

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band:	8 (1917)
Heft:	10
Artikel:	Vierter Bericht der Kommission für Hochspannungsapparate und Brandschutz : die Untersuchungen an Oelschaltern II. Teil [Fortsetzung und Schluss]
Autor:	Bauer, Bruno
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1059593

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: 13.01.2026

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich mit den Jahres-Beilagen „Statistik der Starkstromanlagen der Schweiz“ sowie „Jahresheft“ und wird unter Mitwirkung einer vom Vorstand des S. E. V. ernannten Redaktionskommission herausgegeben.

Alle den Inhalt des „Bulletin“ betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat
des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins,
Neumühlequai 12, Zürich 1 - Telephon: Hottingen 37.08

Alle Zuschriften betreffend Abonnement, Expedition und Inserate sind zu richten an den Verlag:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.,
Hirschengraben 80/82 Zürich 1 Telephon Hottingen 36.40

Abonnementspreis
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft und Statistik:
Schweiz Fr. 15.—, Ausland Fr. 25.—.
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 1.50 plus Porto.

Publié sous la direction d'une Commission de Rédaction nommée par le Comité de l'A. S. E.

Ce bulletin paraît mensuellement et comporte comme annexes annuelles la „Statistique des installations électriques à fort courant de la Suisse“, ainsi que l„Annuaire“.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la matière du „Bulletin“ au

Secrétariat général
de l'Association Suisse des Electriciens
Neumühlequai 12, Zurich 1 - Telephon: Hottingen 37.08
Toutes les correspondances concernant les abonnements, l'expédition et les annonces, doivent être adressées à l'éditeur :
Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Hirschengraben 80/82 Zurich 1 Téléphone Hottingen 36.40

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A.S.E.), y compris l'Annuaire et la Statistique, Fr. 15.— pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 1.50, port en plus.

VIII. Jahrgang
VIII^e Année

Bulletin No. 10

Oktober 1917
Octobre

Vierter Bericht der Kommission für Hochspannungsapparate und Brandschutz.

Die Untersuchungen an Oelschaltern II. Teil

erstattet vom Generalsekretariat.

Bearbeitet von Dr. Bruno Bauer, Ing.

I. Die thermodynamischen und chemischen Vorgänge beim Abschaltprozess.

(Fortsetzung und Schluss von Seite 238, Bulletin 1917.)

Die mechanischen Kräftewirkungen der Gassphäre.

Wenn beim Ausschalten im Moment des Auseinandergleitens der lichtbogentragenden Kontaktteile die zwischen ihnen entstehende Spannung den für die Lichtbogenbildung erforderlichen Mindestbetrag erreicht,⁹⁾ so ist damit nach früherem zugleich die Existenz eines glühenden negativen Kraters vorausgesetzt, der abwechselnd gemäss dem periodischen Wechsel der Stromrichtung auf der einen und andern Kontaktfläche auftritt. In der zwischen den Kontakten liegenden vorerst noch sehr dünnen Oelschicht tritt durch diese Wärmequelle eine Verdampfung und Vergasung des Oels auf, sodass sich der Lichtbogen von Anfang an in einer Gassphäre entwickelt. Diese schafft für den Lichtbogen bis zu seinem endgültigen Abreissen einen vom Öl befreiten Raum, denn mit wachsender Lichtbogenlänge wächst die an die Gasmasse abgegebene Wärmemenge an, woraus als Folge des Verdampfens neuer Oelmengen und der Expansion der Gase eine fortschreitende Vergrösserung des Gasvolumens resultiert. Auf diese Gassphäre wirken allerdings auch äussere, einseitig gerichtete Kräfte, vorab der Auftrieb. Dieser allein verursacht aber nur eine relativ langsam sich entwickelnde Orts- und Formveränderung der Gasmasse be-

⁹⁾ Siehe Erster Bericht, Bulletin 1915, Seite 142 u. fg.

züglich der Kontakte, sodass, wie die Versuche zeigen, das endgültige Abreissen des Lichtbogens bei normalem Abschaltvorgang im allgemeinen durch die elektrischen Bedingungen im Stromkreis allein bestimmt ist. Die Wirkung der äusseren einseitig gerichteten Kräfte auf die Gassphäre kann indessen durch künstliche Oelbewegung im Sinne eines vorzeitigen „Ausblasens“ des Lichtbogens bedeutend erhöht werden. Wir berichten auf Seite 288 über unsere diesbezüglichen Versuche. Die zuweilen noch anzutreffende Anschauung, dass der Lichtbogen die zwischen den Kontakten liegende Oelschicht in jeder Halbperiode „durchschlage“ ist demnach irrig, sie ist auch mit den physikalischen Bedingungen für die Lichtbogenexistenz nicht vereinbar.

Das Arbeitsvermögen der den Bogen umgebenden Gassphäre ist für den weiteren Verlauf des Abschaltvorgangs von ausschlaggebender Bedeutung. Die entwickelten Druckkräfte treten in der Bewegung der ruhenden Oelmasse zu Tage, die je nach der Grösse der ausgelösten Kräfte mehr oder weniger heftig verläuft und im ungünstigen Falle gefährliche Begleiterscheinungen einzuleiten vermag. Sei es, dass der in der Gassphäre entstehende Ueberdruck direkt zur Deformation des Schaltergefäßes führt, wie dies bei schweren Abschaltungen mehrfach zu beobachten war, sei es, dass durch die Oelbewegung die hocherhitzten Schaltergase noch während des Bestehens des Lichtbogens an die Oberfläche gelangen und so die Zündung des entstehenden explosiven Gasgemisches veranlassen. Dadurch werden neue Druckkräfte, die ihren Sitz über dem Oelspiegel haben, ausgelöst. Diese Erscheinungen der eigentlichen Schalterexplosion sind in einem besonderen Kapitel auf Seite 281 behandelt, wir beschränken uns hier allein auf das Arbeitsvermögen der Gassphäre im Oel.

Es bezeichne p der mittlere spez. Druck in der Gassphäre,
 V das Volumen,
 G_t das Gewicht der Gasmasse zur Zeit t ,
 R die Gaskonstante,
 T die mittlere absolute Temperatur der Gasmasse,

dann kann für das Arbeitsvermögen zur Zeit t geschrieben werden

$$(p \cdot V)_t = G_t \cdot R \cdot T \quad (2)$$

Da die erzeugte Gasmenge nach früherem proportional mit der Schalterarbeit A anwächst, so schreibt sich die Beziehung

$$(p \cdot V)_t = k \cdot A_t \cdot R \cdot T \quad (3)$$

Es darf nach anderweitigen Forschungen angenommen werden, dass die Lichtbogen-temperatur annähernd unabhängig von Strom und Spannung ist; wenn wir die gleiche Voraussetzung für die mittlere Temperatur der Gasmasse machen, folgt aus Gleichung (3), dass das Arbeitsvermögen der Gassphäre in jedem Zeitpunkt des Abschaltvorgangs durch den Betrag der bereits in den Schalter eingeführten Schalterarbeit bedingt ist und mit dieser anwächst.

In Verfolgung dieser Beziehungen entsteht als praktisch wichtigste Frage die Grösse des entstehenden *maximalen Ueberdrucks in der Gassphäre*. Seiner Ermittlung stehen leider sowohl auf rechnerischem wie experimentellem Weg grosse Schwierigkeiten entgegen. Wir müssen uns daher im folgenden nur mit orientierenden Angaben begnügen. Am einfachsten liegen die *Verhältnisse im gänzlich geschlossenen Oelschalter*, wie er etwa durch die bekannten Topfschalter der General Electric Comp. in Amerika und der Maschinenfabrik Oerlikon in Europa in Anwendung kommt. In solchem Fall ist der Ueberdruck im wesentlichen von der produzierten Gasmenge abhängig. Wir beschränken uns auf die Ermittlung des Enddrucks, wie er nach erfolgter Abschaltung im Raum unter dem Deckel in Folge der neu hinzutretenen Gasmenge vorherrschen würde, wenn dieser Raum wirklich allseitig abgeschlossen wäre. Diese Voraussetzung mag bei Topfschaltern für den ersten Moment nach erfolgter Abschaltung annähernd zutreffen, da der Gasabzug der relativ kleinen Oeffnungen wegen langsam vor sich geht im Verhältnis zur Lichtbogendauer. Bezeichnet V_0 das konstante Volumen unter dem Deckel und G das Gewicht des von früheren Schal-

tungen her sich bereits dort befindlichen Gases, so gilt für den Zustand vor der Abschaltung:

$$p_0 \cdot V_0 = G \cdot R \cdot T_0$$

Werden durch den Lichtbogen ΔG Gramm Gas erzeugt, so ist nach beendigter Abschaltung die Beziehung gültig:

$$p_1 \cdot V_0 = (G + \Delta G) R \cdot T_1$$

wo T_1 die Temperatur und p_1 der Druck der um ΔG bereicherten Gasmasse bedeuten. Daraus leitet sich durch Einführung der Schalterarbeit A die Gleichung für den Druckanstieg ab:

$$\Delta p = p_0 \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right) + \frac{k \cdot A \cdot R \cdot T_1}{V_0} \quad (4)$$

Aus dem Aufbau dieser Beziehung, die der vereinfachten Voraussetzungen wegen nur eine erste Orientierung zu geben vermag, kann immerhin ersehen werden, dass das Volumen V_0 unter dem Schalterdeckel, das bei gleicher Oelhöhe quadratisch mit dem Topfdurchmesser anwächst, für die Druckausbildung von grossem Einfluss ist. Dies folgt u. a. aus den Versuchen von *Merriam*¹⁰⁾, der Druckmessungen an Topfschaltern der General Electric Comp. beim Unterbrechen von Kurzschlussleistungen eines 12 000 kVA Turbogenerators,

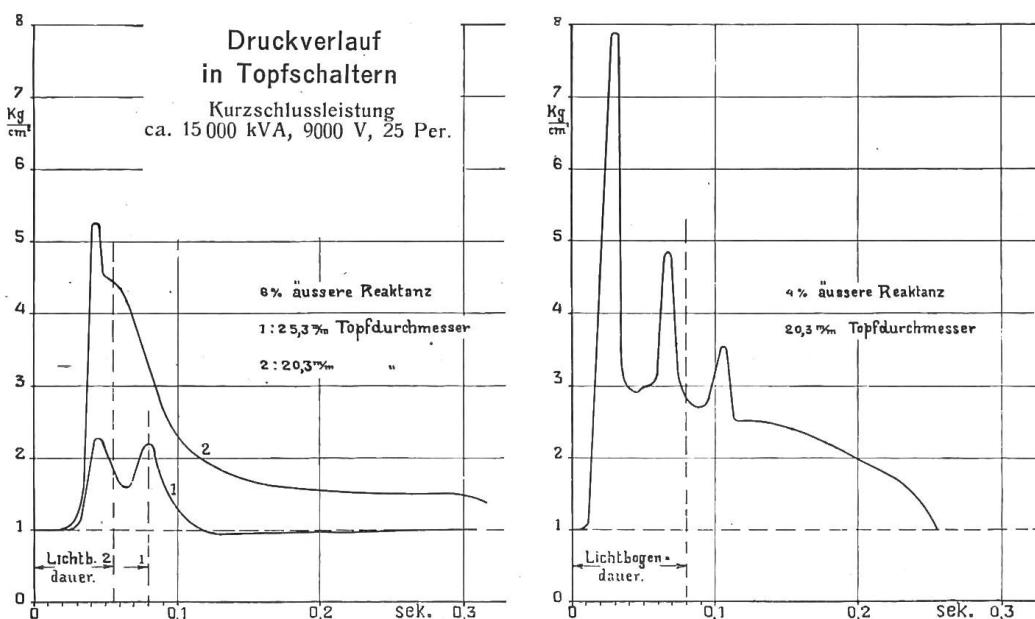


Fig. 1.

