjenigen einer ohmschen Belastung identisch sein. Für grosse Netze erhält man unter vereinfachten Annahmen für die Eigenfrequenz Zahlen, die in günstigen Fällen einige 100 Per/sec nicht überschreiten. An Hand eingehender Untersuchungen haben wir gesucht, die Wirkung der Verkleinerung der Eigenfrequenz bis auf 350 Per/sec zu erforschen, zu welchem Zweck eine variable Kapazität von 0,034 bis 0,177 μF nach Fig. 14b parallel zum Schalter angeschlossen wurde. Die Versuchsreihen wurden unter sonst genau gleichen Bedingungen bei 17 und 32 kV und 50

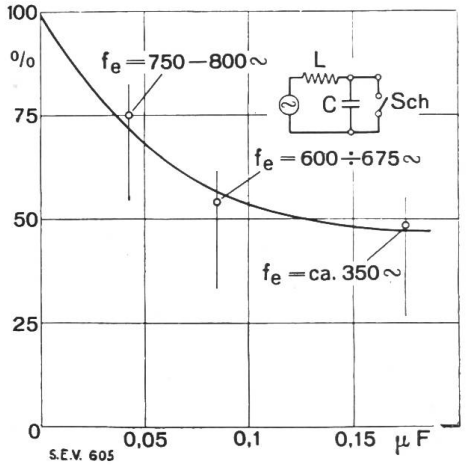

Fig. 15.
Abhängigkeit der Lichtbogenlänge von der Eigenfrequenz des Kurzschlusskreises. Einphasige Abschaltversuche bei 32 kV und 90 A. Maximalwerte aus je 10 Schaltungen.

bis 90 A gemacht und bestätigten vollkommen unsere Ueberlegungen. Fig. 15 gibt die Messergebnisse der Abschaltungen bei 32 kV, die im übrigen mit den Resultaten des Versuches bei 17 kV übereinstimmen, wieder. Die Fig. 16 zeigt ein typisches Oszillogramm einer Unterbrechung des Kurzschlusses mit parallel zum Schalter angeschlossener Kapazität. Ganz besonders sei hervorgehoben, dass trotz

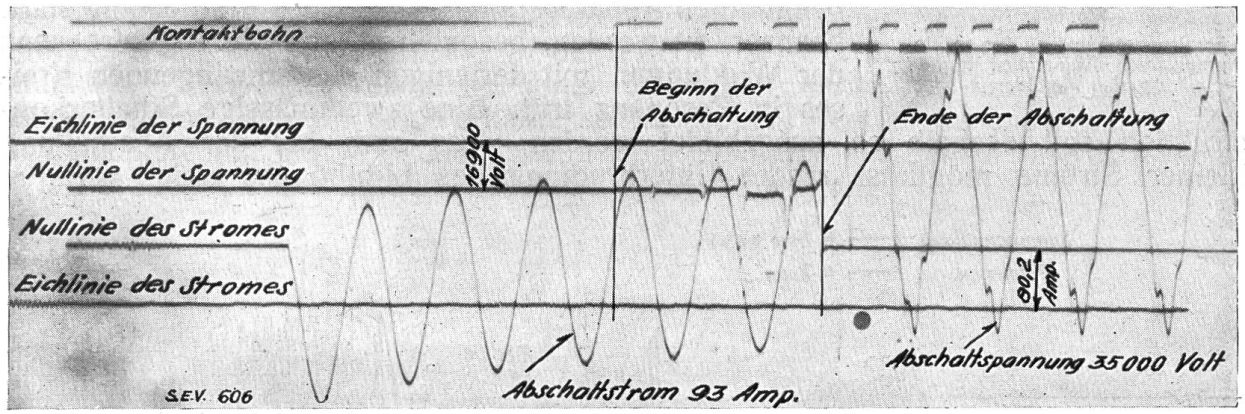

Fig. 16.
Einfluss von Parallelkapazitäten zu Oelschaltern auf den Abschaltvorgang. $c = 0{,}173 \cdot 10^{-6}$ *F*.

doppelter Spannungsspitze, die die wiederkehrende Spannung meistens deutlich aufweist, entgegen den an einigen Stellen in der Fachliteratur vertretenen Meinungen [19]), keine Erschwerung des Abschaltvorganges festgestellt werden konnte. In diesem Zusammenhang sei noch darauf hingewiesen, dass durch Einschaltung von Reaktanzen zur Herabsetzung der Kurzschlussleistungen, ausser einer Verminderung des Kurzschlusstromes, unter Umständen auch eine Verkleinerung der Eigenfrequenz des betreffenden Netzstranges und damit eine weitere Entlastung der Oelschalter erreicht wird.

Sehr interessante Beobachtungen konnten über die mittelfrequenten Schwingungen, die durch den Abschaltlichtbogen angeregt werden können und die hauptsächlich beim Schalten relativ kleiner Ströme auftreten, gemacht werden. Die mit

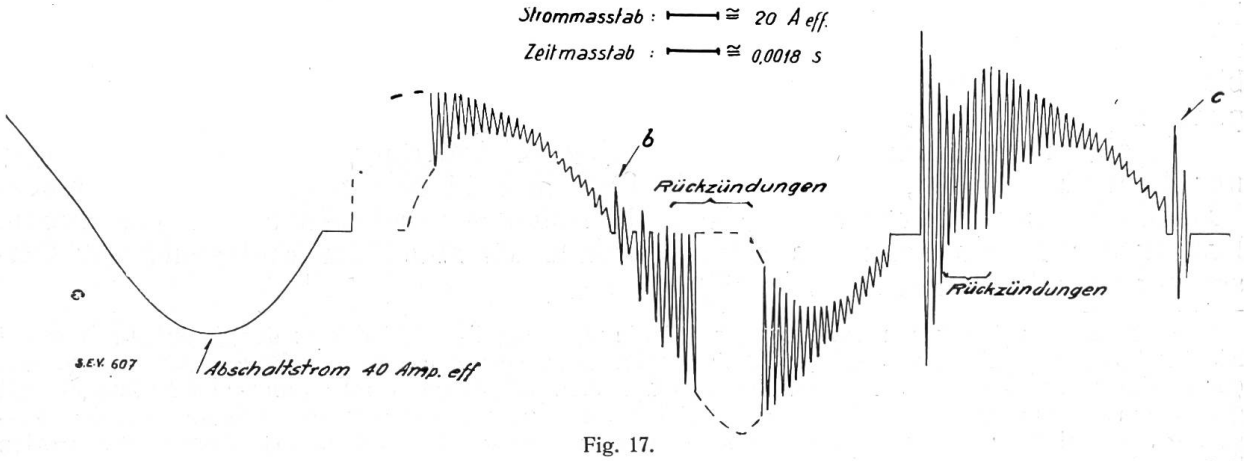

Fig. 17.
Einfluss von Parallelkapazitäten zu Oelschaltern auf den Abschaltvorgang. $C = 0{,}177 \cdot 10^{-6}$ *F*. Kathodenoszillogramm des Kurzschlusstromes in *D*. Kapazität angeschlossen vor der Drosselspuhle. (Fig. 17 a.)

dem Kathodenoszillographen aufgenommenen Oszillogramme haben die physikalische Seite der Vorgänge beleuchtet und gezeigt, dass Rückzündungen im Schalter während der ganzen Abschaltperiode Schwingungen und über $2^1/_2$fache Spannungen erregen können. Ohne in weitere Einzelheiten der Frage eingehen zu wollen, die einer späteren Mitteilung vorbehalten werden müssen, sei hier auf den Verlauf der Span-

[19]) A. Roth, Bulletin S. F. E. Mars 1927, p. 287. — Ing. Luigi Magrini: Contributo allo studio della formazione dell'arco nell'olio, Bolletino Tecnico, Bergamo.

nung und des Stromes an den Schalterklemmen (Fig. 17 und 18) hingewiesen. Die Schwingungen, welche sich im Kreise 2 der Fig. 14b ausbilden, weisen je nach Grösse der Induktivität und der Kapazität mehr oder weniger hohe Frequenzen auf. Die Isolation der Anlage und hauptsächlich diejenige der Windungen und der Klemmen der sich im Kreise befindlichen Apparate kann durch diese Erscheinung stark beansprucht werden, besonders wenn die Eigenfrequenz der Wicklungen mit derjenigen des schwingenden Kreises in Resonanz tritt. Eine zweckmässige Schalterkonstruktion soll deshalb so ausgebildet werden, dass auch bei der Abschaltung kleiner Ströme möglichst rasche Unterbrechung des Lichtbogens erzielt wird.

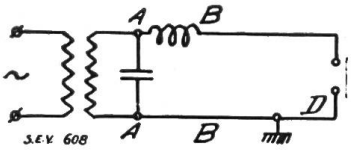

Fig. 17a.
Schaltungsschema zu den oszillographischen Aufnahmen Fig. 17 und Fig. 18.

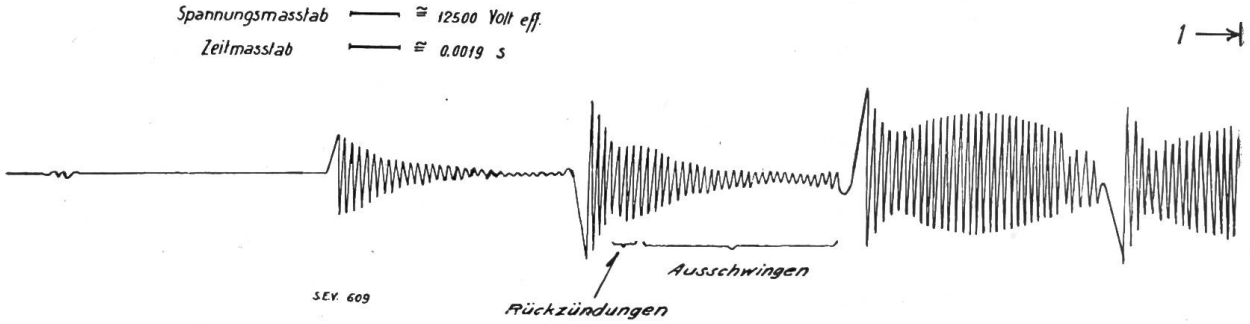

Fig. 18, (linke Hälfte).
Einfluss von Parallelkapazitäten zu Oelschaltern auf den Abschaltvorgang. Schalters. Kapazität angeschlossen

k) Bedeutung der Stromart (beanspruchende Spannung).

Im allgemeinen erreicht bei dreipoligem Kurzschluss die beanspruchende Spannung, d. h. die Spannung, welche die Wiederzündung des Lichtbogens bewirkt, 1,5fache Phasenspannung und nur im Falle, wo der Nullpunkt des Netzes sowie der Kurzschlusspunkt direkt an Erde liegen, ist sie der Phasenspannung gleich. Aus den früheren Erörterungen ergibt sich, dass in diesem letzteren Fall beinahe 1,5fache Verkleinerung der Lichtbogenlänge zu erwarten ist. Die Messungen im Prüffeld bestätigen diese Betrachtungen, indem bei vergleichenden Abschaltungen mit einem dreipoligen Schalter unter 23 kV verketteter Spannung und Strömen bis 650 A das Verhältnis der Mittelwerte bei ungeerdetem und geerdetem Nullpunkt zu 1,7 bestimmt wurde.

In einem geerdeten Netz ist somit eine Erleichterung des Abschaltvorganges nur dann zu erwarten, wenn der dreipolige Kurzschluss sich gleichzeitig zu einem Erdschluss ausbildet, was verhältnismässig selten der Fall sein dürfte. Die direkte Erdung des Netzes kann aus diesem Grunde als Mittel zur Entlastung der Oelschalter nicht in Betracht kommen[20]).

[20]) In diesem Zusammenhang sei hier auf die Versuche im 132 kV-Netz der American Gas and Electric Company hingewiesen, die scheinbar im Widerspruch mit unsern Messungen stehen. Bei der Prüfung der Schalter mit Löschkammern hat man Schaltungen mit geerdetem Nullpunkt und geerdetem Kurzschlusspunkt und daraufhin einige Versuche mit ungeerdetem Kurzschlusspunkt ausgeführt, wobei kein Unterschied zwischen den gemessenen Lichtbogenlängen festgestellt werden konnte. In einem grossen Netz liegen also die Verhältnisse scheinbar etwas anders als bei den Messungen im Prüffeld. Die Erklärung dazu muss nach meiner Auffassung in der relativ kleinen Eigenfrequenz des Netzes gesucht werden, welche das Ausschwingen der Netzphasen auf 1,5fache Phasenspannung bedeutend verlangsamen kann. Der Unterschied zwischen den Abschaltungen mit geerdetem und ungeerdetem Kurzschlusspunkt könnte dadurch weniger ausgeprägt sein. Diese Eigenschaft grosser Netze, die allerdings noch weiterer Bestätigungen bedarf, kommt den wegen grosser Leistungskonzentration stark beanspruchten Schaltern zu gute, die demnach in gewissem Masse eine Entlastung erfahren. Es wäre ausserordentlich wertvoll, feststellen zu können, ob auch in weniger ausgedehnten oder mit etwas niedrigeren Spannungen betriebenen Netzen diese Erscheinung in gleichem Masse die Abschaltungen beherrscht. Diesbezügliche Versuche hätten wirtschaftlich wegen möglicher Verbilligung der Schalter eine grosse Bedeutung.

l) Abhängigkeit der Lichtbogenlänge vom Leistungsfaktor des Kurzschlusskreises. Einfluss der Frequenz.

Vollständigkeitshalber sei auf die Wirkung der Phasenverschiebung auf die Lichtbogenlänge hingewiesen. Diese Frage lässt sich an Hand der in Fig. 3 abgebildeten Kurven unter Berücksichtigung der momentanen Werte der wiederkehrenden Spannung bei verschiedenen $\cos\varphi$ beantworten. Es kann leicht gezeigt werden, dass bei um 90^0 nacheilendem Kurzschlusstrom und gegebener Spannung die grösste Lichtbogenlänge auftreten muss. In der Praxis hat man bei Kurzschluss mit stark induktiven Kreisen, deren $\cos\varphi$ unter 0,3 liegen dürfte, zu tun, so dass eine genauere Untersuchung der Verhältnisse für höhere Werte von $\cos\varphi$ nur im Zusammenhang mit der Verwendung von Schalterschutzwiderständen Interesse bietet. Wir beschränken uns deshalb auf diese kurze Bemerkung.

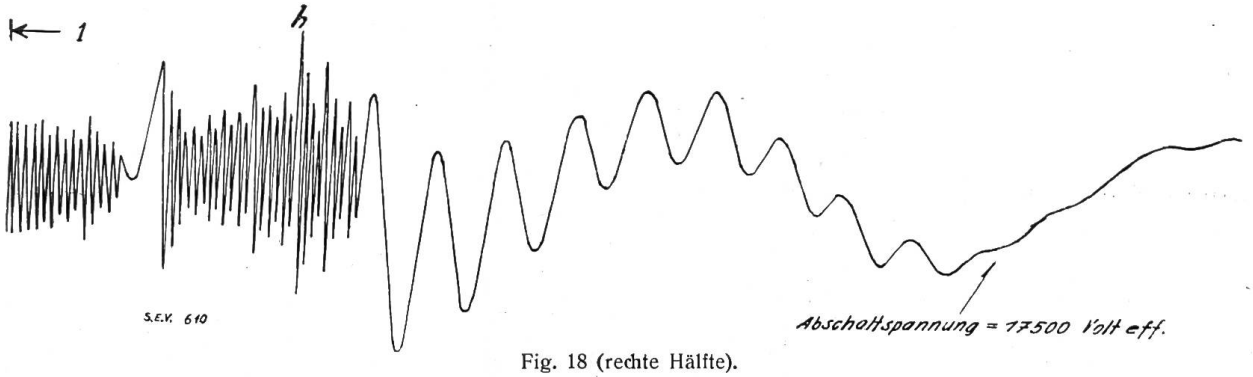

Fig. 18 (rechte Hälfte).
$c = 0{,}177 \cdot 10^{-6}$ *F*. Kathodenoszillogramm der Spannung an den Klemmen des vor der Drosselspule (Fig. 17a).