9000 V 25 Per. vorgenommen hat. Die durch ein graphisches Manometer aufgezeichneten Kurven des Druckverlaufs, die wir in Fig. 1 zusammengestellt haben, zeigen, dass beim Unterbrechen eines Kurzschlusses unter Vorschaltung einer äusseren Reaktanz von 6% (nach unserer Rechnung ergab dies eine zu unterbrechende Kurzschlussleistung von zirka 15 000 kVA pro Phase) beim Topfschalter mit rund 25 cm Durchmesser ein Ueberdruck von 1,25 kg/cm², bei einem solchen mit rund 20 cm Durchmesser ein Druckanstieg von 4,25 kg/cm² registriert wurde. Die Erhöhung der Kurzschlussleistung durch Verringerung der äusseren Reaktanz von 6% auf 4% (Vergrösserung von A) liess bei diesem Schalter den Ueberdruck auf 6,8 kg/cm² ansteigen. Wir haben mit unserer Formel (4) versucht, die Messungen, über deren Genauigkeit *Merriam* keine Angaben macht, nachzurechnen, um die Brauchbarkeit der ersteren zu prüfen.

Für den Fall der Vorschaltung der 6%igen Reaktanz ergibt sich bei $J_0 \cdot E = 15 000$ kVA, $t_e = 0,08$ Sec., $c = 0,07$ eine Schalterarbeit von rund 84 kWSec., bzw. von 58 kWSec.

¹⁰⁾ *Merriam*: Oil circuit breakers, Proc. A. I. E. E. 1911, pag. 1431.

bei $t_e = 0,055$ Sec. Nach unseren Versuchen erzeugt 1 kW Sec. $46,5 \text{ cm}^3$ Gas, so dass beim spezifischen Gewicht des Schaltergases (77,3 % Wasserstoff, 18,9 % Methan, 3,8 % schwere Kohlenwasserstoffe) von $0,195 \cdot 10^{-3} \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$ der Faktor k zu $9,08 \cdot 10^{-3}$ wird. Für die

Gaskonstante R wurde nach obiger Zusammensetzung der Wert 149,2 eingesetzt. Für den 20,3 cm-Topfschalter ergibt sich nach Abzug der unter dem Deckel sich befindlichen Konstruktionsteile bei 10 cm Lufthöhe (geschätzt) ein Volumen V_0 von ca. 2900 cm^3 , für die 25 cm-Ausführung ein solches von ca. 4500 cm^3 . Unter Annahme der Temperatur $T_0 = 273 + 30^\circ$ berechnen sich folgende Ueberdrücke:

Topfschalter Durchmesser in cm	Druckanstieg Δp in kg/cm^2				gemessen		
	berechnet für $T_1 = 273^\circ +$			200 $^\circ$	300 $^\circ$	400 $^\circ$	
	200 $^\circ$	300 $^\circ$	400 $^\circ$				
20,3	2,4	3,2	3,8	3,8	4,25	4,25	
25,3	1,3	1,8	2,3	2,3	1,25	1,25	

Die berechneten Werte können natürlich nicht genau mit den gemessenen übereinstimmen. Das Gasgemisch unter dem Schalterdeckel enthielt offenbar auch Oeldämpfe, während unsere Rechnung nur die Anwesenheit des eigentlichen Schaltergases berücksichtigt. Immerhin sieht man, dass die abgeleitete Beziehung für überschlägliche Rechnungen bei Topfschaltern brauchbare Nährungswerte liefert.

Die gebräuchlicheren *Kastenölschalter* weisen in ihren modernen Konstruktionen ganz bedeutend grössere Volumen V_0 unter dem Schalterdeckel auf (von der Dimension 20 000 bis 100 000 cm^3), sodass gemäss der Beziehung (4) selbst bei noch grösseren Kurzschlussleistungen keine nennenswerten Ueberdrücke zu erwarten wären, selbst bei ganz geschlossenem Schalter nicht. Unsere Versuche mit dem grossen Versuchsschalter führten indessen zu anderen Resultaten. Es ergab sich, dass bei offenem Abzughahn bei Abschaltleistungen bis 1000 kW das gewöhnliche Registriermanometer allerdings keine Drucksteigerung aufzeichnete; wurde aber der Schalter abgeschlossen und unter Druck gesetzt (bis 12 Atm. absolut), so zeigte das Instrument Ueberdrücke bis zu $8 \text{ kg}/\text{cm}^2$ an, obschon der Raum unter dem Deckel rund $30 000 \text{ cm}^3$ betrug. Nach Berechnung auf dem angegebenen Wege würde bei 1000 kVA Leistung hiebei ein Ueberdruck von weniger als $1/10 \text{ kg}/\text{cm}^2$ entstehen. Die Angaben des Manometers waren zu ungenau, wenigstens was diese maximalen registrierten Drücke betrifft, als dass hieraus eine Gesetzmässigkeit hätte abgeleitet werden können. Immerhin schien mit einiger Sicherheit hervorzugehen, dass innerhalb gewisser Grenzen der Ueberdruck umso höher stieg, je grösser der statische Druck gewählt wurde. Da in Gleichung (4) letzterer nur bei sehr hohen Temperaturen T_1 der Gasmasse über dem Oel von Einfluss wird, müssen bei der Ausbildung der Drucksteigerung im Oelschalter noch andere Momente mitwirken. Die Verfolgung dieser Erscheinungen erfordert die Kenntnis des Druckverlaufs während des Abschaltvorgangs.

Wir betrachten zuerst die Verhältnisse in einem offenen Gefäss, wie es durch den gewöhnlichen Oelschalter mit grossem Lufräum unter dem Schalterdeckel und grosser Abzugsöffnung gegeben ist. Siehe Fig. 2. Die Lichtbogensphäre liege in der mittleren Tiefe h unter dem Oelspiegel. Der statische Druck im Oel sei an dieser Stelle p_o , der Aussendruck p_a , der Druck in der Gassphäre p . Wir nehmen der Einfachheit halber letztere in Kugelform an mit dem Durchmesser d . Berücksichtigt man, dass beim Ausdehnen der Gasphäre in Folge der zugeführten Wärmemenge nicht nur der statische Druck p_o überwunden, sondern auch die Oelmasse über der Gasphäre beschleunigt werden muss, gelangt man durch einfache Ueberlegung zur Beziehung

$$p = p_o + \frac{\gamma \cdot h}{g} \cdot \frac{d^2}{\delta t^2} \quad (5)$$

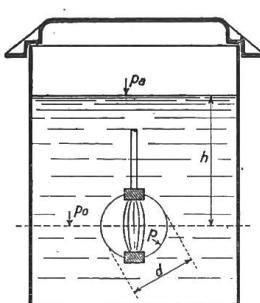


Fig. 2.

nun ist $(p \cdot V)_t = G_t R T$ wobei V gleich dem Volumen der Gassphäre, nämlich $\frac{d^3 \cdot \pi}{6}$ gesetzt sei.

In der Zustandsgleichung ist auf der rechten Seite nur die Gasmenge G eine Funktion der Zeit, die wir zu $G = c \cdot t^m$ anschreiben. Da G mit der Schalterarbeit A proportional anwächst, ist die Funktion $c \cdot t^m$ experimentell zu bestimmen. Soweit wir die Sache verfolgten, kann der Exponent $m = 2$ angenommen werden. Damit erhält man für den Verlauf des Durchmessers der Gassphäre folgende Differentialgleichung:

$$p_0 d^3 + \frac{\gamma \cdot h}{g} \cdot d^3 \cdot \frac{d^2 d}{dt^2} = \frac{6}{\pi} \cdot c \cdot R \cdot T \cdot t^m \quad (6)$$

Die Gleichung ist mit den uns bekannten Mitteln nicht lösbar. Wir greifen daher auf die Beziehung (5) zurück, indem wir durch wahrscheinliche Annahmen über den Verlauf des Gasvolumens V bzw. des Durchmessers d die Entwicklung von p graphisch verfolgen. In Fig. 3 ist als erste Annahme ein solcher Verlauf angegeben. Es sind daselbst die Expansionsgeschwindigkeit u und der Ueberdruck $\Delta p = p - p_0$ als erste und zweite Ableitung der angenommenen d -Kurve abgeleitet. Die gewonnene Druckkurve hat lediglich qualitative Bedeutung. Es zeigt sich, dass der Druck in der Gassphäre im offenen Schaltergefäß in Folge der Beschleunigungskräfte der Oelmasse oscillatorisch verlaufen kann. Es ist anzunehmen, dass sich in diesem Fall sehr wahrscheinlich auch das Volumen V oscillatorisch entwickelt, etwa in Form einer aufsteigenden Wellenlinie. Die Behandlung dieser zweiten wahrscheinlicheren Annahme zeigt, dass der Charakter der Druckkurve dadurch nicht wesentlich verändert wird. Aus Gleichung (5) ist zu schliessen, dass hiebei die Druckamplituden mit der Oelhöhe anwachsen. Um die entwickelte Hypothese des Druckverlaufs zu prüfen, ist das eingangs beschriebene elektrische Manometer gebaut worden. Von den damit gewonnenen Aufnahmen zeigen Fig. 4 und 5 zwei Beispiele. Fig. 4 stellt den Druckverlauf bei offenem Oelschalter dar. Mit der Druckkurve ist zur Markierung des Lichtbogenbeginns und -endes zugleich die Kurve der Schalterspannung e_i (Spannung zwischen den lichtbogentragenden Kontakten) aufgenommen worden. Es zeigt sich, dass der Druck in der Kesselwandung in der Tat oscillatorisch verläuft. Die Amplituden sind nur gering und die Periodendauer sehr klein (ca. 300 \div 400 Perioden pro Sek.), weshalb es sich ohne weiteres erklärt, warum das gewöhnliche Registrier-

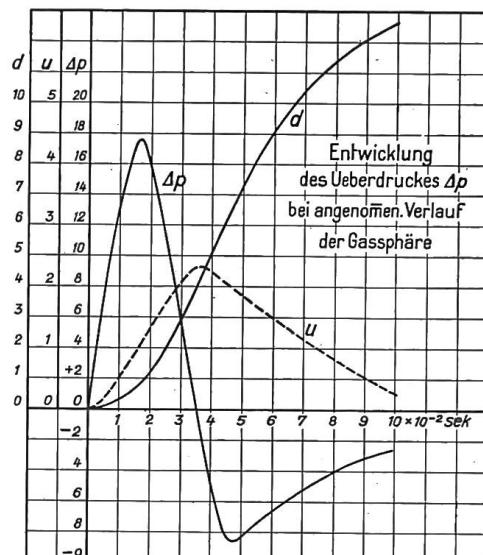


Fig. 3.

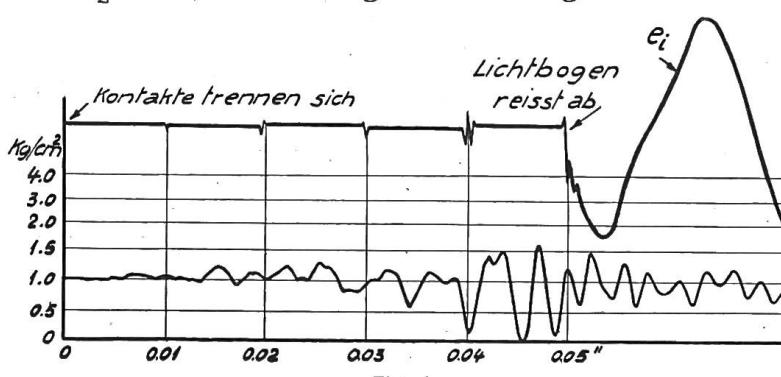


Fig. 4.
Druckverlauf im Innern des Oelschalters.
Statischer Druck = Atmosphärendruck.

manometer keinen Ueberdruck aufzeichnete. In Fig. 5 ist der Druckverlauf für den geschlossenen Schalter mit 6 kg/cm^2 absolutem statischem Druck dargestellt. Der Charakter der Kurve ist prinzipiell der gleiche, nur lagert sich diesmal den beschriebenen primären Schwingungen eine Druckschwingung bedeutend grösserer Periodendauer über, wodurch in unserem Beispiel der maximale Ueberdruck auf $7-8 \text{ kg/cm}^2$

steigt (absolut 13—14 kg/cm²). Die Periode dieser übergelagerten Schwingung dehnt sich über $7/50$ Sek. aus, in welcher Zeit der Zeiger des registrierenden mechanischen Manometers wohl beschleunigt werden konnte. Es war also offenbar diese langsamere Druckwelle, die in den beschriebenen Manometermessungen zu Tage trat.

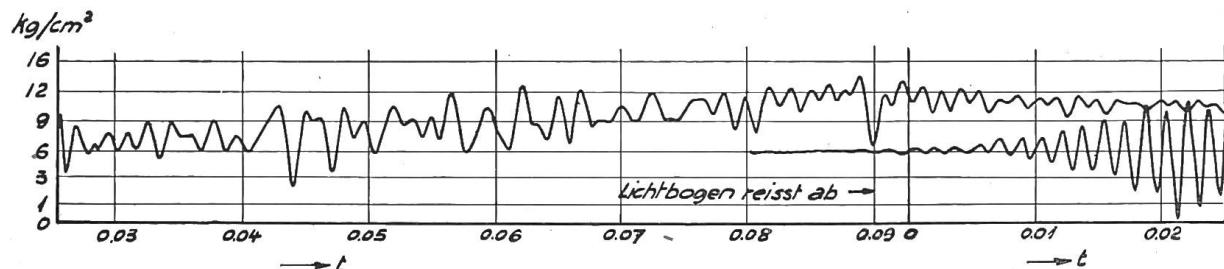


Fig. 5.
Druckverlauf im Innern des geschlossenen Oelschalters.
Statischer Druck = 6 kg/cm² absolut.

Woher röhrt nun diese Schwingung? Nach dem uns zur Verfügung stehenden Beobachtungsmaterial darf vermutet werden, dass es sich um Schwingungen der unter dem Schalterdeckel unter Druck stehenden Gasmasse handelt. Die Anschauung lässt eine Erklärung des oben beschriebenen Zusammenhangs zwischen maximalem Ueberdruck und statischer Pressung im Oelschalter zu, wonach ersterer für eine und dieselbe Abschaltleistung mit der statischen Pressung anwächst. Die in den Druckkurven von Merriam Fig. 1 auftretenden Schwingungen sind wohl auf die gleiche Ursache zurückzuführen, indem im Moment des Abschaltens der Topfschalter sich wie ein geschlossenes Gefäß verhält. Die naheliegende Vermutung, dass diese Erscheinung durch die Bewegung der Kontaktstange, die eine Veränderung des statischen Drucks zur Folge hat, ausgelöst werde, scheint nach unseren Beobachtungen nicht zuzutreffen. Bei langsamer Ausschaltung war, wohl in Folge der grössern Gasproduktion, der Ueberdruck ausgeprägter. Es ist daher anzunehmen, dass die Schwingungen des unter dem geschlossenen Schalterdeckel sich befindlichen Gases ihren Anstoss im oscillatorischen Verlauf des Drucks der neu entstehenden Gasmasse finden.

Die genaue Untersuchung dieser Zusammenhänge hätte uns zu weit geführt. Für die Praxis ist der Hinweis genügend, dass der beim Abschalten zu erwartende Druckstoss in Folge von Schwingungerscheinungen grösser sein kann als der Wert, der sich im geschlossenen Gefäß in Folge der neu entstehenden Gasmasse allein einstellt. Dies trifft besonders für den unter statischem Druck stehenden Schalter zu. Ganz geschlossene Schalterkonstruktionen erhöhen daher die Gefahr zusätzlicher Druckstösse beim Abschaltvorgang.

Der abnormale Druckverlauf, die Kaminbildung.

Steigert man in einem gegebenen Schalter die Schalterarbeit immer mehr, sei es durch Erhöhung der unterbrochenen Leistung oder durch Verringerung der Schaltgeschwindigkeit, so nimmt das Arbeitsvermögen der den Lichtbogen umgebenden Gassphäre schliesslich so grosse Beträge an, dass die Druckkräfte nicht mehr oscillatorisch verlaufen. Der erste Ueberdruck (siehe Fig. 3) genügt, um die Oelsäule an einer Stelle empor zu schleudern und ein *Kamin* von der Gassphäre zur Oeloberfläche zu schaffen, durch das die glühenden Gase aufsteigen, um sich oben bei Anwesenheit von Sauerstoff zu entzünden. Für die heute gebräuchlichen Schalterkonstruktionen mit grossem luftfülltem Raum unter dem Schalterdeckel und normaler Oelfüllung ist hiebei fast in jedem Fall eine Feuererscheinung zu erwarten, d. h. bei Bildung eines explosiven Gasgemisches die eigentliche Schalterexplosion. Für den gegebenen Schalter mit bestimmter Oelhöhe kann daher diese kritische Schalterarbeit, bei der die Kaminbildung eintritt, als die Grenze der Beanspruchung bezeichnet werden. Wird diese noch mehr gesteigert, so tritt nach unseren Versuchen fast unfehlbar die Zerstörung des Schalters durch Verbrennung ein. Der Lichtbogen steigt nämlich bei ausgeprägter Kaminbildung durch das Kamin nach oben und verhält sich hiebei wie ein Abschaltlichtbogen eines Luftschatlers. Da die Kühlung der Elektroden durch

das Oel bedeutend verringert ist, steigt die Lichtbogendauer auf mehrfache Beträge des normalen Wertes, der Bogen „bleibt stehen“. Es braucht nicht besonders hervorgehoben zu werden, dass sich vom Moment der Kaminbildung an die schützenden Eigenschaften des Oels im Oelschalter vollständig ins Gegenteil kehren; die Schutzmassnahmen gegen diesen alsdann gefährlichsten Brandstifter sind im zweiten Bericht der Kommission¹¹⁾ erörtert.

Wir haben die Erscheinungen der Kaminbildung am kleinen Versuchsschalter sehr eingehend beobachtet, es zeigt sich, dass im gegebenen Schalter jeder Oelhöhe eine bestimmte kritische Schalterarbeit oder Abschaltleistung zugeordnet werden kann, bei der die Kaminbildung eintritt. Umgekehrt kann auch für eine bestimmte Abschaltleistung die *kritische Oelhöhe* gesucht werden. Unsere Versuche sind meist nach dieser Richtung durchgeführt worden. Wir geben nachfolgend das Protokoll einer Versuchsserie, aus der die verschiedenen Stadien der Oelbewegung bis zum abnormalen Verlauf zu erkennen sind.

Verlauf des Abschaltvorgangs bei veränderlicher Oelhöhe.

Kleiner Versuchsschalter, normalflüssiges Oel A. $40^{\circ} \div 60^{\circ}$ C

Schaltergefäß vollständig offen. 80 A, 280 V, 22,4 kW.

No.	Oelhöhe über den Kontakten mm	Anzahl der Abschaltungen	Verlauf der Abschaltung bezüglich der Erscheinungen im Oel
1	45	2	je kleine Oelspritzer, dumpfer Schlag im Innern des Oels (Ueberdruck in der Gassphäre), Gas spritzt in Blasen auf, keine Rauchentwicklung.
2	40	3	je stärkere Spritzer, erste Rauchentwicklung, Schlag im Innern wie oben.
3	35	3	starke Blasenbildung, Oelspiegel heftig bewegt, starke Rauchentwicklung.
4	30	2	starkes Oelschleudern, viel Rauch.
5	25	3	1 mal wie oben, 2 mal kleine Flamme, ohne Rauch.
6	22,5	2	heftige Verbrennung der aufsteigenden Gase.
7	20	2	heftige Verbrennung der Gase, Oelspritzer entzünden sich, Oel verdampft oben.
8	17,5	2	Lichtbogen steigt auf, explosionsartige Verbrennung der Oeldämpfe und Rauchwolken.
9	15	2	wie oben, gesteigerte Verbrennung des Oels.
10	12,5	2	wie oben, Lichtbogen bleibt stehen.
11	10	1	Lichtbogen bleibt stehen, Oel siedet an der ganzen Oberfläche. Heftige Verbrennung mit starker Rauchentwicklung.

¹¹⁾ Siehe Bulletin 1915, Seite 290.

Naturgemäss muss die kritische Oelhöhe mit der zu unterbrechenden Leistung bezw. mit der Schalterarbeit anwachsen, weil eine Steigerung der letzteren die Vergrösserung des Arbeitsvermögens der Gassphäre zur Folge hat. In Fig. 6 ist der am kleinen Versuchsschalter ermittelte Zusammenhang dargestellt, daselbst ist auch die Kurve der Oelhöhe eingetragen, bei der sich der Lichtbogen wie ein solcher zwischen Elektroden in Luft entwickelt, d. h. in Folge der bedeutend grösseren Bogenlänge stehen bleibt.

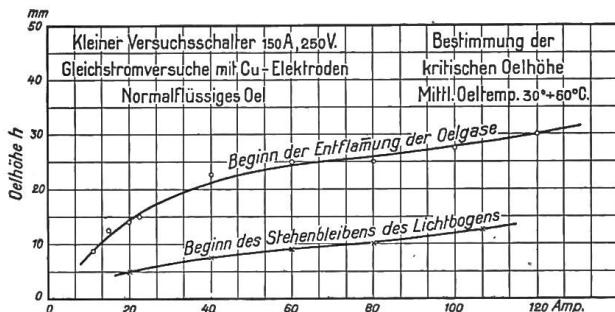


Fig. 6.

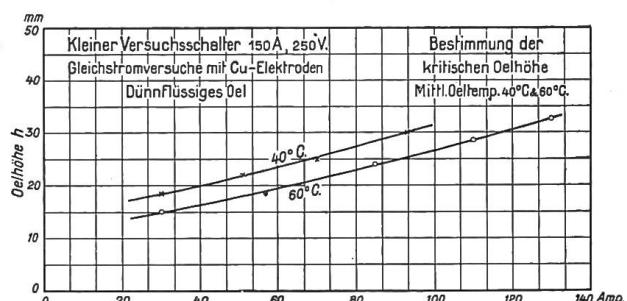


Fig. 7.

Die einzelnen Oelsorten zeigten keine ausgeprägten Unterschiede in ihrem Verhalten bezüglich der Kaminbildung, es sei denn, dass sie sich in der Viskosität unterscheiden. Es ergab sich, dass die Kaminbildung um so früher eintritt, je grösser die Viskosität des Oels gewählt wird. Dünnsflüssige Oele zeigen daher ein günstigeres Verhalten. Das folgt z. B. aus Fig. 7, in welcher die kritischen Oelhöhen für Temperaturen des Oels von 40° und 60° C eingetragen sind. Bekanntlich verringert sich die Viskosität der Oele mit steigender Temperatur. Dieser Einfluss der Viskosität auf die Kaminbildung ist für den Betrieb von Wichtigkeit. Wir erkennen, dass verschlammte, dickflüssige Schalteröle den Abschaltvorgang durch Kaminbildung gefährden können.