Ueber die Beeinflussung des Löschprozesses durch die Frequenz findet sich bis jetzt in der Fachliteratur meines Wissens kein Versuchsmaterial. Man ist auf theoretische Ueberlegungen angewiesen, die für grössere Lichtbogenlängen eine Erleichterung des Abschaltvorganges bei kleineren Frequenzen erwarten lassen. Auf alle Fälle wird die relativ kleine Abweichung zwischen den für allgemeine Verteilungsnetze üblichen Frequenzen von 40 bis 60 Perioden keine merkliche Rückwirkung auf die zulässige Abschaltleistung eines Schalters ausüben können. Auch diese Frage wollen wir darum nicht näher betrachten und schliessen vorläufig unsere Ausführungen über die Lichtbogeneigenschaften, um uns mit einer andern Seite des Oelschalterproblems zu befassen.

4. Vorgänge im Schalterinnern. Experimentelle Bestätigung der Oelkolbentheorie.

Die im Abschaltlichtbogen in Wärme umgesetzte Energie lässt sich nach Vorangehendem leicht ausrechnen. Aus den in Fig. 3 abgebildeten Kurven leitet man, unter Berücksichtigung der Anzahl der Unterbrechungsstellen für gegebene Abschaltspannung und Abschaltstrom, die *Lichtbogenlänge* l_a ab. Die Abschaltcharakteristik des Schalters ergibt die *Lichtbogendauer* t_a und die Charakteristiken der Fig. 1 die spezifische *Lichtbogenspannung* pro cm Länge e_0. Da die Lichtbogenspannung ziemlich genau dem Elektrodenabstand proportional ist, berechnet sich die Schalterarbeit nach dem Integral

$$A = \int_0^{t_a = nT} i\,e\,dt = \int_0^{t_a = nT} \sqrt{2}\,I \sin\omega t.\ \ l e_0\,dt = \int_0^{t_a = nT} \sqrt{2}\,I \sin\omega t.\ \ e_0\,(at^2 + vt)\,dt,$$

$$(t_a = nT = \text{Lichtbogendauer}, \quad T = {}^1/_2 \text{ Periodendauer}),$$

wenn die Abschaltbewegung als eine gleichmässig beschleunigte und die Lichtbogenspannung nach der Gleichung $e = e_0 l = e_0\,(at^2 + vt)$ angenommen werden. Bei

dieser Rechnung kann die Rückwirkung des Ueberdruckes auf die Lichtbogendauer und Lichtbogenspannung, d. h. auf die Gleichung $e = e_0 l$ vernachlässigt werden, da die Druckzunahme bis 7 kg/cm² den Abschaltvorgang günstig beeinflusst, was bei der Dimensionierung des Schalters nachträglich berücksichtigt werden kann.

Die Integration bietet keine Schwierigkeiten und führt zum Ergebnis

$$A = \frac{\sqrt{2}\ I\ e_0}{\omega}\left\{aT^2\left[\frac{(2n^2+1)\,n}{3} - \frac{4n}{\pi^2}\right] + vn^2T\right\}$$

Ersetzt man die beschleunigte Traversenbewegung durch eine äquivalente gleichmässige Bewegung ($a = 0$), so vereinfacht sich der obige Ausdruck wie folgt:

$$A = \frac{\sqrt{2}\ I\ e_0}{\omega}\ v\ n^2T = \frac{\sqrt{2}}{\pi}\ I\ e_0\,(v\ nT)\ nT$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\pi} I\ e_0\ l_a\ t_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi}\ I\ e_a\ t_a$$

wobei mit e_a die Lichtbogenspannung an einer Unterbrechungsstelle im Moment der definitiven Löschung des Lichtbogens bezeichnet ist. Diese einfache Formel und die entsprechenden Lichtbogencharakteristiken erlauben sehr rasch und genügend genau (vergl. Tabelle III) die im Schalter frei werdende Wärme vorauszubestimmen.

Die im Lichtbogen entwickelte Energie wird bekanntlich zur Erwärmung und Verdampfung des Kontaktmaterials, zur Erzeugung mechanischer Arbeit wie Oelbewegung, bei bestimmten Schalterkonstruktionen auch zur Beschleunigung der

Vergleichende Tabelle der gerechneten und gemessenen Schalterarbeit. Einphasige Kurzschlüsse. Verschiedene Abschaltleistungen. Tabelle III.

Versuchs-Nr.	Schalterarbeit	
	kWs gemessen	kWs gerechnet
1	68	60,5
2	76	76,5
3	60	62,8
4	65	56
5	66,5	62,8
6	128	123
7	144	138
8	222	227
9	113	119
10	102	96
11	48	50,5
12	32	36
13	214	206
14	145	134
15	145	176

Kontakte, oder Kessel- und Deckeldeformationen, in der Hauptsache aber zur Verdampfung und Erwärmung des Oeles, sowie zur Ionisation des Gasstranges verwendet [21]). Die Messungen von B. Bauer sowie andere seitdem auf diesem Gebiet bekannt gewordene Arbeiten haben gezeigt, dass zwischen der Schalterarbeit und der erzeugten Gasmenge ein bestimmtes Verhältnis besteht und zwar nach B. Bauer [1]) erzeugt ein kWs Schalterarbeit rund 46,5 cm³ Schaltergas,

G. Brühlmann [3]) rechnet pro kWs 50 cm³ Schaltergas.

F. Kesselring [21]) leitet aus seinen Messungen 60 cm³ Schaltergas bei 15° C und 760 mm Hg Druck ab. Unsere neuzeitlichen Untersuchungen bei grossen

[21]) F. Kesselring, E. T. Z. 1927, Heft 35 und 36, S. 1278 und 1312.

Leistungen ergaben noch höhere Werte. Es zeigte sich, dass mit zunehmender Schalterarbeit auch das pro kWs entwickelte Gasvolumen eine Steigerung aufweist, was auf den im Schalter entstehenden Druck und Wärmeverlust zurückgeführt werden muss. Die verwendete Messanordnung bestand aus einer geeichten Glasglocke, die in ein mit Oel gefülltes Gefäss eintauchte und mit dem Luftkissen des Schalters über ein Rohr in Verbindung stand. Vor der Abschaltung wurde jeweils mittels einer Vacuumpumpe der Luftdruck in der Messglocke und folglich im Luftkissen so weit verkleinert, bis das Oel aus dem Gefäss auf das gewünschte Niveau in der Glocke gebracht wurde. Die entwickelten Schaltergase verdrängten das Oel in der Glasglocke und ihr Volumen konnte direkt an der Skala abgelesen werden. Die Schalterarbeit wurde bei jeder Abschaltung mit einem ballistischen Spiegeldynamometer gemessen, so dass man die Möglichkeit hatte, grosse Versuchsreihen in relativ kurzer Zeit durchzuführen.

Während des Abschaltvorganges befinden sich die Gase in der nächsten Nähe des Lichtbogens und haben deshalb eine sehr hohe Temperatur, nach Schätzungen von Brühlmann etwa 1500° absolut. Ihr Volumen in heissem Zustand stellt deshalb ein vielfaches desjenigen des abgekühlten Gases dar. Man muss ausserdem die in der heissen Gassphäre vorhandenen Oeldämpfe, welche bei der Abkühlung wieder kondensieren und einer direkten Messung deshalb nicht zugänglich sind, bei der Berechnung des heissen Gasvolumens berücksichtigen. Die Ueberlegungen von Brühlmann führen zu der Schlussfolgerung, dass, unter Annahme von 50% Dampfgehalt, das Volumen der heissen Gasblase 7,5mal so gross sein muss wie die kalt gemessene Gasmenge, beide Volumina auf gleichen statischen Druck bezogen.

In einem Fachbericht von P. Altbürger[22]) wurde aus dem Vergleich des kalten und heissen Gasvolumens, wobei dieses letztere aus den Aufnahmen mit der Zeitlupe ermittelt wurde, geschlossen, dass das Gas im heissen Zustand etwa das 5,5fache Volumen einnimmt. Diese Schlussfolgerungen bedürfen jedoch einer weitern Bestätigung, weil während der erwähnten Zeitlupenaufnahme einerseits keine Druckmessung und anderseits keine Messung der Gasmenge in kaltem Zustand gemacht wurde.

Durch eine überschlägige Rechnung überzeugt man sich leicht, dass bereits bei Abschaltung von einigen 10000 kVA eine grosse Gasmenge im Schalterinnern in der ausserordentlich kurzen Zeit entwickelt wird und um jede Kontaktstelle eine grosse Gassphäre bildet. Entsprechend dem von der Gaskugel eingenommenen Volumen wird der grösste Teil des oberhalb der Kontakte sich befindlichen Oeles nach oben verdrängt und wegen der ungemein raschen Gasentwicklung gegen den Schalterdeckel als ein ganzes in Form eines „Oelkolbens" geschleudert. Die Luft aus dem Schalter wird dabei durch die Expansionsöffnungen hinausgedrückt und das Oel steigt so lange, bis es durch den Deckel aufgehalten wird. Durch den Anprall des Oelkolbens auf den Schalterdeckel bewirkt die aufgespeicherte kinetische Energie des Kolbens ein Aufspringen des Schalters und das Ausspritzen mehr oder weniger grosser Oelmengen durch die Expansionsöffnungen. Allerdings, bei richtiger Bemessung dieser letzteren und wegen der relativ grossen Masse des Oeles ist es möglich, den Oelauswurf klein zu halten. Ist der Abschaltprozess noch nicht beendigt, so werden weitere Gasmengen erzeugt, und da die Gasblase sich praktisch nicht mehr ausdehnen kann, bewirkt sie im Schalterinnern eine Druckerhöhung, die bei ungenügender Festigkeit der Konstruktion eine Zerstörung des Apparates zur Folge haben kann. Das ist die häufigste Ursache der Schalterexplosionen, die mit einer eigentlichen Gasexplosion nichts zu tun hat. Kennt man aber die bei gegebenen Abschaltverhältnissen zu erwartende totale Gasmenge und ihre Temperatur im voraus, so hat man es in der Hand, den entstehenden Druck durch genügend grossen Luftraum oberhalb des Oelspiegels in gewünschten Grenzen zu halten. Nachdem nun die Schaltergase durch die Auftriebskraft bis auf die obersten Schichten

[22]) P. Altbürger, Oelschalter-Untersuchungen, V. D. E. Fachberichte der XXXII. Jahresversammlung V. D. E., Kiel 1927.

des Oelkolbens, d. h. bis in die Auspufföffnungen gelangen, können sie aus dem Schalter entweichen und bilden meistens dicke schwarze Rauchschwaden. Die Gasblase und die Luft sind jedoch im Schalter während der ganzen Abschaltung durch eine Oelschicht getrennt. Eine Gasexplosion kann deshalb durch die glühenden Lichtbogengase im Schalterinnern nicht verursacht werden, da dazu nach Untersuchungen von B. Bauer relativ viel Sauerstoff vorhanden sein muss. Im übrigen wäre der Explosionsdruck ohne Vorkompression für die neuzeitliche Schalterkonstruktion ungefährlich, da die Schalter für den bei der Abschaltung entstehenden grösseren Gasdruck bemessen werden.

Dieses von Brühlmann im Jahre 1925 geschilderte Bild des Abschaltvorganges konnte seitdem in allen Einzelheiten bestätigt werden. Die schon erwähnten Zeitlupenaufnahmen von F. Kesselring [21]) und P. Altbürger [22]) an einem kleinen Glasschalter von rund 20 dm^3 Inhalt und zweifacher Unterbrechung zeigten die Bildung des Oelkolbens bereits bei 1500 bis 2000 kVA Abschaltleistung. Die aus dem Film abgeleitete Geschwindigkeit des Oelkolbens erreichte 4 bis 6 m/sec. Diese Zahl steht in sehr guter Uebereinstimmung mit unsern überschlägigen Berechnungen, die der Autor auf Grund von Abschaltversuchen mit 100 000 kVA vor einigen Jahren gemacht hat [23]). Wir haben damals die Höhe gemessen, auf welche der frei am Boden aufgestellte Schalter bei der Abschaltung aufgeworfen wurde. Unter Annahme, dass dieser Sprung durch die kinetische Energie des Oelkolbens hervorgerufen ist, konnte daraus die aufgespeicherte Energie der in Bewegung gesetzten Oelmassen bestimmt werden. Aus den Abmessungen des Schalters haben wir dann die Masse des Oelkolbens geschätzt und die Geschwindigkeit dieses letzteren abgeleitet. Unsere Werte lagen zwischen 3 bis 5 m/sec.

Interessante Beobachtungen konnten im Herbst 1927 während der gross angelegten Kurzschlussversuche in einem schweizerischen 15 kV-Netz gesammelt werden. Mit dem 3poligen BBC-Hochleistungsschalter Type AV 10/3 mit Solenoidkontakten wurden dabei mehrmals Leistungen bis 165 000 kVA [24]) abgeschaltet. Die in relativ kleiner Entfernung vom Versuchsschalter stehenden Beobachter konnten die 3 Phasen des Abschaltvorganges von aussen deutlich wahrnehmen. Nach der zischend aus dem Schalter herauspuffenden Luft wurde regelmässig ein kurzer Oelstrahl von einigen cm^3 ausgestossen und sogleich nachher die noch unter Druck stehenden Schaltergase. Der Schalter, der noch weit unterhalb der Grenze seiner Abschaltleistung gearbeitet hat, wurde durch den Oelkolben nur wenig gehoben. Von irgendwelchen Flammenerscheinungen war dabei nichts zu sehen.

Zwecks einer eingehenden Erforschung der Vorgänge in Oelschaltern wurde bereits im August 1926 beschlossen, im Prüffeld der A.-G. Brown, Boveri & Cie. ausgedehnte Untersuchungen unter Benützung der Zeitlupe anzustellen. Durch die Aufnahmen sollte zuerst die Oelkolbentheorie bestätigt werden; weitere Versuche bezweckten, das Volumen der Gase in heissem und kaltem Zustand, sowie die Gasentwicklung während der Abschaltung festzustellen. Der für die Versuche verwendete Glasschalter mit einer Unterbrechungsstelle besteht in der Hauptsache aus einem 400 mm weiten, 700 mm hohen und 7 mm starken Glaszylinder, der in ein zweites, gleichfalls ölgefülltes, rechteckiges Glasgefäss eingeschlossen ist. Die zylindrische Form des ersten Gefässes wurde der grösseren Festigkeit halber gewählt, das rechteckige Glasgefäss sollte die linsenartige Wirkung des mit Oel gefüllten Zylinders und die dadurch bedingten optischen Fehlerquellen verhindern. Nur die Schalterteile oberhalb des Oelspiegels im innern Zylinder erscheinen bei dieser Anordnung dünner als normal, was für die Messung der Gasblase keine Bedeutung hatte, hingegen bei der Feststellung der Oelhöhe während der ganzen Oelkolbenbewegung vorteilhaft war.

---

[23]) Dr. J. Kopeliowitsch, E. T. Z. 1927, Heft 36, S. 1316.

[24]) Gerechnet nach der schweizerischen Definition der Abschaltleistung. Vergl. diesbezüglich: Dr. J. Kopeliowitsch, Bulletin S. E. V. 1928, Nr. 9, S. 277.

Um auch Abschaltungen unter Verwendung von Druckkammern zu ermöglichen, wurde der Antriebsmechanismus unter dem eigentlichen Schalter angeordnet (Fig. 19). Auf diese Weise konnte ausserdem im Glaszylinder eine vollkommen symmetrische Anordnung beider Kontakte erreicht werden, was theoretische Betrachtungen vereinfachte.

Zur oszillographischen Messung der Ausschaltbewegung wurde ein Gleitkontakt verwendet, der alle Zentimeter einen Stromstoss im Oszillographenkreis zu registrieren erlaubte. Ein ausserhalb des Schalters angebrachter Zeiger gab auf dem Film die momentane Lage des untern Kontaktes bekannt, woraus man zu jedem Bild den entsprechenden Zeitmoment auf dem Oszillogramm bestimmen konnte.

Zur Aufnahme diente eine von Hand betätigte Zeitlupe, die bis 300 Bilder pro Sekunden aufzunehmen erlaubte. Für die Versuche wurde eine 5 m × 3 m grosse Holzbaracke hergestellt, deren Grundriss in Fig. 20 skizziert ist. Um eine genaue Auswertung der Bilder zu ermöglichen, benützte man einen unter 45° gestellten Spiegel, was gleichzeitige Aufnahmen in zwei zu einander senkrechten Ebenen erlaubte. Während der Aufnahmen wurde der Glasschalter mit 750 A starken Scheinwerfern durchleuchtet. Folgende Daten wurden oszillographisch gemessen: Kurzschlusstrom, Lichtbogenspannung, Ausschaltbewegung; auch der im Schalter herrschende Druck wurde mittels einer mit 1000 Perioden gespeisten Messbrücke, die so ausgebildet ist, dass die Ausschläge proportional der Druckzunahme sind, oszillographisch registriert; mit einem ballistischen Dynamometer konnte ausserdem die Schalterarbeit direkt bestimmt werden, so dass alle für eine vollständige Auswertung des Versuches nötigen Unterlagen verschafft waren.