Die am kleinen Versuchsschalter gewonnenen Zahlenwerte über die kritische Oelhöhe lassen natürlich keinen Schluss über die für moderne Oelschalter zulässigen Oelhöhen zu. Wir haben allerdings an den im Ersten Bericht beschriebenen Schalterausführungen von Brown Boveri & Cie., Maschinenfabrik Oerlikon und Carl Maier Schaffhausen ebenfalls diesbezügliche Beobachtungen gemacht. Die uns zur Verfügung stehenden Leistungen waren aber relativ klein, sodass bei den für solche Schalter gebräuchlichen Oelhöhen (etwa gemäss den Richtlinien des V. D. E.) auch bei einpoliger, einfacher Unterbrechung mit sehr kleiner Schaltgeschwindigkeit (20 cm/Sek. und mehr) beim Abschalten nur eine Wallung an der Oeloberfläche zu beobachten war. Anderweitige Erfahrungen, u. a. auch die im Vorwort erwähnten Versuche von Brown Boveri & Cie. mit grossen Kurzschlussleistungen im Löntscherwerke, scheinen zu ergeben, dass die in den besagten Richtlinien festgelegten Oelhöhen den entsprechenden maximalen Leistungen, für die der Schalter bestimmt ist, im allgemeinen Genüge leisten. Eine Garantie für Vermeidung von Schalterexplosionen darf der Zufälligkeiten wegen, denen der Verlauf der Abschaltung immer ausgesetzt ist, in diesen Festsetzungen allerdings nicht erblickt werden. Es kann der Lichtbogen auch aus anderen als den geschilderten Ursachen, etwa in Folge gestörter Schaltbewegung oder im Fall des Ueberspringens des Bogens an die geerdete Kastenwand „stehen bleiben“ und damit eine ausserordentliche Wärmeentwicklung verursachen, die weit über das bei grösster Abschaltleistung sich einstellende Mass hinaus gehen kann. Die Kaminbildung könnte grundsätzlich auch in solchem Fall durch eine genügend hohe Oelschicht vermieden werden, es wäre aber nicht angezeigt, die gewünschte Sicherheit auf diesem Wege zu suchen. Die modernen Kastenölschalter enthalten schon bei normaler Oelhöhe ganz bedeutende, die Brandgefahr erhöhende Oelmengen und es ist erstaunlich, welch grosser Teil hievon oft unausgenützt bleibt. Das Bestreben des Konstrukteurs geht auch richtigerweise dahin, den Schalter überhaupt mit möglichst geringer Oelmenge zu bauen. Man muss aber dann darnach trachten, diese Oelmenge gut auszunützen, derart, dass ein möglichst grosser Teil wirklich zur Isolierung und Lichtbogenkühlung herangezogen wird. Dies kann prinzipiell dadurch geschehen, dass

die zu unterbrechende Leistung auf mehrere Unterbrechungsstellen verteilt wird. Abgesehen vom Vorteil mehrfacher Unterbrechung im Sinne einer Reduktion der totalen Schalterarbeit wird damit eine erhöhte Sicherheit gegen die Kaminbildung gewonnen. Mit der heute fast allgemein gebräuchlichen Konstruktion der Vielfachunterbrechung kommt man allerdings mit der Raumausnutzung im Oelkasten nicht weit. Es sollte z. B. bei einphasigen Schaltern die Anordnung der Unterbrechungsstellen in der Längsaxe der beweglichen Strombrücke verlassen werden; die lichtbogentragenden Kontaktteile kommen auf diese Weise viel zu nahe aufeinander zu sitzen, so dass dort das Oel unverhältnismässig stark beansprucht wird. Besser ist die Anordnung mit mehreren senkrecht zur Längsaxe angebrachten Strombrücken, die in Serie liegen. Man erhält so z. B. für sechs Unterbrechungsstellen die Disposition eines dreipoligen Oelschalters mit sechs gleichmässig verteilten Unterbrechungen. Unter Einhaltung der in den besagten Richtlinien des V. D. E. angegebenen Distanzen wird hiebei das totale Oelvolumen eher noch kleiner.

Der Topfschalter nimmt hierin eine Sonderstellung ein. Man darf behaupten, dass er die beste Oelausnutzung aufweist, welche naturgemäss auch ein rascheres Fortschreiten der Oelkarbonisierung zur Folge hat, indem durch die einfache Unterbrechung pro Topf die meist relativ geringe Oelmenge sehr stark beansprucht wird. Aus den früher erwähnten amerikanischen Versuchen ist zu schliessen, dass beim Unterbrechen im Topfschalter bei grosser Leistung mit Sicherheit Kaminbildung eintritt. Trotzdem ist anlässlich der Versuche nie Oelentzündung oder gar Explosion eingetreten, auch ist aus der übrigen Literatur über diesen Gegenstand von keinen Schalterexplosionen bei der Topfkonstruktion zu lesen. Der Grund dieses vorteilhaften Verhaltens der Topfschalter liegt im geringen Luftraum unter dem Schalterdeckel, der gerade bei schwerer Abschaltung die Bildung explosibler Gasgemische verunmöglicht. Wenn es daher gelingt, für die gebräuchlichen Kastenkonstruktionen ähnliche Bedingungen zu schaffen, verliert auch hier die Kaminbildung an Gefährlichkeit. Nachdem daher die in den Richtlinien des V. D. E. angegebenen Mindestöhlöhlen nach allgemeinen Erfahrungen als im allgemeinen hinreichend anzusehen sind, haben wir diese Frage nicht mehr weiter untersucht, sondern das Hauptgewicht auf die Erforschung der Explosionsbedingungen im Oelschalter gelegt.

II. Die Explosionserscheinung im Oelschalter.

Bei den gebräuchlichen Schalterausführungen gelangen die Gase nach vollzogener Abschaltung durch den Auftrieb, oder bei abnormalem Verlauf direkt durch das gebildete Kamin an die Oeloberfläche und mischen sich dort mit der unter dem Schalterdeckel befindlichen Luft zu einem brennbaren Gasgemisch. Wir nennen diesen Raum den *Mischungsraum*. Normalerweise ziehen die Gase, die, wie später angegeben, ein bedeutend kleineres spezifisches Gewicht aufweisen als Luft, durch die Abzugsöffnungen im Schalterdeckel ins Freie; bei den heute hiefür üblichen Anordnungen dürfte es aber immer mehrere Sekunden dauern, bis alles Gas den Mischungsraum verlassen hat. Dieser verhält sich daher unmittelbar nach der Abschaltung wie ein geschlossener Raum. Die eigentliche Schalterexplosion entsteht durch die explosionsartige Verbrennung des Gasgemisches unter dem Schalterdeckel. Im Gegensatz zu den zuweilen beobachteten zerstörenden Wirkungen des Ueberdruckes in der Gassphäre, von dem früher die Rede war, die sich in einer Deformation und eventuell Aufreissung des Kessels bekunden, hat die explosionsartige Verbrennung im Mischungsraum meist die charakteristische Zertrümmerung des Gefäßes zur Folge. Der Sitz des Druckzentrums ist oberhalb des Oelpiegels, weshalb sich die Zerstörung besonders am Schalterdeckel bekundet.

Die Zündungsursachen des Gasgemisches.

Als Zündungsursache kommen im praktischen Betrieb zwei Möglichkeiten in Frage. Der wahrscheinlich häufigere Fall der Zündung tritt durch die *Kaminbildung* ein. Hier gelangen die Gase mit samt den an der Peripherie der Gassphäre entstehenden Oeldämpfen in hoherhitztem Zustand in den Mischungsraum, sodass die Verbrennung durch Selbstzündung der Gase eingeleitet wird.

Eine weitere Möglichkeit liegt in der *Fremdzündung im Mischungsraum durch Gleitfunken*, die sich unter dem Schalterdeckel im Bereich der Durchführungsisolatoren ausbilden können. Es ist durchaus denkbar, dass durch Störungen des Spannungsgleichgewichts in der Anlage beim Abschaltprozess Entladungsscheinungen entstehen, z. B. in Form stiller Entladungen. Untersuchungen von W. M. Thomson¹²⁾ über die Entzündung von Gasgemischen ergaben, dass zur Einleitung der Verbrennung idealer explosibler Gemische ausserordentlich kleine elektrische Energiemengen hinreichen. Es scheint, dass selbst nur die Ionisierung des Gases zur Auslösung der explosionsartigen Verbrennung genügt. Wir haben die Frage nicht verfolgt, konstatierten aber selbst an unserem Versuchsschalter, dass unter Umständen ausserordentlich kleine Funken zur Zündung ausreichen, wir fanden auch das von Thomson hervorgehobene Gesetz bestätigt, wonach eine um so grössere Zündungsenergie erforderlich ist, je mehr sich das Gasgemisch von seiner idealen Zusammensetzung entfernt.

Wenn auch die Einleitung einer Schalterexplosion gewöhnlich auf Kaminbildung zurückzuführen sein wird, liegt doch in der Möglichkeit der Fremdzündung eine Erklärung für einige Fälle von Schalterzerstörungen, deren Ursachen sonst nicht ersichtlich wären. Es sei nur an eine Schalterexplosion erinnert, die sich beim Wiedereinschalten nach der automatischen Auslösung ereignete. Der Abschaltvorgang braucht eben gar nicht abnormal zu verlaufen, es genügt, dass die, durch eine oder mehrere aufeinanderfolgende Abschaltungen entstehende Gasmenge mit der Luft im Mischungsraum ein explosibles Gasgemisch bilde und dieses durch eine Funkenentladung irgend welcher Ursache zur Zündung gelange.

Das Explosionsbereich der Schaltergase.

Bekanntlich sind brennbare Gasgemische und Dämpfe irgend welcher Art nur innerhalb bestimmter Grenzen des Mischungsverhältnisses von sich aus brennbar. Werden diese Grenzen überschritten, so tritt im Mischungsraum trotz Fremdzündung, z. B. durch einen Funken, keine Verbrennung statt. Es zeigt sich auch, dass innerhalb der Explosionsgrenzen die Verbrennungsgeschwindigkeit veränderlich ist, indem sich z. B. bei Mischung mit Luft die Intensität der Verbrennung und der damit verbundenen Druckäusserung in einem geschlossenen Gefäss mit zunehmendem Anteil des Gases bis zu einem Maximum steigert. Auf das Explosionsbereich hat nicht nur die Gaszusammensetzung einen Einfluss, sondern auch die Art der Zündung, die Temperatur und der Druck, unter dem die Gase stehen, und die Grösse der Gefässer. Je grösser das Gefäss ist, in dem die Explosion stattfindet, um so grösser wird das Explosionsbereich. Dies wird treffend illustriert durch Explosionsversuche, die Eitner¹³⁾ mit Wasserstoff-Luftgemischen in verschiedenen Gefässen vornahm. Er fand für Wasserstoff folgende Werte in Vol. % des totalen Volumen.

	Explosionsgrenzen	
	untere	obere
Verbrennung in einem 19 mm Rohr	9,5 %	66,4 %
" in einem offenen Zylinder von 62 mm Weite . . .	8,5 %	—
" in einem Glasballon	—	75,5 %

Hat man also bei Schaltern grosse Mischungsräume, so steigt das Explosionsbereich der Schaltergasluftmischungen an. Wir führen nachstehend die von Eitner in einem 19 mm weiten Glasrohr ermittelten Explosionsbereiche einiger Gase an.

¹²⁾ „The electric ignition of gaseous mixtures“ proceedings of the Royal Society A, vol. 90, 1914. Siehe auch Morgan: „Notes on the ignition of explosive gas mixtures“. The Journal of the Institution of Electrical Engineers, Vol. 54, 1916.

¹³⁾ Habilitationsschrift „Untersuchungen über die Explosionsgrenzen brennbarer Gase und Dämpfe“, München 1902, R. Oldenbourg.

Explosionsgrenzen verschiedener Gase und Dämpfe.
(Gase feucht gemessen.)

Gas	Untere Grenze Vol. %	Obere Grenze Vol. %
Wasserstoff	9,5	66,4
Aethylen	4,1	14,6
Methan	6,1	12,8
Acetylen	3,4	52,3
Kohlenoxyd	16,5	75,0
Leuchtgas	7,9	19,1
Wassergas	12,4	66,8
Benzin	2,4	4,9

Die Untersuchung dieser Verhältnisse für die Oelschaltergase bot ausserordentliches Interesse, weil damit Anhaltspunkte für Anordnungen zu gewinnen waren, die die Entstehung der Schalterexplosion überhaupt vermeiden. Die diesbezüglichen Versuche führten wir am kleinen Versuchsschalter durch, wobei die exakte Bestimmung der Explosionsgrenzen in der Eidg. Prüfungsanstalt für Brennstoffe durch Dr. Schlaepfer vorgenommen wurde.

Bei der Prüfung des Explosionsbereichs im Mischungsraum eines Oelschalters muss scharf unterschieden werden, welcher Art die Zusammensetzung des Gasgemisches ist. Handelt es sich um den *normalen Abschaltvorgang*, bei dem das Gas in Form einer oder mehrerer Blasen, durch das Oel gekühlt nach dem Mischungsraum aufsteigt, so enthält dieses nach dem Befund der Analysen (siehe Seite 232) weder Oeldämpfe noch andere dampfförmige Kohlenwasserstoffe. Die Zusammensetzung der Gase ist Seite 233 u. fg. angegeben und nachfolgend wiederholt. Die Ermittlung der Explosionsgrenzen für solche reinen Schaltergase erfolgte unter ähnlichen Versuchsbedingungen wie bei Eitner (siehe oben). Zugleich ist das spezifische Gewicht bestimmt worden. Die Resultate sind nachfolgend zusammengestellt.

Reine Schaltergase aus den Versuchsschaltern.

Zusammensetzung und Explosionsgrenzen.

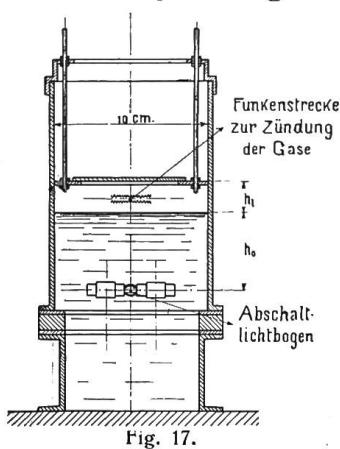
Herkunft des Gases	Zusammensetzung			Spez. Gewicht Luft = 1	Explosionsgrenzen	
	Wasser- stoff Vol. %	Methan Vol. %	Schwere Kohlen- wasserstoffe Vol. %		untere Vol. %	obere Vol. %
Oel C: Schalter Beznau . . . Gas ist lufthaltig	77,3	18,9	3,8	0,148	10	31
Oel B: Probe No. 2 . . .	61,2	7,2	31,6	—	10	43
Oel B: Probe No. 3 . . .	67,6	4,2	28,2	—	8	41
Oel B: Probe No. 4 . . .	67,4	4,9	27,7	—	8	38
Oel B: Probe No. 5 . . .	69,6	3,9	26,5	0,288	8	38
Oel B: Probe No. 6 . . . (Wechselstromabschaltung)	57,4	5,3	37,3	0,382	—	—

Aus diesen Zahlen folgt zunächst, dass die Schaltergase um so leichter werden, je wasserstoffreicher sie sind. Damit wächst zugleich ihre Gefährlichkeit, weil mit zunehmendem Wasserstoffgehalt das Explosionsbereich wächst. Dies folgt aus der Vergleichung obiger Zahlen mit den von Eitner bestimmten Grenzen für reinen Wasserstoff. Die untere Explosionsgrenze der Schaltergase wird durch die Zunahme des Methan- oder Aethylengehaltes allerdings herabgedrückt. Es ist also möglich, dass sich solche Gase in viel Luft leichter entzünden als reiner Wasserstoff.

Wurden die untersuchten Gasproben längere Zeit über Wasser aufbewahrt, so löste sich darin ziemlich viel Aethylen, was zur Folge hatte, dass die obere Explosionsgrenze bis auf 48 % hinaufstieg.

Die angeführten, experimentell ermittelten Zahlen bestätigen die Vermutung, dass die reinen Schaltergase recht weite Explosionsgrenzen besitzen; das Explosionsbereich eines reinen Schaltergases ist z. B. doppelt so gross, wie dasjenige von Leuchtgas.

Wie oben angegeben, zeigte sich auch bei der Mischung von Schaltergasen mit Luft eine Abhängigkeit der Intensität der Verbrennung (Explosion) vom Mischungsverhältnis. In unmittelbarer Nähe der unteren Grenze geht bei elektrischer Zündung die Verbrennung relativ langsam vor sich in Form einer schwachen Verpuffung. Bei Steigerung des Gasgehalts nimmt die Intensität der Verbrennung rasch zu und behält bis hart an die obere Grenze ihren explosionsartigen Charakter. Interessant ist die scharfe Ausprägung der oberen Grenze; wenige Vol. % des Gases darüber hinaus lassen überhaupt keine Verbrennung mehr zu. In den meisten Fällen ist indessen in einem explosiven Gasgemenge bei der oberen Explosionsgrenze nicht mehr genügend Luft vorhanden, um alle brennbaren Gase vollständig zu verbrennen. Ein Volumen reines Schaltergas vom Oel C (Beznau-Versuche) bedarf zur vollständigen Verbrennung z. B. 0,68 Volumen Sauerstoff, ein Volumen des reinen Schaltergases Oel B, Probe No. 6 sogar 1,51 Volumen Sauerstoff. Finden also explosionsartige Verbrennungen in solchen Gasgemischen statt, so werden die Verbrennungsprodukte nicht nur aus Kohlensäure und Wasser, sondern auch noch aus brennbaren Gasbestandteilen, eventuell sogar auch aus Kohlenstoff bestehen. Diese Verbrennungsprodukte können sich mit neu entstehenden Schaltergasen mischen, so dass Gasgemische mit andern Explosionsgrenzen im Mischungsraum auftreten. Dies wird immer der Fall sein, wenn die Gase nicht leicht abziehen können. Das Explosionsbereich wird durch Kohlensäure und Wasserdampf verengert.



Gelangt das Gas *bei abnormaler Abschaltung* durch das Kamin in den Mischungsraum, so hat es keine Gelegenheit zur Abkühlung und Kondensation der mitgerissenen Oeldämpfe. Der Mischungsraum ist daher neben dem reinen Gas teilweise auch mit Oeldämpfen und zerstäubtem Kohlenstoff angefüllt, welche Beimengungen, mit Luft gemischt, wie bekannt, selbst explosive Gemische bilden. Dadurch muss offenbar eine Verschiebung der angegebenen Explosionsgrenzen eintreten. Es hält äusserst schwer, das Volumen der durch das Kamin aufsteigenden Gase und Oeldämpfe zu ermitteln, zumal die Menge des Oeldampfes sehr von Zufälligkeiten der Kaminbildung abhängt. Aus diesem Grunde konnte bis jetzt auch noch nicht die exakte Bestimmung der Explosionsgrenzen solcher Gemische vorgenommen werden. Wir haben wiederum vorläufige Beobachtungen am kleinen Versuchsschalter angestellt; die Resultate sollen gelegentlich durch exakte Messungen nachgeprüft werden. Die Versuchsanordnung ist durch Fig. 17 erläutert. Obschon bei diesen Versuchen nur gelegentlich bei der höchsten Abschaltleistung Kaminbildung eintrat, war doch der Mischungsraum stets mit Oeldämpfen und zerstäubtem Kohlenstoff angefüllt, weil die geringe Oelhöhe von 50 mm und die hohe Oeltemperatur (ca. 100°) keine nennenswerte Kondensation beim Aufsteigen der Gase zuliess. Man darf annehmen, dass im praktischen Betrieb die durch das Kamin aufsteigende Mischung keine wesentlich andere Zu-

schuss schalter angestellt; die Resultate sollen gelegentlich durch exakte Messungen nachgeprüft werden. Die Versuchsanordnung ist durch Fig. 17 erläutert. Obschon bei diesen Versuchen nur gelegentlich bei der höchsten Abschaltleistung Kaminbildung eintrat, war doch der Mischungsraum stets mit Oeldämpfen und zerstäubtem Kohlenstoff angefüllt, weil die geringe Oelhöhe von 50 mm und die hohe Oeltemperatur (ca. 100°) keine nennenswerte Kondensation beim Aufsteigen der Gase zuliess. Man darf annehmen, dass im praktischen Betrieb die durch das Kamin aufsteigende Mischung keine wesentlich andere Zu-

sammensetzung aufweist. Die Gasmessungen erfolgten je nach durchgeföhrter Versuchsserie am gleichen Apparat durch Auffangen der Gase über Oel. Die Oelschicht war hiebei so hoch, dass weder Oeldämpfe noch zerstäubter Kohlenstoff mitgemessen wurden. Die in der folgenden Tabelle angegebenen Werte beziehen sich daher auf das reine Gas *ohne* die besagten Beimengungen. Die Angaben sind auf 1 kg/cm² und 100° C, mit welcher Temperatur die Mischung bei den Versuchen vorsichging, umgerechnet worden.

Explosionsbereich von Schaltergas bei Kaminbildung. Beimengung von Oeldämpfen und zerstäubtem Kohlenstoff.

No.	I_0 Amp.	V Volt	$I_0 E$ kW	Reines Gas Vol. cm ³	Mischungs- verhältnis %	Beobachtung der Verbrennung, eingeleitet durch Funkenzündung „unter dem Schalterdeckel“.
1. Serie: Oelhöhe $h_0 = 50$ mm. Luftsäule $h_1 = 11$ mm. Luftvol. = 84,5 cm ³ .						
1	18,5	270	5,0	0,69	0,82	mittelstarke Entflammung der Gase, Deckel wird gelüftet.
2	25,0	270	6,7	0,75	0,89	Stärkere Entflammung, dumpfer Knall, Deckel wird abgehoben.
3	35,0	268	9,5	1,06	1,25	Sehr rasche Verbrennung, heller Knall, Deckel wird abgehoben.
4	45,0	267	12,1	1,28	1,52	do.
5	55,0	265	14,6	1,63	1,93	Eigentliche Explosion mit lautem Knall, Deckel wird emporgesleudert.
6	65,0	263	17,6	2,00	2,37	Eigentliche Explosion wie unter 5.
7	75,0	261	20,4	2,25	2,66	Rasche Verbrennung mit hellem Knall, Deckel wird abgehoben.
8	84,0	259	22,8	2,56	3,04	Mittelstarke Verbrennung mit dumpfem Knall.
9	95,0	257	25,8	2,94	3,48	Schwache Verbrennung, Deckel bleibt fest.
10	110,0	255	30,0	3,38	4,00	Keine Entflammung mehr.
2. Serie: Oelhöhe $h_0 = 50$ mm. Luftsäule $h_1 = 20$ mm. Luftvol. = 154 cm ³ .						
1	20	270	5,4	0,62	0,40	Schwache Verbrennung.
2	40	266	10,8	1,25	0,82	Stärkere Verbrennung als unter 1, Deckel noch festliegend.
3	70	263	19,1	2,13	1,39	Starke Entflammung, dumpfer Knall, Deckel wird abgehoben.
4	80	260	21,8	2,47	1,61	Eigentliche Explosion mit hellem Knall.
5	90	259	24,5	2,75	1,8	do.
6	100	256	27,0	3,00	1,95	Mittelstarke Verbrennung mit dumpfem Knall.
7	110	255	30,0	3,38	2,2	Keine Entflammung mehr.