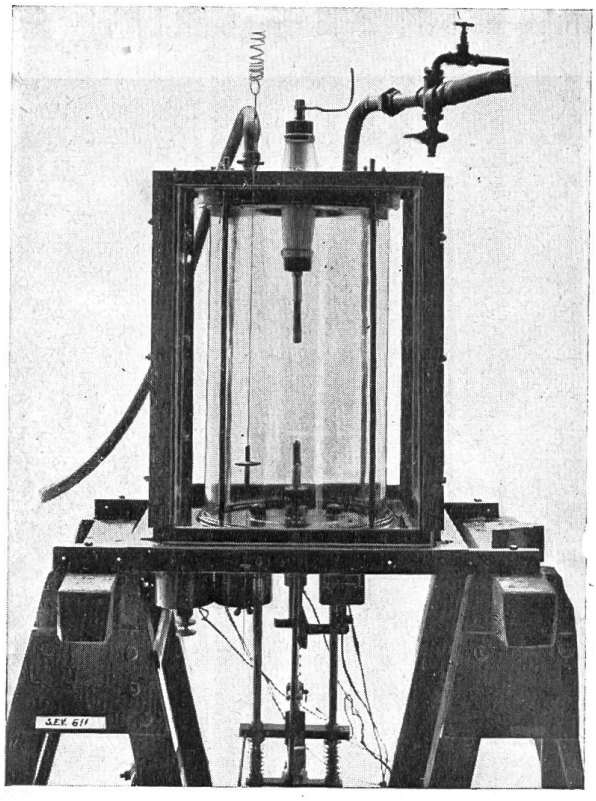

Fig. 19.
Oelschalter für Aufnahmen mit der Zeitlupe. Der Schalter besteht aus einem Glaszylinder und einem rechteckigen Glaskasten. Oelvolumen ca. 90 Liter.

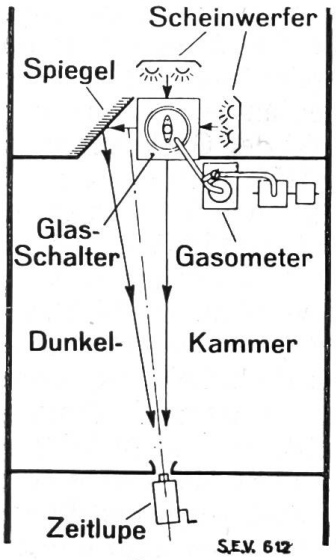

Fig. 20.
Grundriss der Versuchsanordnung für Zeitlupenaufnahmen. Bis 300 Bilder/sec.

Die Zeitlupenaufnahmen der Abschaltungen erlauben einen interessanten Einblick in die Vorgänge im Oelschalter. Die Bildung einer rasch wachsenden kugelförmigen Gasblase um die Kontakte, die wegen des ausgeschiedenen Kohlenstoffes vollkommen schwarz erscheint, sowie die Oelkolbenbildung sind deutlich ersichtlich und dies trotz einer im Verhältnis zu den Abmessungen des Schalters (90 dm³) relativ kleinen Abschaltleistung bezw. Schalterarbeit. Das Volumen des Schalters entspricht demjenigen eines neuzeitlichen Schalters von rund 60000 bis 100000 kVA Abschaltleistung, währenddem die bei diesen Aufnahmen verwendete Leistung nur bis 12000 kVA gesteigert wurde.

Einige Versuche zeigen die interessante Erscheinung, dass die Glasblase nicht immer während der ganzen Abschaltperiode kugelförmig bleibt, sondern dass sich manch-

mal unter der eigentlichen Blase ein neues Gasentwicklungszentrum bilden kann. Die entwickelte Gasmenge kann dann verschiedene Formen annehmen, z. B. können sich neue, von der ersten Blase fast getrennte, kugelförmige Blasen bilden, oder es kann ein länglicher, nach unten gerichteter Fortsatz der ersten Blase entstehen (Fig. 21). Die Erscheinung ist auf den Bildern hauptsächlich nach dem Löschen des Lichtbogens zu erkennen, sie tritt aber bereits vorher auf und ist nur wegen der starken Ueberlichtung durch den Lichtbogen weniger gut sichtbar.

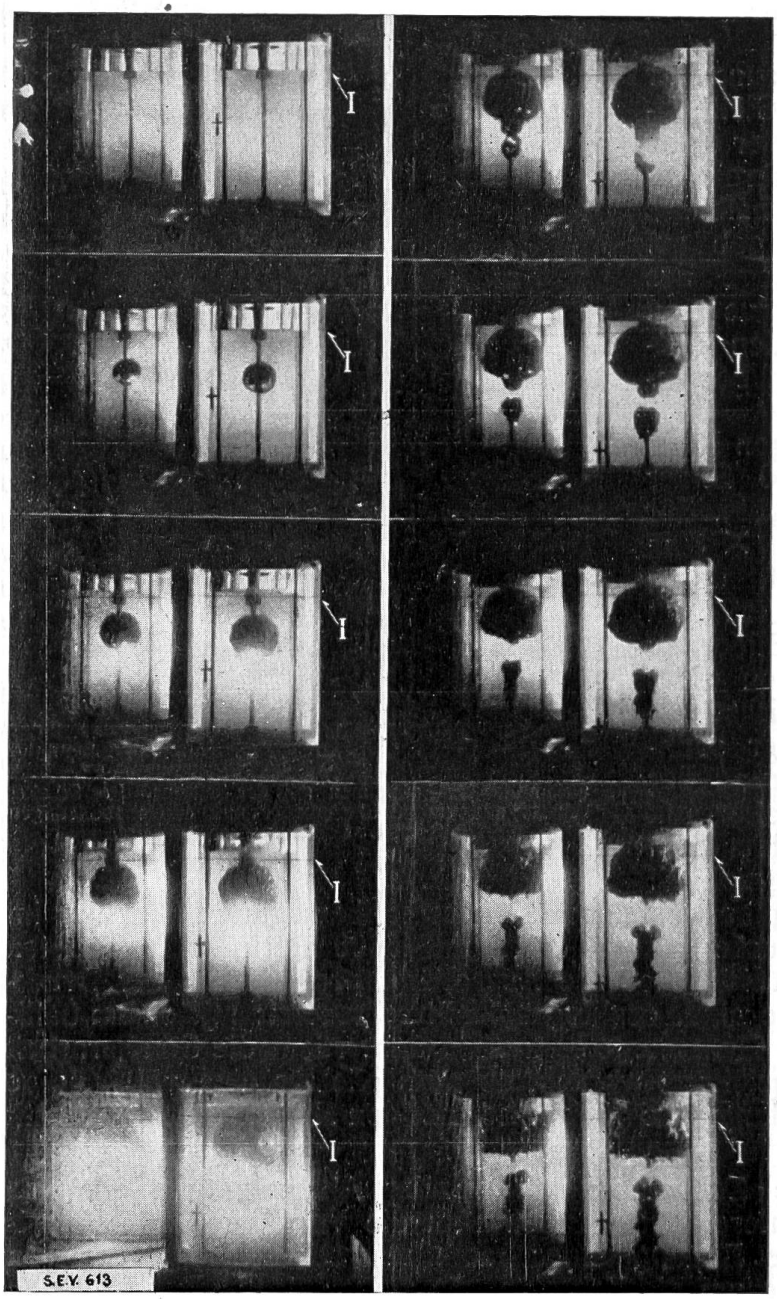

Fig. 21.
Ausschnitt aus einer Zeitlupenaufnahme. Abschaltung von 10000 kVA mit einer Unterbrechungsstelle. Die Bildung des Oelkolbens ist deutlich ersichtlich. *I* = ursprüngliches Oelniveau.

Die Ursache dieses Vorganges kann im folgenden erblickt werden: Vom Moment der Kontakttrennung beginnt um den Lichtbogen eine intensive Bildung der Gase, die naturgemäss eine kugelförmige Gestalt annehmen. Die aus einem vergrösserten Film abgeleitete Entwicklung der Gasblase, deren Radius direkt ermittelt wurde, sowie die Lichtbogenlänge und die Schalterarbeit während der Abschaltung wurden als Kurven in Funktion der Abschaltzeit aufgetragen. Es zeigte sich, dass die entwickelte Gasmenge und die Lichtbogenlänge nach oben gekrümmte Charakteristiken hatten (beschleunigte Abschaltbewegung). Der Kugelradius nimmt anfänglich schnell, dann aber etwas langsamer zu. Noch vor Ende der Abschaltung ist der Kugelradius gleich der Lichtbogenlänge; wenn der Mittelpunkt der Gaskugel stets auf der gleichen Höhe bleiben würde, so würde in diesem Augenblick der Lichtbogen nach unten aus der Gasblase herausgezogen werden. In Wirklichkeit steht aber die Gasblase nicht still: sie hat einerseits die Tendenz, mit dem Lichtbogen nach unten mitzugehen, anderseits aber infolge der Auftriebskräfte und hauptsächlich infolge des kleineren Widerstandes, welcher einer Oelbewegung nach oben im Wege steht, kommt der Mittelpunkt der Gaskugel in eine langsame nach oben gerichtete Bewegung, während der untere Rand der Blase sich anfänglich langsam nach unten, dann aber ebenfalls etwas nach oben bewegt. Es ist nun klar, dass der Austritt des Lichtbogens aus der Gasblase relativ rasch erfolgen muss und sobald dies

geschehen ist, beginnt auf seiner freien Länge die Gasentwicklung wieder wie am Anfang. Es bildet sich unter der eigentlichen Gasblase ein Fortsatz oder eine zweite bezw. eine dritte kleine mit der ersten zusammenhängende Kugel. Der Vorgang der Gasentwicklung spielt sich aber nicht immer in gleicher Weise ab; andere Aufnahmen, wie oben erwähnt, zeigen, dass der Lichtbogen auch löschen kann, bevor er aus der Gasblase austritt.

Vergleicht man die während des Abschaltprozesses entwickelte Gasmenge in heissem Zustand und unter dem jeweiligen Druck, mit der Schalterarbeit, so bekommt man für dieses Verhältnis stetig zunehmende Werte, welche im Maximum 0,32 dm^3/kWs erreichen, eine schöne Bestätigung des von Brühlmann angenommenen Wertes von 0,35 dm^3/kWs. Auch das Verhältnis der Gaszunahme pro 0,01 sec zu der Schalterarbeit während der gleichen Zeit nimmt allmählich zu. Die mittlere Temperatur der Gasblase kann nicht eindeutig bestimmt werden, da die Menge der wiederkondensierenden Oeldämpfe der Messung unzugänglich ist. Immerhin können die Grenztemperaturen angegeben werden: Vernachlässigt man die Oeldämpfe in der Gasblase ganz, so bekommt man als den höchsten Grenzwert ca. 800 ^{0} absolut. Berechnet man die Temperaturen unter Annahme eines Dampfgehaltes der Blase von 50 $^0/_0$, so ergeben sich Temperaturen, die ca. 550 ^{0} absolut nicht überschreiten. Für das Verhältnis der Gasvolumina in heissem und kaltem Zustand, beide auf atmosphärischen Druck bezogen, erhält man Zahlen, die zwischen 2 und 4 schwanken.

Die Aufnahmen in zwei senkrechten Ebenen waren bei der Ermittlung des Volumens der Gasblase von sehr grossem Wert. Ausserdem hat diese Anordnung weitere wertvolle Beobachtungen zu sammeln erlaubt. Bei einem Versuch zeigte z. B. die in Funktion der Abschaltzeit aufgetragene Lichtbogenspannung nach 0,08 sec nach der Auslösung eine Unstetigkeit, indem nach einer Neuzündung die Lichtbogenspannnng viel kleiner geworden ist, als während der vorangehenden Halbwellen. Aus den entsprechenden Zeitlupenbildern konnte nun einwandfrei geschlossen werden, dass der Lichtbogen vor diesem Zeitpunkt sich an dem, dem Aufnahmeapparat gegenüberliegenden Rand der Gasblase ausgebildet hatte. Die Gasblase erscheint deshalb im Hauptbild hell weiss, im Spiegelbild wegen der starken Lichtabsorption der dichten Russchwaden dunkel schwarz. Nach der Neuzündung zeigte sich in beiden Bildern eine schwarze Gasblase, woraus gefolgert werden konnte, dass der Lichtbogen einen neuen Weg im Innern der Gaskugel gewählt hat, über welchen wegen einer etwas weniger intensiveren Kühlung der Spannungsabfall kleiner war.

Der während des Abschaltvorganges registrierte Druck weist Schwankungen auf, welche mit der Schalterarbeit und den Abkühlungsverhältnissen der Gasblase zusammenhängen. Das Verhältnis des Volumens einer Kugel zu ihrer Oberfläche ist $\frac{R}{3}$; pro cm^2 Oberfläche hat man somit bei kleinen Gasblasen das kleinste Volumen und die Abkühlung der Gase, die ausserdem eine höhere mittlere Temperatur aufweisen müssen, als bei grossen Blasen, kann deshalb am Anfang des Abschaltvorganges viel rascher vor sich gehen. Wenn man annimmt, dass die Wärmeabgabe pro cm^2 Oberfläche proportional der Temperaturdifferenz erfolgt und dass die pro Volumeneinheit der Gasblase aufgespeicherte Wärmemenge proportional der absoluten Temperatur und dem Drucke ist, so ist leicht einzusehen, dass die Abkühlung und dementsprechend die Druckpulsationen, die übrigens nur kleine Werte aufweisen, viel ausgesprochener bei kleinen Gaskugeln sein müssen. Die Messungen sind im Einklang mit dieser Ueberlegung, wie dies aus dem Oszillogramm der Fig. 22 ersichtlich ist. Ganz besonders kommt diese Erscheinung bei Vielfachunterbrechung zum Vorschein, da wegen grösserer Oberfläche der vielen Gasblasen, die während jeder Halbwelle neu erzeugte Gasmenge rascher abgekühlt werden kann. Entsprechende Versuche mit fünffacher Unterbrechung haben die Be-

stätigung dieser Verhältnisse erbracht, indem bei ca. 24000 kVA im Vergleich mit einfacher Unterbrechung viel kleinere Druckstösse und am Anfang während einiger Zeit ein ganz minimaler Druck im Schalter nachgewiesen werden konnte. Durch Anwendung der Vielfachunterbrechung verkleinert man, wie oben gezeigt wurde, bei gegebener Abschaltleistung die Lichtbogendauer, die Schalterarbeit und somit die Gasmenge. Der Vorgang spielt sich naturgemäss viel rascher ab als bei der

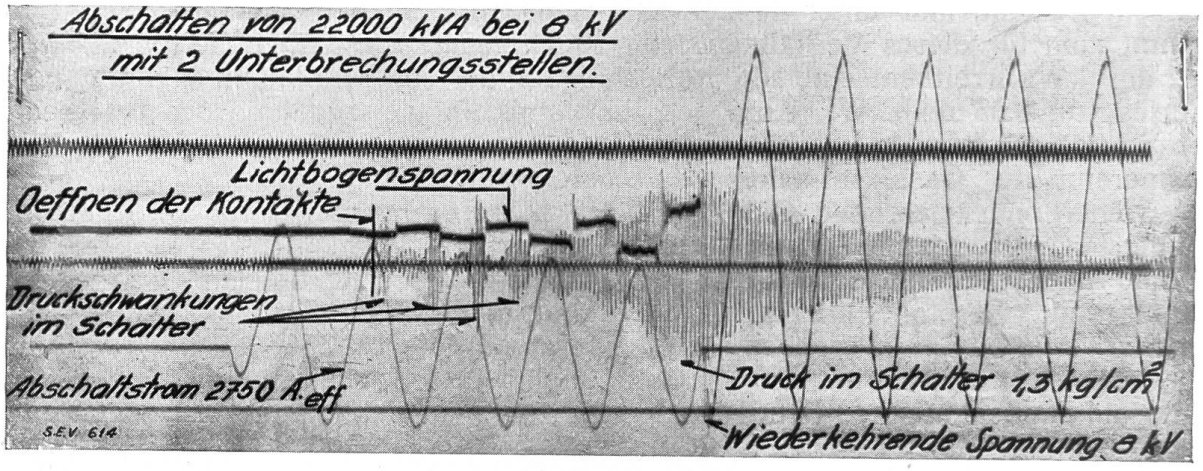

Fig. 22.
Oszillogramm einer Abschaltung von 22000 kVA mit 2 Unterbrechungsstellen. Nach der Entstehung des Lichtbogens treten im Schalter Druckschwankungen auf.