Wenn wir das Mischungsverhältnis beziehen auf den Anteil des reinen Gases allein an der totalen Mischung unter dem Schalterdeckel, so zeigen diese vorläufigen Versuche, dass bei Kaminbildung, wo das Gas auch Oeldämpfe und zerstäubten Kohlenstoff mitführt, die Verbrennung schon bei bedeutend tieferer Grenze eintritt; diese liegt nach den vorgängigen Versuchen etwas unter 0,4% Volumanteil des reinen Gases. Die obere Explosionsgrenze ergab sich zu 2% bzw. 4% bei der II. Versuchsserie. Die Unstimmigkeit dieser Grenzen zwischen beiden Serien ist wohl darauf zurückzuführen, dass im zweiten

Fall des doppelt so grossen Mischungsraumes die Mischung nur eine unvollkommene war, indem das Gasgemisch in unmittelbarer Nähe der Funkenstrecke, welche in der Mitte des Gaszylinders lag; rascher mit dem aufsteigenden Gas gesättigt war, als die an der Peripherie liegenden Raumteile. In einem kleineren Mischungsraum ist die Ausgleichung eher erreicht. Die maximale Intensität der Verbrennung und Druckäusserung liegt zwischen 1,5% und 2% Volumanteil des reinen Gases. Wenn diese vorläufigen Versuche auch noch kein exaktes Resultat zu liefern vermögen, folgt doch daraus, dass *bei Schalterexplosionen zwei getrennte Explosionsbereiche, bezogen auf den Volumanteil des reinen Gases, in Frage kommen, je nachdem das Gasluftgemisch unter dem Schalterdeckel infolge Kaminbildung Oeldämpfe und zerstäubten Kohlenstoff enthält oder nur ein Gemisch des reinen Gases mit Luft darstellt. Im ersten Fall ist schon bei weniger als 1/2 % reinem Gas Selbstzündung zu erwarten, während im zweiten Fall bis zu rund 40 % Volumanteil des Gases noch eine explosionsartige Verbrennung möglich ist.*

Soll daher durch geeignete Dimensionierung des Mischungsraumes mit Sicherheit die Verbrennung des Gemisches, sei es durch Eigenzündung im Kamin oder durch fremde Zündung oberhalb des Oelspiegels, verhindert werden, so muss ersterer so gross sein, dass der Volumanteil des bei Kaminbildung aufsteigenden reinen Gases weniger als 1/2 % erreicht, oder so klein, dass er 40% übersteigt. Auf die obere Grenze des Gemisches mit Oeldämpfen abzustellen, (2% \div 4%), oder auf die untere des reinen Gasluftgemisches (10%) wäre nicht zulässig, weil praktisch alle möglichen Mischungsverhältnisse, z. B. infolge mehrfacher Abschaltung, denkbar sind; diese werden durch die beiden extremen Grenzen umfasst. Die hieraus zu folgernden Gesichtspunkte für die Konstruktion des Oelschalters werden im folgenden III. Teil des Berichtes über die Untersuchung konstruktiver Massnahmen erörtert.

III. Untersuchung konstruktiver Massnahmen zur Erhöhung der Betriebsicherheit des Oelschalters.

Die Bestrebungen des Konstrukteurs, dem Oelschalter auf konstruktivem Wege eine gesteigerte Betriebssicherheit zu verleihen, gehen nach zwei Richtungen hin. Eine Reihe von Massnahmen werden versucht und sind in Anwendung, die die möglichste Verkürzung der Lichtbogendauer bzw. der Schalterarbeit zum Zwecke haben. Hieher gehören die Steigerung der Schaltgeschwindigkeit und der Zahl der simultanen Unterbrechungen (Mehrfachunterbrechung), die Anordnung von Vorrichtungen zur Erzeugung einer künstlichen, die Lichtbogenausbildung störende Oelbewegung, sowie Versuche mit geschlossenen Druckschaltern oder Schaltern, bei denen sich der Lichtbogen in einer Druckkammer entwickelt. Eine grössere Zahl von Vorkehrungen hat andererseits die Unschädlichmachung der aus den beschriebenen Wärmewirkungen des Lichtbogens folgenden Druck- und Explosionserscheinungen zum Ziel. Die Durchsicht der Patentliteratur aus diesem Gebiete führt zu einer ausserordentlichen Mannigfaltigkeit der Vorschläge. Wir beschränken uns auf das Prinzipielle, wonach sich etwa folgende grundsätzliche Anordnungen ergeben: 1. Einrichtungen zur Vertreibung der Luft unter dem Schalterdeckel, um die Möglichkeit einer Verbrennung der Gase und Dämpfe innerhalb des Schalters überhaupt zu vermeiden. Hieher gehört vor allem die Verwendung der sog. unverbrennlichen Schalteröle, die beim Abschaltprozess ein Gas erzeugen, das zu keinem explosiven bzw. brennbaren Gasgemisch mit Luft führt. Dem gleichen Zweck dienen Vorschläge für Konstruktionen, bei denen unter den Schalterdeckel ein neutrales Gas, wie Kohlensäure oder Stickstoff, geführt werden soll. 2. Vorkehrungen zur Kühlung der Gase und Dämpfe, die bei Kaminbildung unmittelbar in den Mischungsraum aufsteigen, unter die Selbstentzündungstemperatur. 3. Die Anordnung eines „ungefährlichen Mischungsraums“ für die Schaltergase und Dämpfe, der die Ausbildung eines explosiven bzw. brennbaren Gasluftgemisches verhindert. 4. Die Verwendung eines druckfesten Oelschalters, der auch bei der höchsten, ihm zugemessenen Abschaltleistung den möglichen Beanspruchungen standhalten kann.

Wir haben das prinzipielle Verhalten aller dieser Anordnungen an unseren Versuchsschaltern untersucht und können hierüber was folgt berichten.

1. Die Steigerung der Schaltgeschwindigkeit.

Ueber den Einfluss der Schaltgeschwindigkeit ist im Ersten Bericht der Kommission¹⁴⁾ ausführlich geschrieben worden. Aus den Versuchen ergab sich, dass die Lichtbogenlänge für ein und dieselbe zu unterbrechende Leistung mit der Schaltgeschwindigkeit etwas ansteigt, während sie nach unseren theoretischen Voraussetzungen unabhängig hievon sein sollte. Es wurden z. B. folgende Veränderungen der Lichtbogenlänge und Lichtbogendauer in einem kleinen Oelschalter der Maschinenfabrik Oerlikon aufgenommen (alte, heute nicht mehr auf dem Markt stehende Type AO ag X 153 Form H).

Abschaltleistung 747 kW bei 8000 V, ohmsche Belastung.

Einpolige Unterbrechung, bei normaler Abschaltgeschwindigkeit ca. 80 cm/Sek. $s = 3,7$ cm (mittlere Versuchswerte).

Geschwindigkeit v		Bogenlänge s		Bogendauer t_e	
cm/Sek.	% der Normalen	cm	% der Normalen	Sek.	% der Normalen
16.5	20.6	3.4	92	0.210	456
20	25	3.4	92	0.170	370
28	35	3.4	92	0.122	263
40	50	3.4	92	0.085	185
60	75	3.5	94.6	0.058	126
80	100	3.7	100	0.046	100
100	125	4.05	109.5	0.041	89
120	150	4.55	121.5	0.039	84.8
140	175	5.25	142	0.028	80.5

Die Lichtbogendauer und damit die Schalterarbeit folgen daher nur angenähert der früher angegebenen Beziehung

$$A = \frac{J_o \cdot E \cdot c \cdot s}{v}$$

wobei s die für die gegebene zu unterbrechende Leistung $J_o \cdot E$ sich einstellende mittlere Lichtbogenlänge bedeutet und c ein Mass des mittleren Lichtbogeneffekts. Aus dem hyperbolischen Zusammenhang folgt, dass die Schalterarbeit mit wachsender Schaltgeschwindigkeit im Bereich kleiner Geschwindigkeiten rasch abnimmt, um bei grösseren Werten nur noch um kleine Beträge zurückzugehen. Man kann so für einen Schalter eine Schar von (Geschwindigkeit — Schalterarbeit) — Kurven aufstellen, wobei jeder zu unterbrechenden Leistung bzw. Bogenlänge eine Hyperbel zugeordnet ist. Bei den untersuchten Schaltertypen liegen die gemessenen Werte der Lichtbogendauer bei normalen Schaltgeschwindigkeiten für Leistungen bis zu einigen 1000 kVA bereits auf dem flachen Ast der Kurve, sodass sich durch eine weitere Steigerung der Geschwindigkeit für diese Leistungen nur wenig mehr gewinnen lässt. Für sehr grosse Kurzschlussleistungen wird aber in diesem Bereich der Schaltgeschwindigkeit die Schalterarbeit noch auf der stärkeren Krümmung der Kurve liegen. *Es ist daher zu erwarten, dass für grosse Kurzschlussleistungen eine weitere Steigerung der Geschwindigkeit über die heute gebräuchlichen Werte hinaus doch noch eine Verkleinerung der Schalterarbeit zur Folge habe.* Wir konnten in unseren Versuchen diese Frage nicht näher untersuchen, indessen folgt aus den von der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft Berlin¹⁵⁾ vorgenommen Kurzschlussversuchen mit grosser Leistung an Oelschaltern eine Bestätigung dieser Vermutung. Es wurde u. a. die Verwendung sog. Schnellkontakte untersucht, welche als Stifte von geringem Durchmesser ausgebildet und daher der Oeldämpfung wenig ausgesetzt, federnd an der Traverse befestigt sind und durch Reibung während des grössten Teils der

¹⁴⁾ Bulletin 1915, Seite 194.

¹⁵⁾ Siehe Aufsatz von Dr. Georg Stern und J. Biermanns in E. T. Z. 1916, Seite 635 und fg.

Ausschaltbewegung in ihrer Einschaltstellung gehalten werden. Die Ausschaltung geschieht unter Wirkung der Feder erst gegen den Schluss der Schaltbewegung, wobei eine bedeutende Ausschaltgeschwindigkeit dieser Kontakte erzielt wird. Aus dem erwähnten Bericht über die Versuche folgt, dass damit eine bemerkenswerte Verringerung der Lichtbogendauer zu erreichen ist. Doch fanden die Beobachter ebenfalls, dass die Erhöhung der Ausschaltgeschwindigkeit allein die Schalterbeanspruchung nicht immer weiter zu steigern gestattet. Die Verwendung sog. Löschkammern ergab noch eine ausgiebigere Verringerung der Lichtbogendauer; wir kommen im Nachfolgenden hierauf zurück.

2. Die mehrfache Unterbrechung.

Die Verhältnisse bei mehrfachen, hintereinander liegenden Lichtbogenstrecken sind ebenfalls schon im I. Teil der Versuche behandelt worden.¹⁶⁾ Die Resultate zeigen, dass durch die Unterteilung des Lichtbogens sowohl die Lichtbogendauer als auch die Konstante c , die ein Mass des mittleren Lichtbogeneffekts ergibt, gegenüber der einfachen Unterbrechung bedeutend verringert werden. Aus den zahlenmässigen Ergebnissen ist nachfolgend ein Beispiel angeführt.

Abschaltung 740 kW bei 8000 V, ohmsche Belastung

$v = 55 \text{ cm/Sek.}$ bei einfacher Unterbrechung $t_e = 0,048 \text{ Sek.}$

Zahl der Unterbrechungen	Lichtbogendauer t_e	Konstante c	Totale Schalterarbeit $A = J_0 \cdot E \cdot c \cdot t_e$	
			in kW Sek.	in % der Normalen
1	0.048	0.026	1.095	100
2	0.034	0.020	0.596	54.5
3	0.030	0.015	0.394	36.0
4	0.027	0.011	0.257	23.5
6	0.015	0.010	0.131	12.0

In diesem betrachteten Fall geht die totale Schalterarbeit (für alle Unterbrechungsstellen zusammen) nahezu umgekehrt proportional mit der Zahl der Unterbrechungen zurück. Andere Leistungen zeigten etwas andere Beziehungen, z. T. noch günstigere, z. T. weniger günstige. *In jedem Fall ergaben aber unsere Versuche, dass durch die Anwendung mehrfacher Unterbrechung eine Verringerung der Schalterarbeit erzielt werden kann.*

Es sei an dieser Stelle nochmals darauf verwiesen, dass damit zugleich eine grössere Sicherheit gegen Kaminbildung gewonnen ist, wie dies auf Seite 281 dieses Berichtes ausgeführt wurde.