Abschaltung mit einer einzigen Unterbrechung; die Druckerhöhung im Schalter bleibt jedoch viel kleiner trotz einer grösseren Beschleunigung des Oelkolbens. Dieses eigentümliche Verhalten erklärt sich in sehr einfacher Weise, da eine grössere Beschleunigung des Oelkolbens bei gegebener Oelhöhe, dank der Vergrösserung der totalen Fläche der Gasblase bei einem relativ kleineren Druck zustande kommen kann. Die Vielfachunterbrechung bietet somit ausser den soeben erwähnten Vorteilen noch denjenigen einer Entlastung der Schalterkonstruktion von gefährlichen Druckstössen, die während des Abschaltprozesses auftreten können.

5. Ueber die Verwendung der Lösch- bezw. Druckkammern im Oelschalterbau.

Bis jetzt wurden nur die Eigenschaften der offenen Unterbrechung besprochen und es wurde gezeigt, in welch einfacher Weise aus den Untersuchungen an einer einzigen Unterbrechung über das Verhalten eines Schalters mit doppelter oder Vielfachunterbrechung geschlossen werden kann. Aus obigen Ausführungen kann gefolgert werden, dass mit verhältnismässig einfachen Mitteln unter Zugrundelegung der Versuchsresultate diese Schalter auf ihre Beanspruchung gerechnet werden können.

Ein etwas anderer Weg im Schalterbau wurde indessen von verschiedenen Konstrukteuren eingeschlagen, die eine Steigerung der Abschaltleistung durch Verwendung der sog. Lösch- bezw. Druck- oder Explosionskammern zu erzielen suchen. Bei dieser Ausführungsform tragen die feststehenden Kontakte aus Metall oder Isolierstoffe gebaute Kammern. Durch eine Oeffnung in der Unterseite wird der bewegliche Kontakt in die Kammer eingeführt, wodurch diese Oeffnung fast gänzlich abgeschlossen wird. Je nach Bauart erhalten die Explosionskammern im oberen Teil nach oben hin oder seitlich einige kleine Löcher, die eine langsame Oelzirkulation ermöglichen. Gegenüber den beweglichen Stiftkontakten liegen aus einigen Segmenten bestehende *Tulpenkontakte,* die zur Kontaktgabe den oberen Teil des Stiftes aufnehmen.

Der Abschaltprozess in einem Löschkammerschalter kann in zwei Teile unterteilt werden: während des ersten ist das Innere der Kammer nach aussen hin

durch den beweglichen Kontakt, der die untere Oeffnung ausfüllt, praktisch ganz abgeschlossen; im zweiten Teil befindet sich der Stift ausserhalb der Explosionskammer und die untere Oeffnung liegt frei. Die in der Explosionskammer durch den Lichtbogen erzeugten Oelgase haben eine rasche Drucksteigerung zur Folge, da zu ihrer Ausdehnung nur das vom beweglichen Kontakt freigegebene Volumen zur Verfügung steht. Unter der Wirkung des hohen Druckes vergrössert sich, wie wir auf S. 550 gesehen haben, die Lichtbogenspannung, sowie die Gasentwicklung, während die Bewegung der Kontakte stark beschleunigt wird. Zur Erzielung einer noch grösseren Abschaltgeschwindigkeit werden ausserdem öfters sog. Schnellkontakte verwendet. Nachdem der Stiftkontakt die Kammer verlassen hat, können die Gase durch die untere Oeffnung in den Oelkessel expandieren.

Die physikalische Seite des Löschvorganges in einer Druckkammer ist meines Wissens noch wenig erforscht und in der Fachliteratur konnte ich darüber nicht viel finden. Im Jahre 1916 wurden die ersten Leistungsprüfungen von Löschkammerschaltern in der E. T. Z.[25]) veröffentlicht. In der neuzeitlichen Literatur [22]), [26]), [27]), [28]), [29]) sind weitere Prüfungen bekannt geworden, die interessante Schlussfolgerungen inbezug auf die Leistungsfähigkeit der Löschkammerschalter zulassen, den physikalischen Vorgang der Lichtbogenlöschung aber nur wenig beleuchten. Es bestehen deshalb heute noch verschiedene Ansichten darüber, ob die raschere Löschung der Oelbewegung, oder dem erzeugten Druck, oder noch der Benetzung des untern Kontaktes durch das Oel [30]) zuzuschreiben ist. Im allgemeinen wird angegeben, dass der Lichtbogen spätestens in dem Augenblick, wo der Schaltstift die Explosionskammer verlässt, durch das mit grosser Wucht nachströmende Gemisch von Oel und Schaltergasen gelöscht wird, meistens aber soll die Löschung bereits früher noch in der Kammer erfolgen. Ausser der raschen Abschaltung soll die Anwendung der Explosionskammer noch einen weitern Vorteil bieten, denjenigen einer praktisch vollkommenen Entlastung des Kessels von Druckstössen und Vermeidung der Oelkolbenbildung.

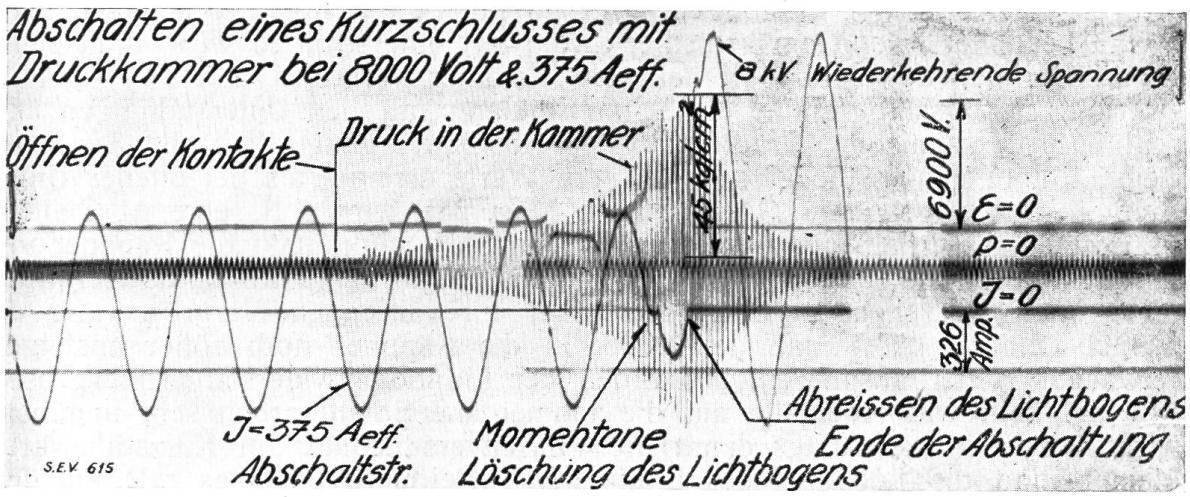

Fig. 23.
Oszillogramm einer Abschaltung von 375 $A_{eff.}$ und 8 kV mit einer Druckkammer. Ueberdruck in der Kammer 45 kg/cm², Lichtbogendauer 0,07 sec. Die Löschung erfolgt im Moment wo der Stiftkontakt die Kammer verlässt.

Um die Bedeutung der Ausschaltgeschwindigkeit der beweglichen Kontakte aufzuklären, wurde die Masse der Schalttraverse vergrössert und auf diese Weise

[25]) C. Stern und J. Biermanns, E. T. Z. 1916, S. 617 und 635.
[26]) J. D. Hilliard, J. A. I. E. E. 1924, S. 430.
[27]) P. Sporn und H. St. Clair, J. A. I. E. E., Bd. 46, S. 698. Discussion S. 620. vergl. auch E. T. Z. 1928, Heft 17, S. 651.
[28]) Biermanns Oelschalterversuche, E. T. Z. 1927, Heft 32 und 33, S. 1185.
[29]) H. Rengier, Löschkammer oder Vielfachunterbrechung, A. E. G.-Mitteilungen 1927, Heft 4, S. 177.
[30]) Bendmann, E. T. Z. 1928, Nr. 7, S. 252.

ihre Beschleunigung durch die Druckwirkung herabgesetzt; die gewählten Verhältnisse entsprachen im übrigen einem Schalter für grössere Nennströme. Die Versuche haben nun gezeigt, dass trotz eines Ueberdruckes von über 60 kg/cm² in der Kammer für die Löschung des Lichtbogens bereits bei 8 kV und Strömen bis 3000 A

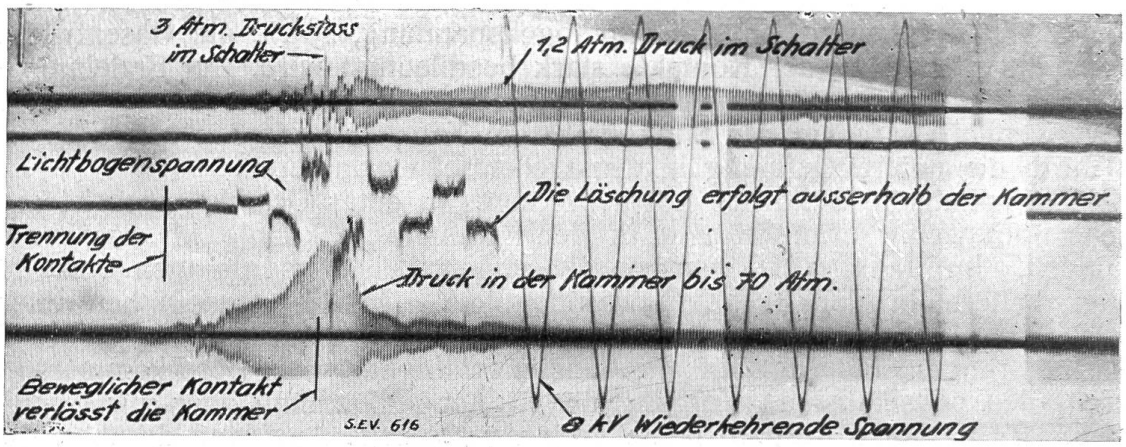

Fig. 24.
Oszillogramm einer Abschaltung von 9000 kVA bei 8 kV mit Druckkammer. Ueberdruck in der Kammer bis 70 kg/cm². Die Löschung erfolgt ausserhalb der Kammer. Druckstoss im Schalter 3 kg/cm² im Moment, wo der Stiftkontakt die Kammer verlässt. Bei der Löschung ausserhalb der Kammer tritt ein Ueberdruck von 1,2 kg/cm² im Schalter auf.

im Minimum eine Dauer von 0,05 sec, im allgemeinen aber bedeutend mehr, erforderlich ist. Im Oszillogramm der Fig. 23, das eine Abschaltung von 375 A bei 8 kV wiedergibt, ist der allmähliche Druckanstieg in der Kammer bis 45 kg/cm² zu sehen. Bei dieser Aufnahme hat der Lichtbogen gerade in dem Moment gelöscht, wo der Stiftkontakt aus der unteren Oeffnung herauskam. Dies ist jedoch keinesfalls die Regel: oft reisst der Lichtbogen noch im Innern der Kammer ab, anderseits aber und besonders wenn ein kritischer Stromwert unterschritten wird, nicht selten erst nachdem der bewegliche Kontakt die Kammer verlassen hat. Die genaue Auswertung der Oszillogramme ergibt im Einklang mit den Untersuchungen über den Einfluss des statischen Druckes auf den Abschaltvorgang, dass die Spannung pro cm Lichtbogenlänge bedeutend grössere Werte erreicht, als bei offener Unterbrechung. Das abgebildete Oszillogramm (Fig. 24) zeigt z. B. eine Abschaltung mit Löschung ausserhalb der Kammer; nachdem der Stiftkontakt die Kammer verlassen und der Druck abgenommen hat, kann deutlich eine Abnahme der Lichtbogenspannung gesehen werden, trotz einer fortwährenden Vergrösserung des Kontaktabstandes. Lässt man den Druck in der Kammer noch höher ansteigen, bis etwa auf 100 Atmosphären, so wächst der Lichtbogenwiderstand mit grosser Geschwindigkeit, was jedenfalls auf die momentane Schalterarbeit sehr ungünstig einwirkt. Es wird allerdings damit die Phasenverschiebung im Kurzschlusskreis verkleinert und die Löschung des Lichtbogens erleichtert, wie dies z. B. auf dem Oszillogramm der Fig. 23 gesehen werden kann, wo bereits bei der vorletzten Löschung des Lichtbogens diese Erscheinung deutlich zum Vorschein kommt. Der Lichtbogen wird aber bei so hohem Druck unstabil und reisst dann öfters vor dem natürlichen Nulldurchgang des Stromes ab, wodurch sehr hohe Ueberspannungen in der Anlage hervorgerufen werden können. Bei einigen Versuchen, die wir zur Untersuchung dieser Erscheinung angestellt haben, konnten wir zwar die von Hilliard[31]) genannten Werte von 25-fachen Ueberspannungen nicht nachweisen, es traten aber in der speisenden Anlage, die sonst sehr gut isoliert ist und während anderen Versuchen zu keinen Störungen Veranlassung gegeben hat, mehrere heftige Ueberschläge zu gleicher Zeit an 5 verschiedenen Stellen auf, die umfangreiche

[31]) J. D. Hilliard, J. A. I. E. E. Jan. 1928, S. 58.

Zerstörungen verursacht haben. In Fig. 25 ist das entsprechende Oszillogramm abgebildet, woraus das Abreissen des Stromes gut ersichtlich ist.

Aus diesen Versuchen kann gefolgert werden, dass nicht nur wegen der Gefahr einer Explosion der Kammer bei Ueberschreitung ihrer mechanischen Bruchfestigkeit,

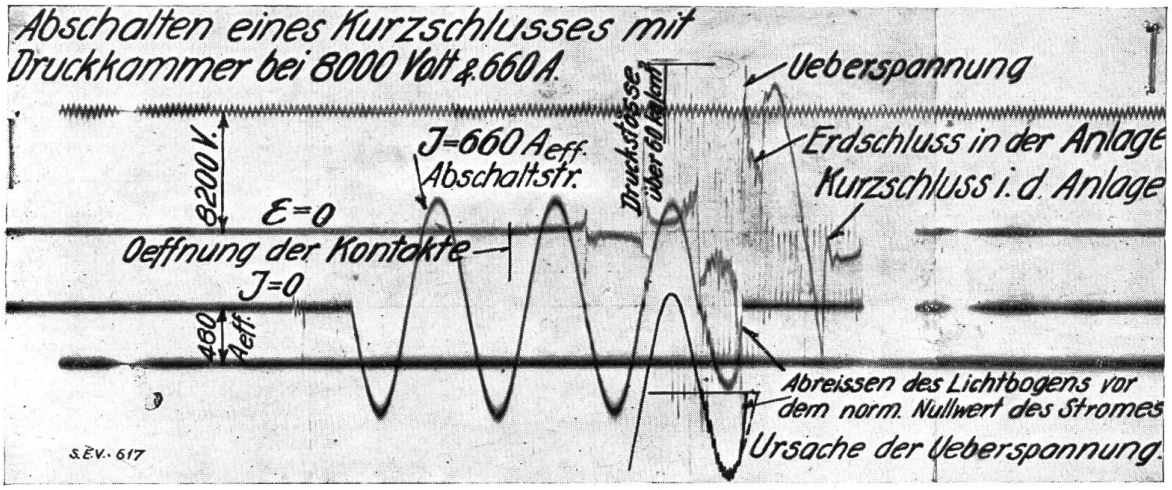

Fig. 25.
Oszillogramm einer Abschaltung von 660 $A_{eff.}$ bei 8 kV mit einer Druckkammer. Ueberdruck in der Kammer über 60 kg/cm². Durch Abreissen des Lichtbogens vor dem normalen Nullwert des Stromes wurde eine Ueberspannung erzeugt, die einen Erd- und dann einen Kurzschluss in der Anlage zur Folge hatte.

sondern auch wegen einer Gefährdung der Anlage durch Ueberspannungen dem zulässigen Ueberdruck in der Kammer eine obere Grenze gezogen werden muss. Wie hoch dieser Grenzwert liegen darf und inwiefern er von der Schalterkonstruktion und dem Netzbild abhängig ist, können nur eingehende Versuche Aufschluss geben. Jedenfalls scheint es, dass durch die Erhöhung des Druckes allein die Unterbrechung des Kurzschlusses in 0,01 sec nicht ermöglicht wird; besonders bei höheren Spannungen ist dieser Wert nicht zu erzielen, wie sich noch weiter zeigen wird. Die Abkürzung des Abschaltvorganges kann nur im Zusammenhang mit einer Beschleunigung des Stiftkontaktes erreicht werden.

Zur Verkleinerung des Druckes in der Kammer genügt es, die untere Oeffnung gross genug zu machen; dadurch wird aber die Wirkung der Löschkammer bei kleineren Strömen illusorisch. Es wurde bereits an verschiedenen Stellen festgestellt, dass in einem Löschkammerschalter der Abschaltvorgang bei gegebener Spannung von der Grösse des Kurzschlusstromes abhängig zu sein scheint. Auch diese Eigen-

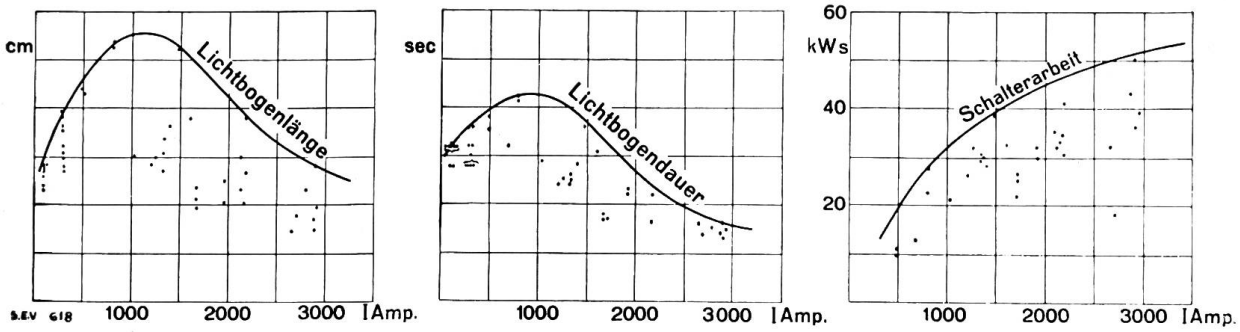

Fig. 26.
Abhängigkeit der Wirkung einer Druckkammer vom Kurzschlusstrom bei gegebener Spannung. Versuche bei 4 kV.

schaft konnte durch eine experimentelle Untersuchung bestätigt werden. Die Fig. 26 zeigt die maximale Lichtbogenlänge und Abschaltdauer in Funktion des Kurzschlussstromes, welche aus zahlreichen Versuchsreihen bei 4 kV pro Kammer erhalten wurde. Aus dem Vergleich mit offenen Abschaltungen bei gleicher Leistung kann

abgeleitet werden, dass die Wirkung der untersuchten Explosionskammer erst für Ströme über 1000 A zum Vorschein kommt. Der dabei mit einem Brinell'schen Kolben gemessene Druck in der Kammer erreichte 30 kg/cm². Die Schalterarbeit wies trotz der Verkleinerung der Lichtbogenlänge und der Abschaltdauer eine regelmässige Zunahme mit der Abschaltleistung auf, was zweifellos durch eine rasche Erhöhung der Lichtbogenspannung bedingt ist. Bei diesen und andern Versuchsserien wurde der Abschaltvorgang für Ströme unter dem kritischen Wert meistens ausserhalb der Kammer beendigt. Um bei einer gegebenen Konstruktion der Kammer die kritische Stromstärke herabzusetzen, braucht man nur die untere Oeffnung in der Explosionskammer zu verkleinern. So war es z. B. auf diese Weise möglich, bei der verwendeten Kammer von 1000 auf 300 A herunterzukommen. Es ist nun sehr schwer, die richtige Wahl zu treffen, da eine übermässige Verkleinerung der Abschlussöffnung die Leistungsfähigkeit der Kammer durch zu grossen Ueberdruck bei höhern Strömen heruntersetzt. Die in dieser Richtung ausgedehnten Untersuchungen ergaben die in Fig. 27 dargestellten Resultate.

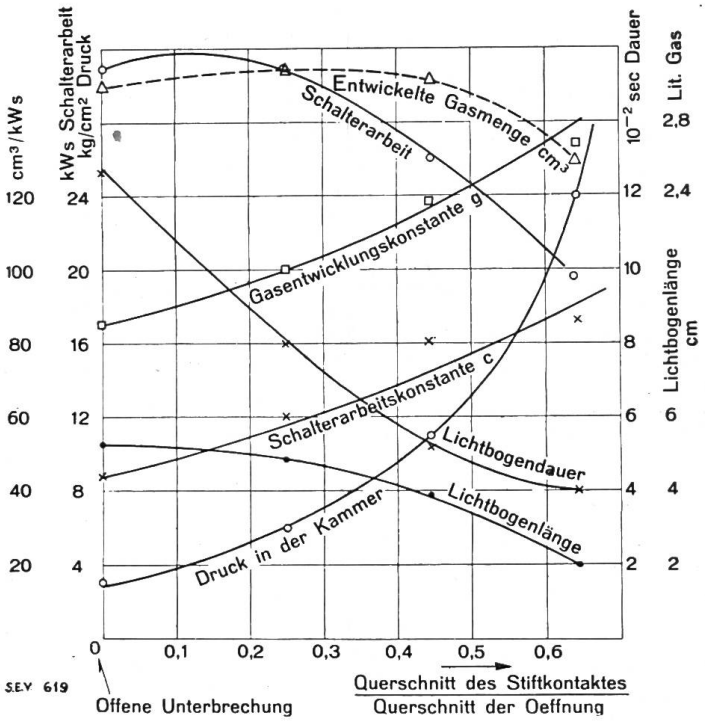

Fig. 27.
Abhängigkeit der Kammerwirkung von der Grösse der Abschlussöffnung bei gegebener Abschaltleistung (6000 kVA, 4 kV). Bemerkenswert ist die rasche Zunahme des Druckes in der Kammer.

Aus den zahlreichen Versuchsreihen wurden für eine bestimmte Abschaltleistung (6000 kVA) die charakteristischen Grössen abgeleitet und in Funktion des Verhältnisses $\frac{\text{Querschnitt des Stiftkontaktes}}{\text{Querschnitt der unteren Oeffnung}}$ aufgezeichnet, wobei die offenen Abschaltungen entsprechend der Verhältniszahl 0, d. h. auf der Ordinatenachse aufgetragen sind. Es zeigt sich, dass die Lichtbogenlänge und die Abschaltdauer am stärksten abnehmen, hingegen die Schalterarbeits-[32]) und die Gaskonstante eine Zunahme aufweisen; die Abnahme der entwickelten Gasmenge ist verhältnismässig klein. Die Gasmenge pro kWs Schalterarbeit weist eine Zunahme auf aus Gründen, die wir noch angeben werden. Ausserordentlich rasch steigt dagegen der Druck in der Kammer und es war deshalb wegen der Explosionsgefahr der verwendeten Druckkammer nicht möglich, die Versuche für noch kleinere Abschlussöffnungen durchzuführen. Bemerkenswert sind noch die Messungen des grössten im Schalter auftretenden Druckes. Gegenüber den offenen Abschaltungen bringt die Anwendung der Druckkammer keine Entlastung des Oelkessels mit sich: die Oszillogramme zeigen sehr heftige, kurzdauernde Druckstösse, die, wie es bereits aus der Fig. 25 ersichtlich war, im Moment der Freigabe der Oeffnung zustande kommen und die bedeutend höhere Werte erreichen als der Druck im Schalter mit offener Unterbrechung. Bei der angeführten Abschaltung traten z. B. Druckstösse bis 3 kg/cm² auf, hingegen bei der Löschung

[32]) Die Schalterarbeitskonstante ist aus der Formel $A = c\ EI\ t$ kWs für die Schalterarbeit ausgerechnet. Die Gaskonstante ist gegeben durch das Volumen der kalten Schaltergase pro kWs Schalterarbeit.

ausserhalb der Kammer, was einer offenen Abschaltung gleichkommen dürfte, konnten nur 1,2 kg/cm² gemessen werden. Die gleiche Erscheinung zeigt die Fig. 28, wo bei 12 000 kVA Abschaltleistung Druckstösse bis 4,5 kg/cm² im Oelkübel festgestellt wurden. Andere Messungen an einem dreipoligen Hochleistungsschalter mit Lösch-

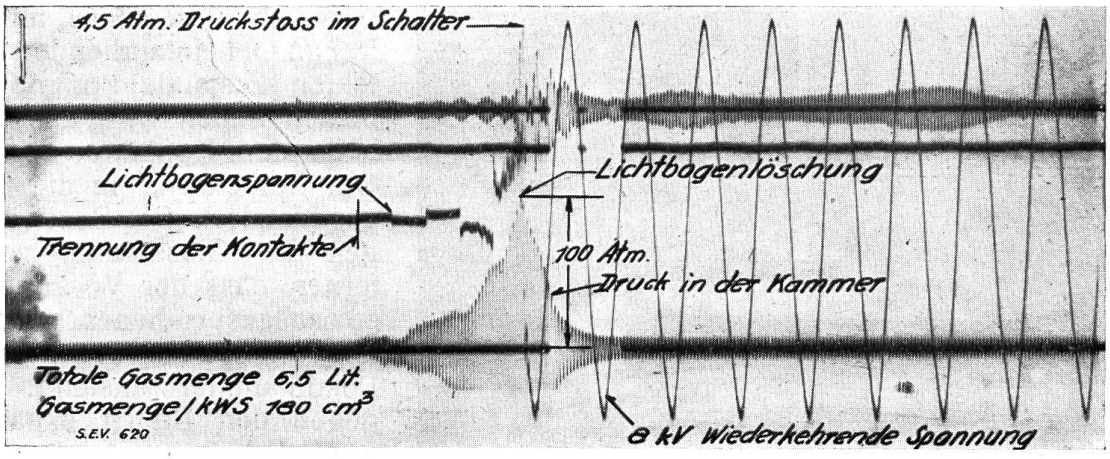

Fig 28.
Oszillogramm einer Abschaltung von 12 000 kVA bei 8 kV mit Druckkammer.
Ueberdruck in der Kammer ca. 100 kg/cm². Druckstoss im Schalterkübel 4,5 kg/cm. Der Lichtbogen löscht im Moment, wo der Stiftkontakt die Kammer verlässt. Lichtbogendauer 0,05 sec.

kammern, dessen Abschaltleistung zu 300 000 kVA angegeben war, haben gezeigt, dass bereits bei 135 000 kVA Abschaltleistung Druckstösse bis 16 kg/cm², die den Schalter zerstörten, aufgetreten sind. Die Abdrosselung des Druckes hängt, wie schon erwähnt, von der Grösse der Kammeröffnung ab; diese kann aber wegen der Festigkeit des Stiftkontaktes einerseits und der Drucksicherheit der Kammer anderseits nicht beliebig klein gemacht werden.

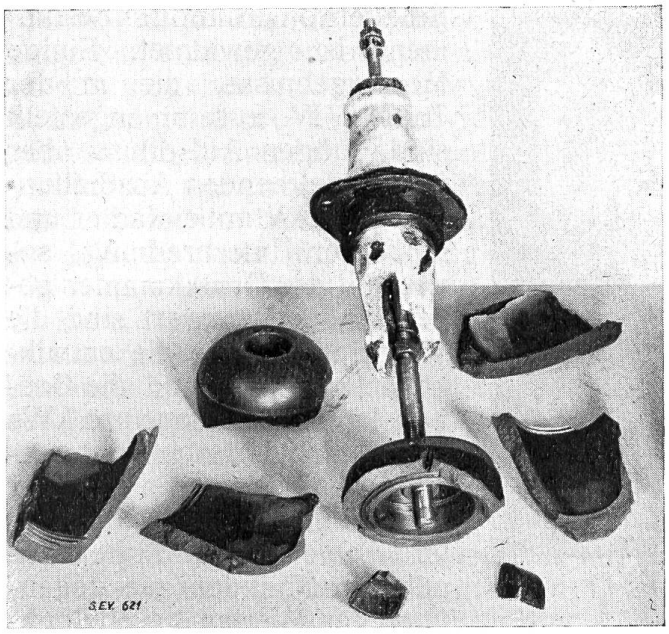

Fig. 29.
Eine bei der Abschaltung von 20 000 kVA explodierte Druckkammer aus Isoliermaterial.

Um die Vorgänge im Schalterinnern verfolgen zu können, wurde der im vorigen Kapitel beschriebene Glasschalter mit einer Druckkammer, zuerst ebenfalls aus Glas, nach einigen Explosionen aber aus Isolierstoff versehen. Diese letztere wurde dem oben erwähnten Hochleistungsschalter für 300 000 kVA entnommen. Bei der Vorprüfung konnte jedoch festgestellt werden, dass auch diese Kammer bei 20 000 kVA den Beanspruchungen nicht stand hielt und explodierte (Fig. 29) trotz einer Beschleunigung des Stiftkontaktes bis auf 7 m/sec. Bei einer Explosion der Löschkammer überträgt sich aber der unausgeglichene Druckstoss auf die Durchführung, so dass auch der Porzellanisolator gebrochen und in die Höhe geschleudert wurde. Bei den Zeitlupenaufnahmen wurde deshalb vorsichtshalber nur bis 15 000 kVA abgeschaltet.

Die aufgenommenen Bilder (Fig. 30) zeigen nun, dass von einer bestimmten Abschaltleistung an auch bei Verwendung von Löschkammern ein Oelkolben im

Schalterkübel auftritt [33], [34]. Begreiflicherweise kommt es bei diesem Vorgang nur auf die entwickelte Gasmenge und auf die Geschwindigkeit an, mit welcher das Gas expandiert. Ob die Gase zunächst unter sehr hohem Druck in der Löschkammer erzeugt werden und dann durch die freigegebene untere, relativ grosse Oeffnung im Schalterkübel expandieren, oder ob diese Gase an den frei im Oel eintauchenden Kontakten zustande kommen, in beiden Fällen wird das oberhalb der Kontakte liegende Oel kolbenartig in die Höhe geschleudert. Die Beobachtungen im Glasschalter zeigen ferner, dass der Vorgang um so ausgesprochener wird, je höher der Ueberdruck in der Löschkammer ansteigt. Das gegen den Boden expandierende Schaltergas steigt nachher in Form von grossen Gasblasen auf. Eine weitgehende Zerstäubung der aus der Kammer ausgestossenen Gase findet nicht statt.