3. Das vorzeitige Abreissen des Lichtbogens durch künstliche Oelbewegung.

Wir haben weiter oben gesagt, dass beim normalen Abschaltvorgang die auf die Gasosphäre wirkenden äusseren Kräfte (Auftrieb) diese im allgemeinen nicht eher vom Lichtbogen bzw. den lichtbogentragenden Kontaktteilen loszulösen vermögen, bis dieser aus den elektrischen Bedingungen im Stromkreis heraus erlischt. Indessen können bekanntlich magnetische oder rein mechanische „Gebläse“ ein vorzeitiges Abreissen des Bogens bewirken. Der erstere Weg kann für Wechselstromölschalter der damit verbundenen Komplizierung wegen kaum in Frage kommen; hingegen sind verschiedene Mittel angegeben worden, um durch künstliche Oelbewegung in der Nähe der Kontakte den Lichtbogen vorzeitig von diesem abzudrängen. Wesentlich ist hiebei die Erzielung einer genügend kräftigen Oelströmung mit ausgeprägter „Ausblaserichtung.“ Veränderliche unbestimmte Strömungsrichtungen können den gesuchten Vorteil ins Gegenteil umkehren, indem der ausser-

¹⁶⁾ Siehe Erster Bericht der Kommission, Bulletin 1915, Seite 196.

ordentlich bewegliche Lichtbogen leicht an unerwünschte Stellen überspringt, z. B. an die Kastenwand und dann stehen bleibt. Eine in dieser Beziehung sehr gute Lösung ist von der Firma *Sprecher & Schuh*, Aarau, ausgeführt worden. Der Oelstrom wird durch eine Art Pumpe erzeugt, deren Wirkungsweise ohne weiteres aus der Fig. a Tafel III zu ersehen ist. Der Einbau solcher Vorrichtungen ist konstruktiv meist gar nicht leicht; auch ist gewöhnlich eine relativ grosse Arbeit nötig, um einen kräftigen Oelstrom zu erzielen, welche auf Kosten der Ausschaltgeschwindigkeit geht. Wir haben an dem in Fig. a Tafel III dargestellten Apparat die Wirkung solcher Vorkehrungen untersucht. Die Ergebnisse sind in Fig. 18 in Kurvenform dargestellt. Der Einfluss der Oelbewegung folgt aus der Gegenüberstellung der gemessenen Lichtbogendauer für verschiedene Leistungen mit und ohne diese Vorrichtung für ein und dasselbe Kontaktpaar. (Die ganze Apparatur ist in den Carl Maier Schalter eingebaut worden.) Merkwürdigerweise ist die Wirkung für die angewendeten kleineren Abschaltleistungen praktisch ausgeblieben; erst für Werte von 500 kW an wird das vorzeitige Abreissen des Lichtbogens ersichtlich. Bei 700 \div 800 kW erreicht die Lichtbogendauer nur noch etwa 45% des Wertes, der sich ohne die Vorrichtung einstellt. Wir

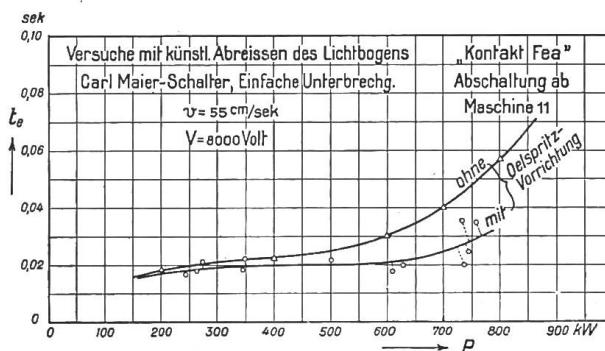


Fig. 18.

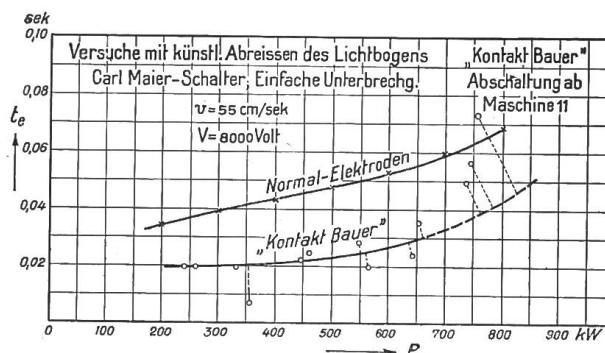


Fig. 20.

ten ferner, dass in vielen Fällen der Lichtbogen dem wobei er sich an benachbarte Metallteile ansetzte, sodass die Wirkung der Oelbewegung nur eine unvollständige blieb.

Um solchen Zufälligkeiten zu entgehen und die grösste Wirkung der bewegten Oelmasse auszunutzen, ist ein Kontakt nach der in Fig. 19 dargestellten Idee ausgeführt worden. Der bewegliche Piston erzeugt beim Ausschalten im ruhenden, als Zylinder ausgebildeten Kontaktstück ein Vakuum, sodass im Moment der Lichtbogenbildung ein kräftiger Oelstrom über die lichtbogentragenden Kontaktteile streicht, von dem wir uns nicht nur ein vorzeitiges Abreissen des Bogens, sondern auch eine kräftige Kühlung der Kontakte versprachen. In der Tat haben die Versuche ziemlich günstige Resultate hervorgebracht. Diese sind in Fig. 20 als Kurve aufgetragen. Als Vergleich sind Werte der Lichtbogendauer für die gleichen Abschaltbedingungen an der Normalelektrode gegenübergestellt, welche mit der besagten Ausführung, jedoch ohne Ventil, identisch ist. Das Bild lehrt, dass bis zu einer Leistung von etwa 650 kW eine Verringerung der Lichtbogendauer von 50% und mehr erreicht wurde;

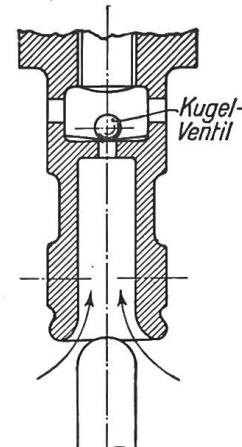


Fig. 19.

vermuten, dass bei der untersuchten Anordnung die volle Stärke der Oelbewegung etwas zu spät eintrat, sodass deren Wirkung für kleine Leistungen, die ohnehin nur eine kurze Lichtbogendauer zur Folge haben, nicht in Erscheinung treten konnte. Weitere Beobachtungen zeigen Oelstrom seitwärts ausgewichen ist, sodass die Wirkung der Oelbewegung nur eine unvollständige blieb.

für grössere Beanspruchungen scheint diese Probeausführung nicht mehr auszureichen, indem, wie ersichtlich, die Lichtbogendauer rasch auf die Werte der oberen Kurve steigt. Offenbar könnte durch eine Vergrösserung des Zylinders die Wirkung ausgedehnt werden.

Die praktische Ausgestaltung der angedeuteten Anordnung würde etwelche Schwierigkeiten bereiten. Wir wollten lediglich untersuchen, inwieweit eine Verringerung der Lichtbogendauer bzw. Schalterarbeit durch Oelbewegung und forzierte Kühlung der Elektroden überhaupt zu erzielen ist. Es war beabsichtigt, die Versuche auf diesem Weg noch weiter zu verfolgen, wobei die konzentrische Oelströmung über die lichtbogentragenden Kontaktteile nicht durch das Vakuum im Zylinder, sondern auf geeignete Weise durch Ueberdruck von aussen erzeugt werden sollte. Die hiefür konstruierte Versuchsanordnung sieht vor, das Kontaktpaar nach Fig. 19, jedoch ohne Ventil, in eine kleine Druckkammer einzuschliessen, in welcher der Druck durch die Gase selbst erzeugt wird; das herausgepresste Oel wird durch die Bohrung des zylindrischen Kontaktteiles abgeführt; sodass eine ähnliche Oelbewegung entsteht wie bei der untersuchten Anordnung. Eine kleine Rechnung zeigt, dass auf diese Weise bedeutend grössere Oelgeschwindigkeiten zu erzielen sind. Die Versuche gelangten nicht zur Ausführung, nachdem die vorzüglichen Ergebnisse mit den im zitierten Aufsatz von *Stern und Biermanns*¹⁷⁾ angegebenen Löschkammern, die die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft Berlin anwendete, bekannt geworden sind. Die Ausführung ist wie folgt beschrieben. Bei der üblichen Oelschalteranordnung mit nach unten ausschaltender Traverse sind um die feststehenden Kontakte zylindrische Kammern aus Metall angeordnet, die nach oben zu geschlossen sind, abgesehen von kleinen Löchern zur Kommunikation des Oels. Auf der untern Seite dieser Zylinder ist ein rundes Loch, das den stiftförmigen, beweglichen Kontakten den Ein- und Austritt gestattet, zwischen Stift und Lochwandung ist bei eingeschalteter Traverse geringes Spiel zugelassen. Bei Ausschaltung wird durch die Vergasung des dem Lichtbogen nahen Oels ein hoher Druck entstehen, da der fast vollkommene Abschluss der Kammern den Druckausgleich nach dem übrigen im Oelschalterkessel vorhandenen Oel verhindert. Diese Anordnung ist somit ähnlich der von uns zur Ausführung vorgesehenen. Nach den veröffentlichten Versuchsergebnissen zu schliessen, wird durch die beschriebene Vorkehrung eine ganz ausserordentliche Verkürzung der Lichtbogendauer erreicht. Es wird angegeben, dass für einphasig unterbrochene Kurzschlussleitungen bis zu 150 000 kVA bei 7500 V Leerlaufspannung die Lichtbogendauer 0,01 Sek. nicht überschritt.

Die Autoren erblicken die Ursache des vorzeitigen Abreissens des Bogens im hohen Gasdruck in der Löschkammer, indem sie sich offenbar auf die Tatsache berufen, dass der Lichtbogen in unter Druck stehenden Gasen für die gegebene Spannung und Stromstärke eine geringere Länge erreicht, als im offenen Raum.¹⁸⁾ Nach unseren Erfahrungen mit dem Druckölschalter, über die nachfolgend berichtet ist, können wir uns dieser Erklärung nicht anschliessen. Wir sehen vielmehr die Ursache des vorzeitigen Abreissens des Lichtbogens in der ausserordentlich intensiven Oelbewegung in der kleinen Löschkammer und der damit zusammenhängenden Störung der Gassphäre und Kühlung der Elektroden.

Wenn wir auch diese neuesten sehr günstigen Ergebnisse nicht der künstlichen Oelbewegung zugute schreiben wollten, so folgte schon aus unseren eigenen Versuchen, dass auf diesem Weg bei geeigneten Anordnungen und bester Ausnützung der Oelbewegung eine praktisch doch ins Gewicht fallende Verkürzung der Lichtbogendauer bzw. Schalterarbeit erreicht werden kann.

4. Der Abschaltvorgang im Druckölschalter.

Das Verhalten des Lichtbogens in einem unter erhöhtem Druck stehenden Gas ist schon mehrfach untersucht worden. So hat z. B. *Monasch*¹⁹⁾ verschiedene Resultate zusammen-

¹⁷⁾ Siehe E. T. Z. 1916, Seite 635 und fg.

¹⁸⁾ Die Autoren schreiben wörtlich: „Die Tatsache, dass der Lichtbogen im unter Druck stehenden Oel schneller abreisst ist bekannt“. Unseres Wissens sind solche Versuche bis heute noch nicht veröffentlicht worden. Nachdem unsere Untersuchungen hierüber gerade die gegenteilige Wirkung zeigten, wäre es sehr interessant zu vernehmen, auf welche Erfahrungen sich die Autoren stützen.

¹⁹⁾ *Monasch*, der elektrische Lichtbogen bei Gleichstrom und Wechselstrom. Jul. Springer, Berlin 1904.

gestellt, aus denen hervorgeht, dass zur Haltung eines Lichtbogens bestimmter Länge und Stromstärke eine um so höhere Spannung erforderlich ist, je höher der Druck des Gases, indem der Lichtbogen brennt, ansteigt. Diese von Monasch bearbeiteten Versuche sind durchwegs an Niederspannungslichtbogen kleiner Leistung, wie sie etwa für Bogenlicht in Frage kommen, durchgeführt worden. Die Bogen brannten in Luft. Aus dem geschilderten Verhalten heraus folgt, dass der Abschaltlichtbogen für die herangezogenen Leistungen und Spannungen ein umso kleineres Existenzbereich aufweisen muss, je höher der Gasdruck eingestellt wird. Direkte Messungen hierüber sind nicht vorliegend. Immerhin liesse sich aus solchen Versuchen heraus der Schluss ziehen, dass auch der Abschaltlichtbogen im Druckkreis eine mit dem Druck anwachsende Verringerung seiner Länge erfahren werde. Ob sich hiebei das geschilderte Verhalten auch für die praktisch in Frage kommenden Leistungen und Spannungen wiederholt, kann nicht vorausgesagt werden. Zur Prüfung dieser Beziehungen sind daher mit dem eingangs beschriebenen Druckschalter eingehende Versuche vorgenommen worden. Wir verwendeten einphasige Abschaltleistungen bis 1000 kW mit ohmscher Belastung der Maschine No. 11 in der Beznau bei einer Leerlaufspannung von rund 8000 V. Der Verlauf von Strom und Schalterspannung ist, wie früher beschrieben, oscillographisch aufgenommen worden. Zur Messung des statischen Drucks im Kessel diente ein Präzisionsmanometer; der Druckverlauf wurde für einige Versuche, wie eingangs angegeben, durch das elektrische Manometer registriert. Die einzelnen Versuchsserien wurden meistens mehrfach durchgeführt, um möglichst einwandfreie Mittelwerte zu gewinnen.