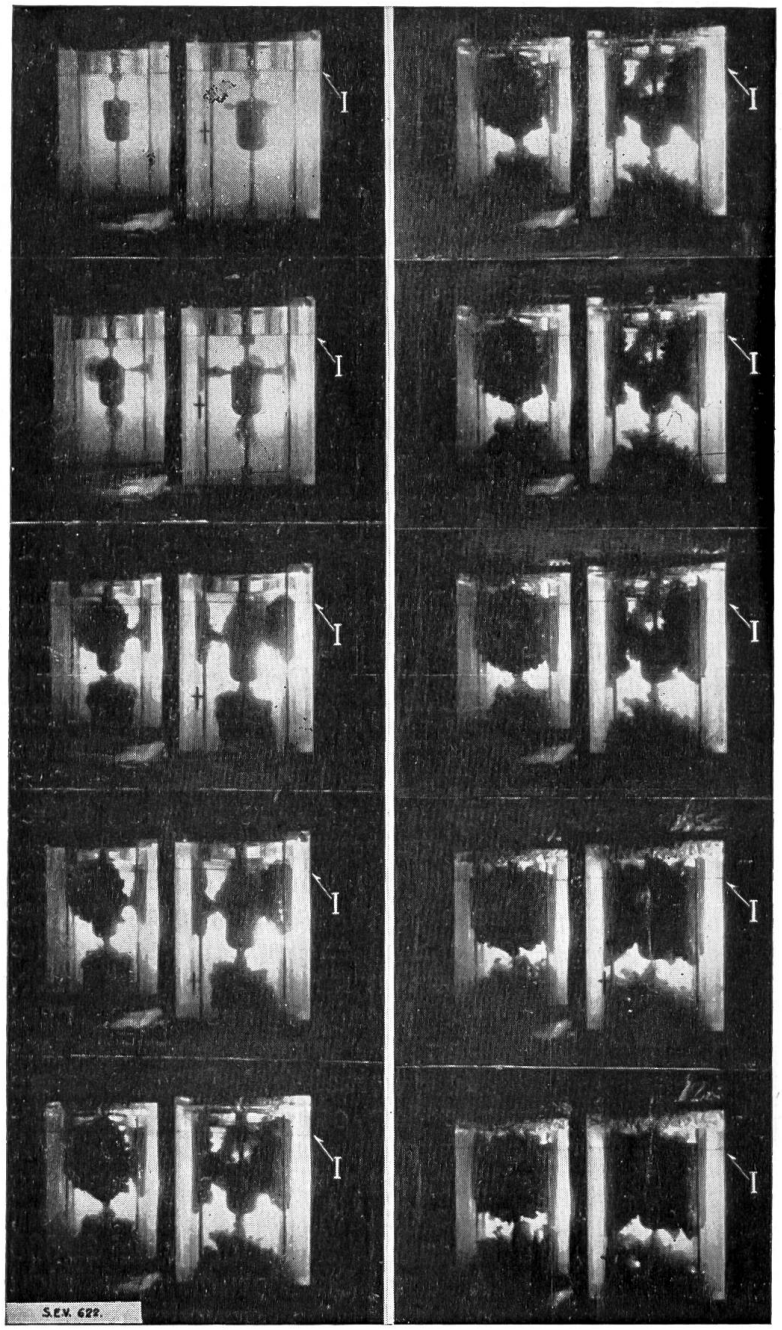

Fig. 30.
Ausschnitt aus einer Zeitlupenaufnahme. Abschaltung von 10000 kVA bei 8 kV mit einer Druckkammer. Zur Oelzirkulation sind im Oberteil der Kammer kleine seitliche Oeffnungen vorhanden. Die Bildung des Oelkolbens sind gut sichtbar (*I* = ursprüngliches Niveau).

Eingehende Versuche wurden der Erforschung der Gasentwicklung, die für die mechanische Beanspruchung der Schalterkonstruktion bestimmend ist, gewidmet. Einige Messergebnisse, die in der Tabelle IV zusammengestellt sind, mögen Aufschluss über die vergleichenden Abschaltungen bei 8 kV mit einfacher und fünffacher Unterbrechung, sowie mit der Druckkammer geben. Bemerkenswert sind die Werte, welche für die entwickelte Gasmenge und die Gaskonstante (Gasmenge pro kWs Schalterarbeit) festgestellt wurden: Bei Verwendung der Druckkammer wies die letztere eine beträchtliche Zunahme auf, indem sie gegenüber den Werten bei Vielfachunterbrechung das dreifache und gegenüber den Werten bei einfacher Unterbrechung das Doppelte erreichte. Dieses auf den ersten Blick merkwürdige Ergebnis ist offensichtlich dadurch bedingt, dass die in der Druckkammer im Lichtbogen entwickelte Wärmemenge vom übrigen Raum thermisch isoliert ist. Das relativ

[33]) H. Kloninger, E. u. M. 1927, Heft 20.
[34]) Dr. J. Kopeliowitsch, Oelschalterversuche, E. T. Z. 1928, Heft 18, S. 676.

Vergleichende Abschaltversuche bei 8 kV. Einphasen-Kurzschlüsse. Tabelle IV.

Kontaktanordnung	Versuchs-Nummer	Abschaltleistung kVA	Abschaltdauer sec	Schalterarbeit kWs	Gasmenge kalt Lit.	Gas cm³/kWs	Bemerkungen
Einfache Unterbrechung	1	10 200	0,11	48,4	4,75	98,5	Druckstösse aus oszillographischer Messung: 0,43 bis 0,56 kg/cm²
	2	9 870	0,18	106,3	9,00	85	
	3	10 240	0,11	26,7	2,50	94	
	4	10 150	0,10	34,5	3,75	109	
	5	10 150	0,13	45,1	4,25	94	
	6	10 050	0,11	36,2	3,50	96,5	
	7	11 500	0,145	55,2	5,50	100	
	8	11 500	0,14	64,7	6,45	99,5	
Unterbrechung mit Druckkammer	1	15 000	0,04	29,0	5,25	180	Druckstösse im Oelkübel aus oszillogr. Messung: 0,68 bis 1,3 kg/cm²
	2	14 900	0,03	44,6	7,50	168	
	3	15 400	0,04	44,6	7,75	173	
	4	15 300	0,04	54,6	8,25	151	
	5	15 100	0,03	35,7	7,00	196	
	6	15 800	0,06	43,5	5,35	123	
	7	16 500	0,04	35,1	4,30	122	
5fache Unterbrechung	1	21 800	0,018	29,0	1,75	60	Druckstösse aus oszillographischer Messung: 0,4 bis 0,63 kg/cm²
	2	20 700	0,016	34,6	2,00	58	
	3	21 000	0,015	35,7	2,0	56	
	4	21 000	0,015	36,8	1,75	47,6	
	5	22 000	0,017	33,4	1,75	52,5	
	6	21 600	0,01	16,7	0,75	45	
	7	21 600	0,012	19,0	1,25	66	

kleine Volumen der Kammer erlaubt deshalb, die Lichtbogenenergie in bezug auf die Gasentwicklung besser auszunützen, indem nach aussen nur ein kleiner Wärmeverlust auftritt. Die Unterteilung des Lichtbogens auf mehrere Kontaktpaare bewirkt hingegen, auch gegenüber der einfachen Unterbrechung, eine grössere Wärmeabgabe an das umgebende Oel, sei es durch Strahlung, Konvektion oder noch durch Kondensation: Die pro kWs entwickelte Gasmenge muss in diesem letzteren Fall naturgemäss die kleinsten Werte aufweisen.

In der letzten Spalte der Tabelle IV sind noch die oszillographisch gemessenen Druckstösse im betreffenden Schalter angegeben, welche bei den Versuchen mit der Löschkammer, im Einklang mit früheren Erörterungen, etwas höher ausfallen. Sieht man von diesen Druckstössen, die den Löschkammerschaltern eigen sind, ab, so kann trotzdem geschlossen werden, dass die festgestellte Abkürzung des Abschaltvorganges durch die Kammer der Entlastung des Schalters nicht im vollen Umfange zugute kommt, da einerseits die Schalterarbeit, wegen der Vergrösserung der Lichtbogenspannung, und anderseits die Gasentwicklung, durch bessere Ausnützung der erzeugten Wärme, in grossem Masse erhöht werden.

Wie wir schon oben erwähnt haben, bietet die richtige Konstruktion und Bemessung der Druckkammer grosse Schwierigkeiten. Eine rechnerische Behandlung der Aufgabe gestaltet sich bedeutend komplizierter als für offene Abschaltung. Man ist auf direkte Versuche mit grossen Leistungen bei entsprechenden Spannungen angewiesen, die allein über die Grenze der Leistungsfähigkeit der gewählten Anordnung Aufschluss geben können. Schwierig ist es auch, eine Löschkammer druckfest zu gestalten, da der untere oder der obere Abschluss aus Isolierstoff gemacht werden muss. Auf Grund der Fig. 27 kann geschlossen werden, dass bei einer Ueberschreitung der zulässigen Abschaltleistung eine sehr rasche Drucksteigerung erfolgen muss, welche die Explosion der Kammer herbeiführen kann. Es sei noch bemerkt, dass bei der Abschaltung relativ kleiner Ströme die Lichtbogenlänge bei Benützung einer Kammer gleich gross ist, wie ohne Kammer, weil aber dabei die Beschleunigung des Stiftkontaktes durch den Druck ausbleibt, muss mit grossen Abschaltzeiten

und zahlreichen Rückzündungen gerechnet werden. Wegen der Ueberspannungsgefahr beim Abschalten leerlaufender Leitungen oder Transformatoren, besonders im Falle von Resonanzerscheinungen, ist es notwendig, die Löschkammerschalter mit Schutzwiderständen zu versehen.

6. Einige Ergebnisse der Abschaltversuche mit grossen Leistungen in ihrer Gegenüberstellung zu den Prüffeldversuchen.

Die angeführten Untersuchungen wurden mit verhältnismässig kleinen Leistungen durchgeführt und es lohnt sich, die daraus gezogenen Schlussfolgerungen an Hand der veröffentlichten Kurzschlussversuche in ausgedehnten Netzen zu überprüfen.

Es sei in diesem Zusammenhang an die in den Jahren 1925—1926 in Amerika stattgefundenen Versuche erinnert, die in einem interessanten Aufsatz von Sporn & St-Clair[27]) beschrieben sind. Es konnten damals mit einem 150 kV Schalter mit zehnfacher Unterbrechung in sehr rascher Reihenfolge (zwischen zwei Schaltungen bis 10 sec) Leistungen bis 720000 kVA[35]) bewältigt werden. Im ganzen hat man 26 Abschaltungen gemacht, die ohne Störung verliefen. Es trat praktisch kein Oelverlust auf und als einzige von aussen beobachtete Erscheinung konnte das Ausströmen von Schaltergas und das Hochspringen der Kübel gesehen werden. Das Oel war nach den Versuchen nicht verrusst und seine dielektrischen Eigenschaften änderten sich praktisch nicht (Durchschlagspannung 25 kV gegenüber 28,5 kV vor den Versuchen). Die Lichtbogendauer betrug 4—7,5 Perioden, was gegenüber den Messungen im Prüffeld als günstiges Ergebnis bezeichnet werden muss[36]).

Nach diesen Versuchen wurden auch die bereits im Netz eingebauten Löschkammerschalter der gleichen Prüfung unterzogen. Der zuerst geprüfte Schalter mit rundem Kübel bewältigte ebenfalls 26 Schaltungen einwandfrei unter unbedeutender Rauchbildung. Die kürzeste Zwischenzeit zweier in einer Reihe nacheinander folgender Versuche betrug 0,5 min. Bei geerdetem und ungeerdetem Kurzschlusspunkt wurde die gleiche Lichtbogendauer gemessen. Diese betrug bis 7,5 Perioden bei voller Netzleistung, bei $^1/_3$ der Netzleistung dagegen etwas mehr: bis 9,5 Perioden. Die entsprechenden Lichtbogenlängen werden mit 19,5—29,5 cm, bezw. 28—33 cm angegeben. Schon daraus kann ersehen werden, dass bei kleineren Leistungen die Druckkammern längere Lichtbogen ergeben, wie es auch bei den Untersuchungen mit kleineren Leistungen im Versuchsfeld festgestellt wurde.

Bei der Prüfung des Löschkammerschalters (mit ovalem Kübel) haben die Kammern zweimal versagt und mussten zweimal umgeändert werden; erst bei der dritten Prüfung haben sie befriedigend funktioniert. Es konnten 29 Schaltungen in Reihen bis achtmal hintereinander mit 2 Min. Zwischenzeit bei $^1/_4$ der Netzleistung und bis viermal hintereinander mit 1 Min. Zwischenzeit bei voller Netzleistung erfolgreich durchgeführt werden. Bei reduzierter Leistung hat der Schalter Abschaltdauern 8,5÷11,5 Per., bezw. Lichtbogenlängen 25,4÷34,4 cm, bei voller Netzleistung hingegen 6÷9,5 Per. Dauer, bezw. 17,2÷28 cm ergeben, wobei unabhängig davon, ob mit geerdetem oder ungeerdetem Kurzschlusspunkt geschaltet, ungefähr gleiche Resultate erzielt wurden.

Bemerkenswert ist, dass vor der Umänderung der Kammern kürzere Lichtbogendauern gemessen wurden. Ueberträgt man das Resultat der im Kapitel 5 angeführten Untersuchungen auf diese Versuche, so kann man vermuten, dass die ersten Kammern bereits bei kleineren Netzleistungen bis auf die Grenze ihrer mechanischen Festigkeit beansprucht wurden. Auch nach der Aenderung haben die

[35]) Die in Amerika durchgeführten Versuche sind nach den amerikanischen Vorschriften ausgewertet, um einen Vergleich mit den in der Fachliteratur bekannt gewordenen Zahlen zu erleichtern.

[36]) Das Urteil der American Gas & El. Co. über diese Versuchsresultate fassen P. Sporn & St-Clair etwa wie folgt zusammen (vergl. E. T. Z., Jahrgang 1928, S. 651): Es war endgültig bestätigt, dass die Vielfachunterbrechung, die bis dahin in Amerika noch nicht ausprobiert worden war, in der Lage ist, Leistungen von rund 1 Million kVA zu unterbrechen; jedenfalls glauben die Verfasser, dass nach dem ganzen Verhalten des Schalters bei häufiger Prüfung mit 75% dieser Leistung der Schalter noch lange nicht an der Grenze seiner Leistungsfähigkeit angekommen war.

Kammern wiederum in ähnlicher Weise funktioniert wie die im Prüffeld verwendeten Versuchslöschkammern, indem bei kleinerer Leistung grössere Dauern als bei voller Netzleistung festgestellt werden konnten. Diese Versuchsergebnisse zeigen ebenfalls, dass die Wirkung der Kammer von der Abschaltleistung abhängig ist[37]).

Im Frühling 1927 wurde bei der Alabama Power Co.[34]) ein 110 kV Hochspannungsschalter mit zehnfacher Unterbrechung einer Prüfung unterzogen. Auf den Kurzschluss arbeiteten im ganzen Zentralen mit einer Maschinenleistung von 534333 kVA. Es wurden erfolgreich bis 675000 kVA mit 2 Min. Zwischenzeit abgeschaltet. Der Kurzschlusspunkt blieb bei den meisten Versuchen ungeerdet. Bei der vierten Abschaltung traten infolge eines Fabrikationsfehlers Ueberschläge im Schalterinnern auf. Trotz diesem Fehler hielten die Schalter auch die dadurch bedingte erhöhte Beanspruchung aus, indem der Kurzschluss unter etwas stärkerem Rauch- und Oelauswurf abgeschaltet wurde. Der Fehler konnte leicht behoben werden, worauf fünf weitere Schaltungen mit bestem Erfolg gemacht wurden. Die grösste Lichtbogendauer betrug 7,5 Per., es trat praktisch kein Oelauswurf auf, die Rauchentwicklung war geringfügig. Die wiederkehrende Spannung erreichte rund 80 % der Spannung vor dem Kurzschluss bei einer gesamten Kurzschlussdauer von 20 Per.[34]). Die Schalter waren nach den Versuchen in vollkommen betriebsfähigem Zustande.

Bei früheren Versuchen, die im gleichen Netz der Alabama Power Co. mit Löschkammern[38]) oder zweifacher Unterbrechung[39]) gemacht wurden, konnten nur kleinere Leistungen erzielt werden. Die Löschkammerschalter schalteten mit einem Pol zwischen einer Phase des geerdeten Netzes und Erde 141000 kVA ab. Der Schalter mit zweifacher Unterbrechung in der dreiphasigen Gruppe bewältigte 470000 kVA. Mit einem Pol zwischen einer Phase und Erde wurden 180000 kVA unterbrochen. Aus der Gegenüberstellung der betreffenden Lichtbogendauern (Fig. 31) ist zu ersehen, dass bei Vielfachunterbrechung die kürzesten Abschaltdauern erreicht wurden. Es sei noch erwähnt, dass auch bei diesen Prüfungen an den Schaltern mit Vielfachunterbrechung keine mechanischen Schäden zu verzeichnen waren, was auf eine zweckmässige Bemessung der Schalterteile zurückgeführt werden muss.

Weniger zahlreich sind in der neuzeitlichen Fachliteratur Berichte über grossangelegte Kurzschlussversuche in Mittelspannungsnetzen. Mit Ausnahme der Baltimore-Versuche[4]), wo bei 13,2 kV, 25 Per./sec und einem Maschineneinsatz von 170000 kVA eine max. Abschaltleistung von 450000 kVA erreicht wurde, sind mir keine bekannt. Es dürfte deshalb doch von Interresse sein, einiges über kürzlich in einem schweizerischen 15 kV-Netz mit nahezu 100000 kVA Maschinenleistung stattgefundenen Versuche mitzuteilen. Es handelte sich zunächst darum, die durch-

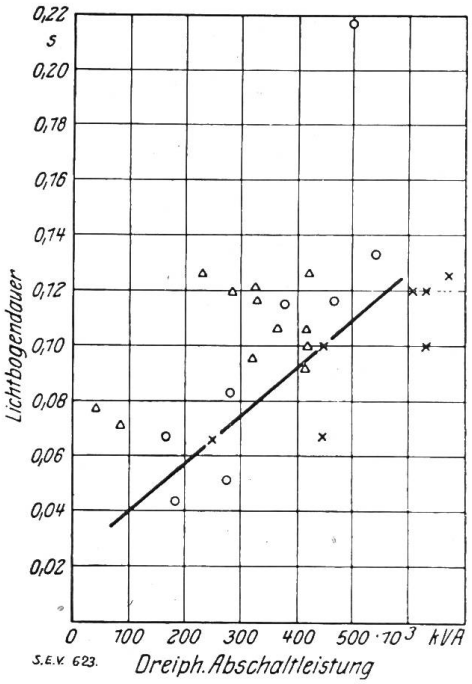

Fig. 31.
Lichtbogendauer bei den bis jetzt in 110 kV-Anlagen bekanntgewordenen Abschaltversuchen.
△ = Löschkammer.
○ = 2fache Unterbrechung.
× = Vielfachunterbrechung.

[37]) Die Schlussbemerkung von P. Sporn & St-Clair lautet dahin, dass diese Versuche eine strenge Prüfung der Löschkammerschalter bedeuten. Die Erkennung der Schwäche der normalen Druckkammerkonstruktion, sowie der erfolgreichen Verbesserungen, welche im Verlaufe der Versuche durchgeführt wurden, hat nicht nur dem Konstrukteur, sondern auch der Betriebsleitung wertvolle Diensfe geleistet, indem die sich im Betriebe befindenden Löschkammerschalter gemäss den gesammelten Erfahrungen umgeändert wurden.

[38]) J. D. Hilliard, J. A. I. E. E. 1922, S. 530.

[39]) Mac Neill, J. A. I. E. E. 1922, S. 537.

geführte Berechnung der Kurzschlussleistung einer Kontrolle zu unterziehen und zweitens die für das Netz vorgesehene dreipolige Schaltertype mit Solenoidkontakten auf die Eignung zu prüfen. Die Kurzschlüsse wurden in einem 6 km von der Hauptzentrale entfernten Unterwerk bei Normalbetrieb des Netzes mit einem Hilfsschalter eingeleitet und momentan, d. h. nach 0,02 bis 0,04 sec, durch den Versuchsschalter unterbrochen. Die oszillographische Messung des Kurzschlusstromes ergab eine sehr gute Uebereinstimmung mit der Rechnung, die nach der in den schweizerischen Richtlinien zusammengefassten Methode durchgeführt wurde: Die Abweichung betrug weniger als 10 %. Der Schalter hat die Abschaltleistung von 165 000 kVA nach schweizerischen Richtlinien bezw. 214 000 kVA nach amerikanischen Richtlinien einwandfrei bewältigt und war nach 15 Kurzschlüssen in vollkommen betriebsfähigem Zustand (Fig. 32); seine Kontakte wiesen nur schwache Brandspuren auf, die ausgestossene Oelmenge war sehr klein. Die wiederkehrende Spannung blieb in den meisten Fällen über 80 % der Spannung vor

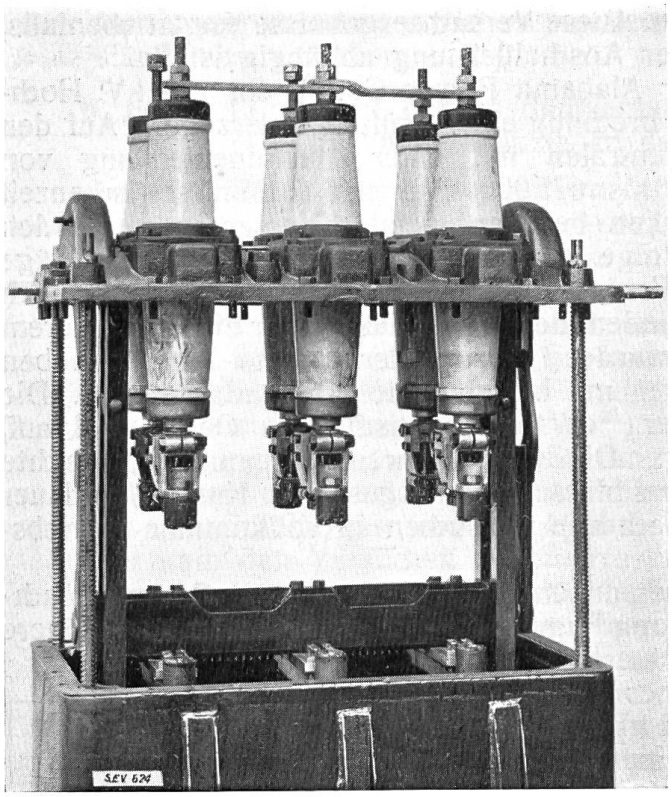

Fig. 32.
Dreipoliger Einkesselschalter, Type AV 10/3, mit Solenoidkontakten nach 15 Kurzschlussabschaltungen in einem 15 kV-Netz.

Maximal erreichte Kurzschlussleistung	340 000 kVA
Absschaltstrom	8050 $A_{eff.}$
Abschaltspannung	11,8 kV
Abschaltleistung	164 000 kVA.
gerechnet mit Betriebsspannung . .	214 000 kVA.

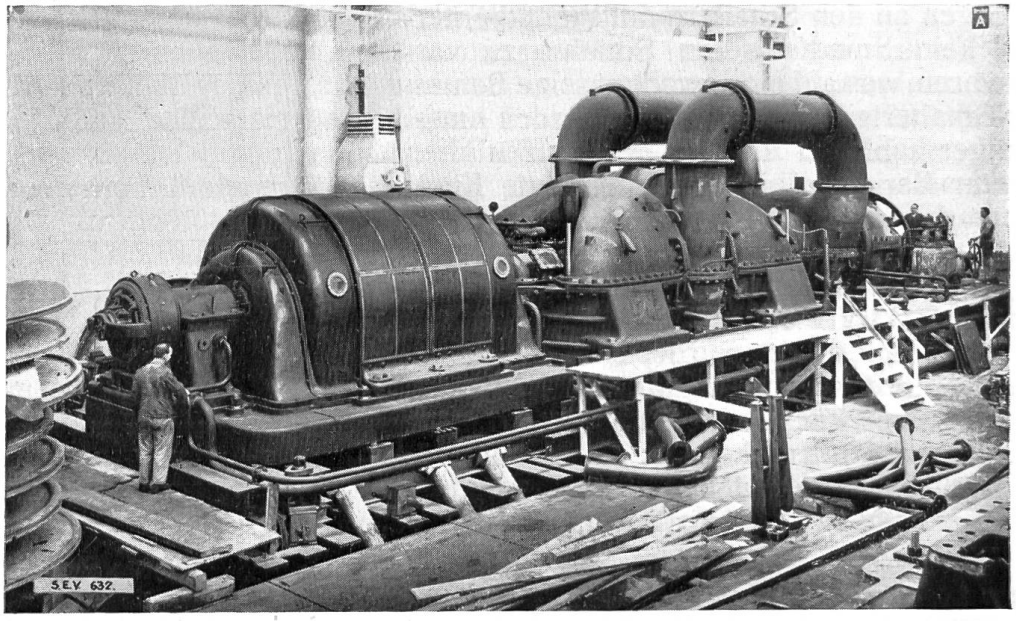

Fig. 33.
Die für Versuche verwendete 40 000 kVA-Turbogruppe am Prüfstand.

dem Kurzschluss. Es sei noch bemerkt, dass die an Hand der Prüffeldversuche vorausberechnete Beanspruchung des Schalters ziemlich genau erreicht wurde.

Zum Schluss soll noch auf die Versuche mit grossen Leistungen in den Werkstätten von Brown, Boveri & Cie. hingewiesen werden, welche zur Kontrolle der Forschungsergebnisse regelmässig angestellt werden. Unter Verwendung von Turbogeneratoren von 25 bis 40000 kVA Leistung (Fig. 33) wurden bis 135000 bezw. 220000 kVA (A.R.) erzielt. Bei der Prüfung des kleinsten dreipoligen Hochleistungsschalters mit Solenoidkontakten für 11 kV Nennspannung konnten einwandrei mehr als 200 Abschaltungen gemacht werden, wobei die Garantiewerte wesentlich überschritten wurden, ohne dass der Schalter an der Grenze seiner Leistungsfähigkeit angelangt war.

Unter gleichen Bedingungen wurde auch der bereits erwähnte dreipolige Hochleistungsschalter für 300000 kVA Abschaltleistung mit Druckkammern, der von einem Elektrizitätswerk zwecks Ueberprüfung der Garantie überlassen wurde, mit 135000 kVA beansprucht. Der Schalter hielt die dabei oszillographisch festgestellten Druckstösse über 16 Atm. nicht aus und wurde zertrümmert. Auch dieses Resultat steht im Einklang mit dem zur Erforschung der Wirkungsweise der Löschkammerschalter angestellten Modellversuchen.

7. Vorgänge beim Einschalten auf heftige Kurzschlüsse.

Es sollen noch kurz die Abhebungserscheinungen gestreift werden, die beim Einschalten auf bestehenden Kurzschluss bei Stromstärken über 10000 Amp. im Schalter auftreten können.[3])

Bei der Grösse der modernen Generatoren kann diese Stromstärke bereits bei Vorhandensein eines einzigen Stromerzeugers weit überschritten werden. Beispielsweise erreicht der unsymmetrische Anfangkurzschlusstrom eines 15000 kVA Turbogenerators ca. 35000 Amp. max. bei 6 kV Klemmenspannung. In einem Grosskraftwerk, das eine Niederspannungssammelschiene ohne besondere Vorkehrungen zur Begrenzung der Kurzschlussleistung oder Einheiten von mehreren 10000 kW besitzt, können im Störungsfall ganz gewaltige Ströme auftreten, die durch den Oelschalter naturgemäss nicht ohne weiteres beherrscht werden.

Beim Einschalten von Schaltern jeder Konstruktion tritt normalerweise schon vor der Berührung der Kontakte infolge des Durchschlages der dünnen Oelschicht ein Funke auf, der sich zu einem Lichtbogen ausbildet. Wegen seiner kurzen Dauer ist jedoch die Wirkung dieses Lichtbogens belanglos, da der Kurzschlusstrom keine Zeit hat, auf grosse Werte anzuwachsen. Meistens findet aber die nachfolgende Berührung der betriebsmässig angebrannten Löschkontakte an einem Punkt statt, wodurch ein Stromlinienbild etwa nach Fig. 34 auftritt. Die starke Stromkonzentration und daraus folgende grosse magnetische Feldstärke in ihrer Nähe, sowie der schleifenförmige Stromverlauf erzeugen die sogenannten *Kontaktabhebungskräfte,* welche die Kontakte gegen die Federkraft voneinander zu trennen suchen. Diese Erscheinung ist umso ausgesprochener, je kleiner der Berührungsquerschnitt ist, indem die Abhebungskraft pro Kontakt sich nach der Formel:[3])

$$P = I^2 \left(\frac{1}{2} + l\,n\,\frac{r_2}{r_1}\right) 1{,}02 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{kg}$$

(r_1 = Radius des Berührungspunktes, r_2 = Abstand zwischen beiden Isolatoren einer Phase) ändert. Ein experimenteller Nachweis dieser Kräftewirkung konnte an Hand in Quecksilber eintauchender Kontakte erbracht werden[40]). Von einer näheren Erörterung dieser Erscheinung kann hier mit Rücksicht auf die erwähnten Veröffentlichungen abgesehen werden, es sei nur betont, dass die Kontaktabhebekraft mehrere hundert Kilogramm erreichen und die Trennung der Kontakte bewirken kann.

Diese Kraftwirkung ist unter Umständen durch den sogenannten Flüssigkeitsdruck thermischen Ursprungs unterstützt, welcher beim Auftreten eines Lichtbogens durch die entwickelten Gase bezw. Metalldämpfe erzeugt wird.

[40]) A. Roth, Hochspannungstechnik, Julius Springer, Berlin 1927, S. 411 und 420.

Eine weitere Einschaltbewegung der Schalttraverse hemmende Kraft entsteht durch die schleifenförmige Strombahn (Fig. 35) im Schalter, die nach den Gesetzen der Elektrodynamik jede Stromschleife auszudehnen sucht. Ist die Einschaltkraft des Schalterantriebes zu schwach, um die Gegenwirkung der elektrodynamischen

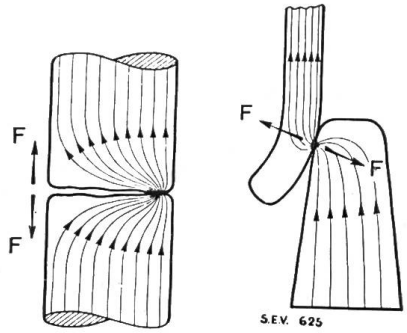

Fig. 34.
Schematische Erklärung der Kontaktabhebungserscheinungen in Oelschaltern: Abstossende Kräfte bei punktförmigem Stromübergang suchen die Kontakte zu trennen.

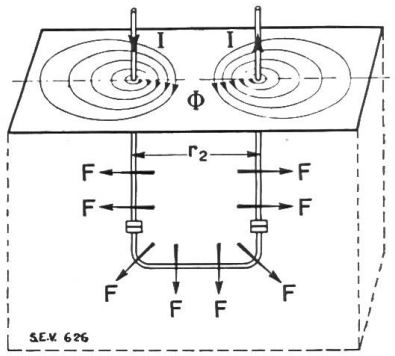

Fig. 35.
Schematische Erklärung der Kontaktabhebungserscheinungen im Oelschalter: Elektrodynamische Kräfte im Schalter suchen die Stromschleife zu öffnen.

Kräfte zu überwinden, so ist die Gefahr vorhanden, dass die Traverse in einer Zwischenstellung aufgehalten wird. Durch den entstehenden Lichtbogen werden Gase und Metalldämpfe entwickelt und falls die Kontakte doch in die Endlage gelangen und in geschmolzenem Zustand aneinander gepresst werden, kann auch der Fall einer Schweissung auftreten. Zur Trennung der Kontakte ist dann meistens Meissel und Hammer notwendig. Die Kontaktschweissung birgt grosse Gefahren in sich, indem beim Abschalten eines auf diese Weise geschädigten Schalters die Traverse an den geschweissten Kontakten hängen bleibt, wodurch der an den andern Kontakten auftretende Lichtbogen nicht mehr zum Löschen gebracht werden kann. Eine Zerstörung bezw. Explosion des Schalters ist eine natürliche Folge dieses Vorganges und die Erfahrung, sowie Versuche zeigen, dass solche Fälle folgenschwere Störungen verursachen können.

Nicht unerwähnt soll in diesem Zusammenhang die Ueberbeanspruchung des Schalters bleiben, die bei der sofortigen Wiederauslösung auftreten kann, indem dabei zu der Wirkung des Einschaltlichtbogens diejenige des Abschaltvorganges hinzukommt. Befindet sich der Schalter bei der Abschaltung des Anfangkurzschlussstromes in normalen Verhältnissen bereits an der Grenze seiner Leistungsfähigkeit, so ist seine Zerstörung unter solchen Umständen sehr wahrscheinlich.

Eine weitere Folgeerscheinung ist bei ausbleibendem Schutz durch Löschkontakte die Beschädigung der Hauptbürsten, die im Augenblick der ersten Berührung an einem Kontaktpunkt aufliegen und durch die grosse Stromdichte, sowie durch die auftretende Abhebung angebrannt werden: Die Bildung von Schmelzperlen kann dann das Anwachsen der Kontakttemperatur bei Dauerbelastung über die zulässige Höhe bewirken.

Die mit den Abhebungserscheinungen verknüpften Gefahren sind, wie ersichtlich, gleich ernst zu behandeln wie diejenigen, die aus der Verwendung von Oelschaltern mit ungenügender Abschaltleistung erwachsen können. Mit einem Einschalten auf bestehenden Kurzschluss muss eben stets gerechnet werden, da nach einer im Netz auftretenden Auslösung in vielen Fällen wieder eingeschaltet werden muss, auf die Gefahr hin, dass der Kurzschluss noch besteht. Die Schalterkonstruktion muss entsprechend der Forderung durchgebildet werden, dass das Einschalten auf Kurzschluss in gleicher Weise wie das Abschalten sicher beherrscht wird.

Das Problem, elektrodynamisch und thermisch sichere Schalter zu bauen, lässt sich auf verschiedene Weise mehr oder weniger gut lösen. Bei der Verwendung

von gefederten Kontakten soll zunächst darauf geachtet werden, dass eine genügende Anpressungskraft schon bei der Berührung vorhanden sei. Berücksichtigt man jedoch die Grösse der Abhebungskraft, die einige hundert Kilogramm pro Kontakt erreichen kann, so sieht man, dass mit der Verstärkung des Kontaktdruckes allein die Höhe des zulässigen Kurzschlusstromes nicht sehr weit gebracht werden kann.

Etwas mehr kann mit der Unterteilung der Kontakte und daraus folgender Verkleinerung des Stromes pro Uebergangsstelle erzielt werden, wenn man dafür sorgt, dass alle Kontakte gleichzeitig mit dem beweglichen Teil in Berührung kommen, was allerdings in der Praxis wegen des Kontaktabbrandes mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden ist. Gleiche Schwierigkeiten bereitet die Anordnung aus parallelen Fingerkontakten. Bei dieser Kontaktkonstruktion wird die Wirkung der Abhebungskräfte F (Fig. 36) einerseits durch die Unterteilung des Stromes auf mehrere Finger und anderseits durch die elektrodynamische Anziehungskraft f der parallelen Stromfäden verkleinert. Diese letztere kann annähernd nach der Formel:

$$f = \frac{i^2 l}{a} 2{,}05 \cdot 10^{-8} \text{ kg},$$

wo a der Abstand der Mittellinien und l die Länge der Finger bezeichnet, gerechnet werden. Noch günstiger ist in dieser Beziehung der aus einigen Segmenten in Kreisanordnung bestehende Tulpenkontakt, da sämtliche Feldlinien die Kontakte umschliessen. Die Versuche und Rechnung zeigen jedoch, dass auch auf diesem Wege nicht viel erreicht wurde [41]). In Fig. 37 ist beispielsweise die nach einer einzigen Einschaltung auf Kurzschluss mit 22 bis 35 000 A max. bei einer Kurzschlussdauer von nur 0,05 sec zerstörte Tulpenkontaktanordnung, deren Segmente eine Vorspannung von 9,5 kg hatten, dargestellt. Die Schweissung einzelner Segmente mit dem Stiftkontakt bei diesem Versuch verunmöglichte die nachträgliche Schalterauslösung. Wie oben erwähnt, ist eine einwandfreie Unterteilung des Kurzschlusstromes auf mehrere Kontaktstellen in der Praxis nicht durchführbar, da meistens wegen des ungleichen Abbrandes einzelner Segmente, sowie wegen des Spieles, mit welchem alle beweglichen Teile versehen werden müssen, zunächst immer nur ein Kontakt auftritt, wodurch in einem Wechselspiel ein Kontakt nach dem andern abgehoben wird. Diese Erscheinung beschädigte z. B. die in Fig. 38 abgebildete Kontaktanordnung nach

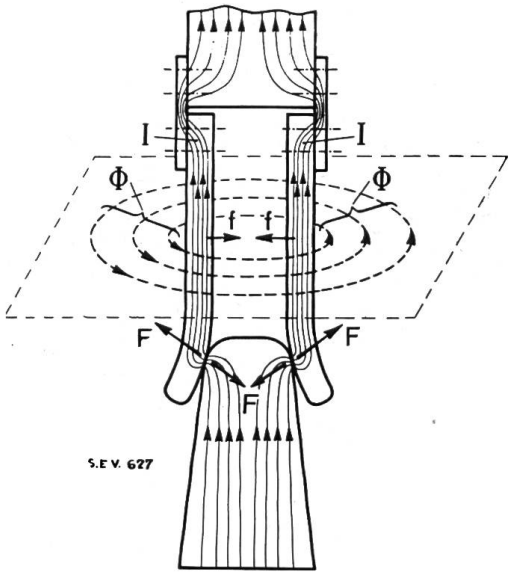

Fig. 36.
Schematische Darstellung der Anordnung aus parallelen Fingerkontakten bezw. Tulpenkontakten mit getrennten Segmenten.

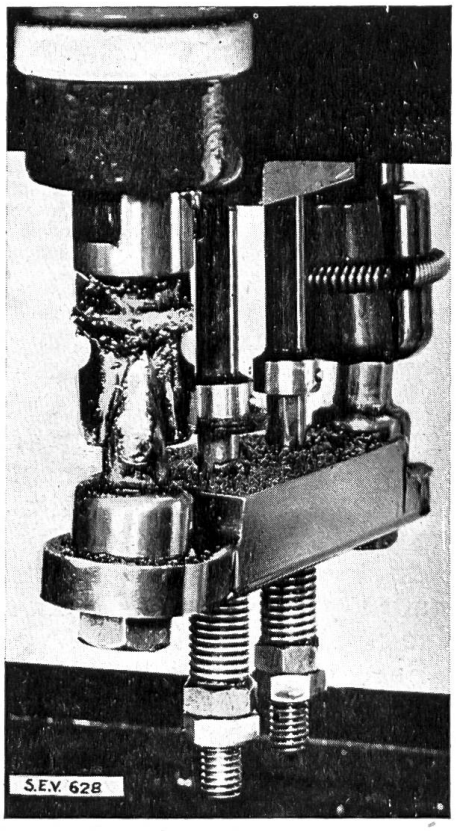

Fig. 37.
Zerstörung von Tulpenkontakten durch elektrodynamische Abhebungskräfte nach einer einzigen Einschaltung auf 22 bis 35 000 A.
Kurzschlussdauer . . . . 0,05 sec
Vorspannung pro Segment . 10 kg.

41) Siehe auch A. Clerc, Rev. Gén. d'Electr. 1928, tome XXIV, p. 217 et 252.

einigen Einschaltungen auf 30 ÷ 40 000 A max. so stark, dass beim eingeschalteten Schalter keine Kontaktgabe mehr stattfand.

Zu einer vollständigen Kompensierung der Abhebungskräfte muss man diese letzteren am Entstehungsort durch gleich grosse Anziehungskräfte neutralisieren. Zu diesem Zwecke verwendet Brown Boveri ringförmige Klotzkontakte, von denen jeder mit einem Solenoid aus einigen Windungen versehen ist (Fig. 39). Die Wirkungsweise der zwei Solenoide eines Kontaktpaares ist schematisch in Fig. 11 dargestellt. Die beiden Kontakte ziehen sich an mit einer Kraft, welche quadratisch mit dem Strom anwächst. An Hand experimenteller Untersuchungen konnte die Anzahl der Windungen der Solenoidkontakte im Zusammenhang mit einer vom Achsabstand zweier Solenoide eines Poles abhängigen Vorspannung der Solenoidkontakte gerade so bestimmt werden, dass die Anziehungskraft immer die Abhebekraft vollkommen aufhebt.

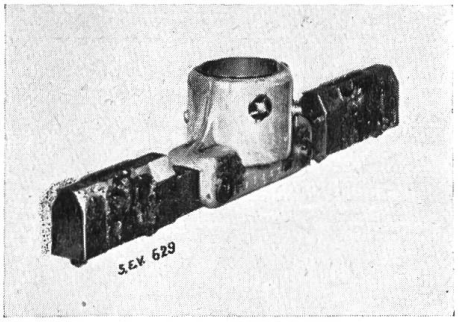

Fig. 38.
Beweglicher Kontaktteil einer Anordnung mit parallelen Fingerkontakten nach einigen Einschaltungen auf 30 bis 40 000 A max.

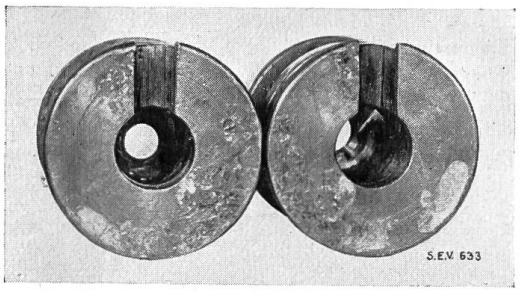

Fig. 40.
Kontaktfläche zweier Solenoidkontakte nach einigen Versuchen mit 160 000 A Kurzschlusstrom. — Die Kontakte zeigen nur schwache Brandstellen.

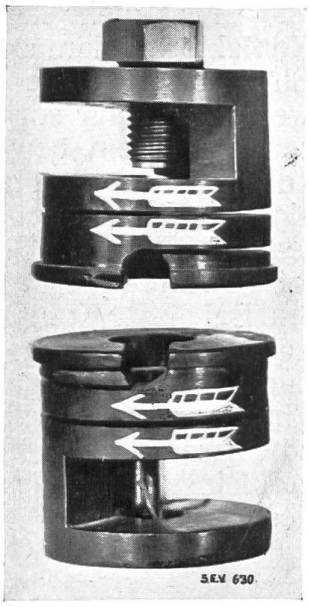

Fig. 39.
Solenoidkontakte, deren Anziehungskraft die Abhebekräfte kompensiert. Die Pfeile geben die Stromführung in 2 Solenoiden eines Kontaktpaares an.

Ausser der Abstossung zwischen den Kontakten werden durch die Anwendung von Solenoidkontakten auch die Kräfte, welche die Einschaltbewegung der Schalttraverse hemmen, kompensiert. Man erreicht somit einen weiteren Vorteil, indem der Schalterantrieb vor der Ueberlastung und der Schalter vor der Gefahr einer unvollkommenen Einschaltung (Stehlichtbogen) und Hängenbleiben der Traverse in einer Zwischenstellung wegen eines ungenügenden Antriebsmomentes geschützt sind. Bei einer solchen Bemessung der Kontakte kann übrigens beim Abschalten die Traversenbewegung keine Verzögerung erleiden, da im Augenblick der Kontakttrennung die Vorgänge sich in genau gleicher Weise wie beim Einschalten abspielen. Die abstossenden Kräfte werden zunächst durch die Anziehungskräfte der Solenoide kompensiert, diese letzteren nehmen alsdann mit der Vergrösserung des Abstandes zwischen den Kontakten an Bedeutung rasch ab. Bei weiterer Bewegung wird die Traverse unter der Wirkung der schleifenförmigen Strombahn in gleicher Weise beschleunigt, wie dies in Schaltern mit üblichen Kontakten der Fall ist. Zahlreiche Versuche haben nun gezeigt, dass die Schalter mit Solenoidkontakten gefahrlos und ohne nennenswerte Lichtbogenbildung, unabhängig von der Nennstromstärke ohne Zerstörung oder Verschweissung der Kontakte auf heftigste Kurzschlüsse wiederholt eingeschaltet werden können.

Die geschilderte Lösung der elektrodynamischen Seite des Problems lässt sich theoretisch auf beliebig hohe Ströme ausdehnen, praktisch aber ist man wegen der Erwärmung der stromführenden Teile gezwungen, nicht über eine bestimmte Stromstärke zu gehen. Es war jedoch möglich, Solenoidkontakte zu entwickeln, die bei

Versuchen mit 160 000 Amp. max. die thermische sowie elektrodynamische Beanspruchung anstandslos vertragen haben, wie dies aus der Fig. 40 ersichtlich ist.

Schlussbemerkung.

Das Oelschalterproblem ist mit mannigfaltigen Vorgängen verknüpft, die nicht nur in das Wirkungsfeld des Ingenieurs, sondern auch in den Tätigkeitsbereich des Physikers und Chemikers hinein ragen. Die zahlreichen Aufgaben, die das Studium der inneren Vorgänge erwachsen lässt, sind noch nicht restlos gelöst und eine weitgehende Vertiefung der Forschungsarbeiten wird zweifellos viel interessantes Material zu Tage bringen. Nur auf diese Weise wird es möglich sein, die Schalterfrage zu einer endgültigen Lösung zu führen. Die Kenntnis aller dabei auftretenden Erscheinungen wird uns erlauben, vollkommen betriebssichere Apparate herzustellen. Die Feuer- bezw. Explosionsgefahr kann durch zweckmässige Bemessung aller Schalterteile vermieden werden, in gleicher Weise wie dies z. B. bei Verbrennungsmotoren der Fall ist, die trotz innerer Explosion explosionssicher gebaut werden. Die Forschungsarbeiten können noch nicht als abgeschlossen gelten; die theoretischen und experimentellen Grundlagen für den Bau von Oelschaltern, die heute uns zur Verfügung stehen, haben jedoch eine Berechnungsmethode der Schalterbeanspruchung zu entwickeln erlaubt, welche auch bei Netzversuchen ihre Prüfung bestanden hat.

Wirtschaftliche Mitteilungen. — Communications de nature économique.

Die Einigung in der ostschweiz. Elektrizitätswirtschaft.

Wir entnehmen der «Neuen Zürcher Zeitung»: « St. Gallen, 15. August. ag. Nachdem der Verwaltungsrat der Nordostschweizerischen Kraftwerke bereits am 8. August einem neuen Stromlieferungsvertrag mit den St. Gallisch-Appenzellischen Kraftwerken und einem weitern Vertrag über Beteiligung der St. Gallisch-Appenzellischen Kraftwerke am Nordostschweizerischen Kraftwerkunternehmen zustimmte, hat der Verwaltungsrat der St. Gallisch-Appenzellischen Kraftwerke am 14. August diese Verträge unter Vorbehalt der Zustimmung der Generalversammlung ebenfalls genehmigt. Nach letzterem Vertrag beteiligen sich die St. Gallisch-Appenzellischen Kraftwerke mit 10 Mill. Fr. Aktienkapital an den N. O. K. Von diesen 10 Millionen sind, entsprechend dem von den Aktionärkantonen auf der Aktienausgabe 1920 einbezahlten Betrag, 40 %, d. h. 4 Mill. Fr., Ende September 1928 einzubezahlen. Damit werden die St. Gallisch-Appenzellischen Kraftwerke berechtigt, ihren Fremdstrombedarf entweder ab 1934 zum Einheitspreis oder nach Wahl eventuell schon vorher zu den jeweiligen Bedingungen des für die Aktionärkantone der N.O.K. geltenden Tarifs von diesen zu beziehen. Ausser der Ausnützung der bereits vorhandenen eigenen Anlagen sind die St. Gallisch-Appenzellischen Kraftwerke zum Bau und Betrieb weiterer eigener hydraulischer oder kalorischer Spitzenwerke mit zusammen 20 000 kW Leistung und einer Gebrauchsdauer von 1200 Stunden berechtigt, was den Uebergang zum nordostschweizerischen Krafttarif erleichtern soll. »

Italienische Stromeinfuhrtaxe.

Wir reproduzieren hier den Text des nunmehr zum Gesetz erhobenen italienischen Dekretes vom 21. Oktober 1926.

Die Einfuhrgebühr ist für die Sommerenergie wohl gegenüber dem ursprünglichen Text auf die Hälfte herabgesetzt worden. Sie wird aber ohne Rücksicht auf die Qualität als fester Zuschlag erhoben und bildet für die exportierenden Elektrizitätswerke zweifellos einen empfindlichen Schaden.

Conversione in legge, con modificazione, del R. decreto 21 ottobre 1926, n. 2479, contenente disposizioni sull' importazione e l'esportazione di energia elettrica.

Articolo unico. — È convertito in legge il Regio decreto 21 ottobre 1926, n. 2479, contenente disposizioni sull'importazione e l'esportazione di energia elettrica, modificando come segue l'art. 4:

Art. 4. — L'introduzione di energia elettrica dall'estero nel Regno è soggetta al pagamento di un diritto nella misura di lire 0,025 per kilowatt'ora nel periodo 16 novembre al 15 aprile, e di lire 0,0125 per kilowatt'ora nel periodo 16 aprile al 15 novembre.

L'energia elettrica importata in Italia in dipendenza di contratti preesistenti al 12 marzo 1927 è esonerata dal pagamento del suddetto diritto fino alla scadenza dei detti contratti, ma non oltre un periodo di 10 anni dalla data suindicata.

(Fortsetzung Seite 580.)