Unsere Versuchsergebnisse führten nun zu der überraschenden Tatsache, dass die Lichtbogenlänge bei gegebenen elektrischen Bedingungen im Stromkreis mit ansteigendem Druck allerdings einem Minimum zustrebt, dieses aber schon für geringe Ueberdrücke über die Atmosphäre erreicht, um bei weiterer Drucksteigung wieder grössere Werte zu erlangen, die umso rascher ansteigen, je grösser die Abschaltleistung gewählt wird. In Fig. 21 sind einige Messungen zusammengestellt. Aus dem Verlauf der drei Kurven könnte vermutet werden, dass das Minimum umso weniger ausgeprägt wird, je kleiner die Abschaltleistung ist, derart, dass vielleicht für sehr kleine Leistungen der aufsteigende Ast überhaupt nicht mehr in die Erscheinung tritt oder dann erst bei sehr hohen Drücken. Damit würden sich unsere Resultate ohne Widerspruch an die oben erwähnten Erscheinungen an Lichtbogen sehr kleiner Leistung anschliessen. Wir haben die Frage nach dieser Richtung nicht weiter verfolgt; eine weitere Erforschung dieser Verhältnisse wäre aber ausserordentlich interessant. Der geschilderte Zusammenhang zwischen Druck und Lichtbogendauer wiederholt sich im Verlauf der mittleren Lichtbogenleistung, für die bekanntlich die Konstante c ein Mass darstellt. Diese Grösse weist in Funktion des Drucks ebenfalls ein Minimum auf, wenn auch nur schwach ausgeprägt, um so mehr tritt der aufsteigende Ast hervor. Wir haben die oscillographisch ermittelten Werte dieser Grösse für 700 kW Abschaltleistung in Fig. 22 eingetragen.

Demgemäß muss daher die Schalterarbeit $A = J_e \cdot E \cdot c \cdot t_e$, die die Wärmeentwicklung im Oelschalter bestimmt, bei veränderlichem Druck einen ähnlichen Verlauf aufweisen. Wir haben diesen auf Grund des experimentell ermittelten c - und t_e -Kurven berechnet und in Fig. 22 rechts für 700 kW Abschaltleistung angegeben. Daraus folgt nun die bemerkenswerte Tatsache, dass die Schalterarbeit schon für geringe Ueberdrücke rasch über den bei Atmosphärendruck sich einstellenden Betrag ansteigt. So ist für die betrachtete Leistung

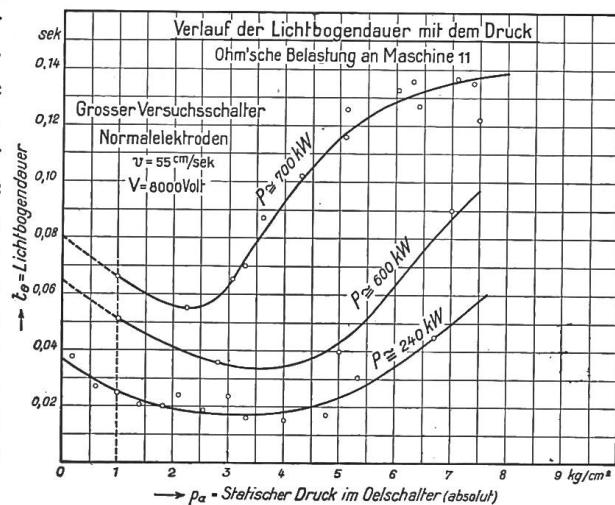


Fig. 21.

die Schalterarbeit bei 3 kg/cm^2 Ueberdruck bereits 3-mal, bei 5 kg/cm^2 schon 7,5-mal grösser. Die damit zusammenhängende Steigerung der Wärmeentwicklung des Lichtbogens trat auch rein äusserlich zu Tage, einmal in einer stets gesteigerten schlagartigen Erschütterung des ganzen Apparates bei der Abschaltung, dann aber besonders auffällig in der ganz ausserordentlichen Kohlenstoffausscheidung im Oel. Die Füllung ist jeweilen schon nach wenigen Versuchsserien unbrauchbar geworden.

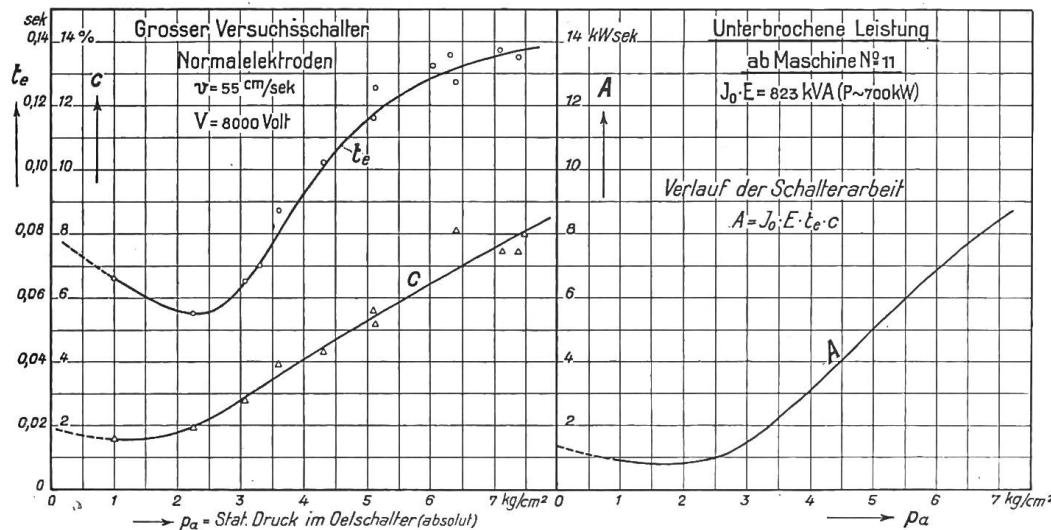


Fig. 22.
Verlauf von Lichtbogendauer, Lichtbogeneffekt und Schalterarbeit mit dem Druck im Oelschalter.

Ueber die bei den Versuchen mit höherem Druck konstatierten *zusätzlichen Druckstöße* haben wir schon auf Seite 276 und fg. berichtet. Wir beobachteten, dass diese ihrerseits wieder auf die Lichtbogenausbildung rückwirkt, indem in jenen Fällen, wo sich ein besonders hoher Druckstoss einstellte, auch die Lichtbogenlänge einen ausserordentlichen, aus obiger Kurve herausfallenden Wert erreichte. Diese Erscheinung trat besonders bei grossem Gasvolumen im Kessel auf. So kann sich bei mehrfachen hintereinanderfolgenden Abschaltungen rasch eine gefährliche gegenseitige Steigerung von Druck und Schalterarbeit einstellen.

Diese Resultate dürften genügen, um im Druckölschalter keine die Betriebssicherheit erhöhende Anordnung, sondern vielmehr einen gefährlichen Apparat zu erkennen, der geeignet ist, gerade jene Erscheinungen hervortreten zu lassen, die wir zum Zweck bester Betriebssicherheit bekämpfen.

* * *

Wir haben damit die grundsätzlichen konstruktiven Vorkehrungen genannt, welche die möglichste Verminderung der Schalterarbeit anstreben und wie sie für heutige Oelschalter in Frage kommen. Wir untersuchten hiebei nur die prinzipielle Wirkung der einzelnen Massnahmen, ohne die Frage zu prüfen, inwieweit im praktischen Fall der erzielte Erfolg die Vorkehrung rechtfertige. Von diesem Standpunkt aus betrachtet verlieren für die marktgängigen Oelschaltertypen mittlerer Leistung und Spannung die genannten Massnahmen meist etwas an Bedeutung. Ihre Wirkung ist eben im allgemeinen nicht von durchschlagendem Erfolg, wenn die Vorkehrung in ihrer Anwendung nicht sehr weit getrieben wird; diesem aber steht meist die Preisfrage im Wege. Es ist daher erklärlich, wenn viele Konstrukteure ihr Augenmerk auf den möglichst unschädlichen Verlauf der *thermodynamischen* Erscheinungen richten und die Ausbildung eines mehr oder weniger grossen Abschaltlichtbogens als vorläufig unvermeidlich zur Voraussetzung nehmen. Wir berichten im Folgenden über unsere Versuche und Erfahrungen an einigen hieher gehörenden Schutzmassnahmen.

*5. Die Verwendung neutraler Gase unter dem Schalterdeckel.
Unverbrennliche Schalteröle.*

Die Natur der Schaltergase und Oeldämpfe bedarf zur Verbrennung im Schalter der Anwesenheit der Luft. Eine der primitivsten, wenn auch durchaus nicht einfachsten Vorkehrungen zur Verhütung der Entzündung der Gase besteht daher in der Ersetzung der Luft unter dem Schalterdeckel durch ein neutrales Gas, etwa durch Stickstoff oder Kohlensäure. Solche Anordnungen sind von verschiedener Seite empfohlen und in Erwägung gezogen, zum kleineren Teil auch ausgeführt worden. Sie bestehen meist in der selbsttätigen Anfüllung des Mischungsraums durch das neutrale Gas von einem geeigneten Gasbehälter aus. Für den Abzug der Schaltergase sind besondere Vorkehrungen nötig. Ihre Wirksamkeit steht, richtiges Funktionieren vorausgesetzt, ausser Zweifel, hingegen kann man sich mit der damit verbundenen Komplizierung des Apparates und der gesamten Anlage nur schwer befrieden.

Es war daher ein guter Gedanke, dem Oel Beimischflüssigkeiten beizumengen, die solche, die Verbrennung verunmöglichen Gase oder Dämpfe gleich beim Abschaltvorgang mit entstehen lassen. Es sind in letzter Zeit mehrere solcher, unter dem Namen „unverbrennliche Schalteröle“ bekannten Oelmischungen auf den Markt gekommen. Die sog. unverbrennlichen Oele stellen Mineralöle mit Zusätzen von gechlorten Kohlenwasserstoffen dar. Diese sind nämlich in den Mineralölen leicht löslich. Infolge ihrer Dünngflüssigkeit drücken sie die Viskosität der Mineralöle stark herab. Die Chlorkohlenwasserstoffe brennen an der Luft nicht und können deshalb als Feuerlöschenmittel verwendet werden. Ihr Siedepunkt liegt verhältnismässig tief; Tetrachlorkohlenstoff siedet z. B. bei 78° C. Sie haben deshalb eine viel grössere Verdunstungsfähigkeit als die eigentlichen Schalteröle und es ist darum zu erwarten, dass sie in offenen Schaltern nach und nach verdunsten und die Mineralöle zurücklassen. Sie sind spezifisch schwerer als Wasser; der Grad ihrer Verdunstung kann also bei den Mineralölen, die leichter als Wasser sind, leicht durch das Zurückgehen des spezifischen Gewichtes solcher Mischungen festgestellt werden. Wir haben das Verhalten solcher Oele, im besonderen die Marke „Securol“, von der uns vom Erfinder Dr. Grossmann grössere Mengen freundlichst zur Verfügung gestellt wurden, eingehend untersucht. Das Oel ist in einigen unserer schweizerischen Anlagen schon seit mehreren Jahren in Verwendung, wobei bei aufgetretenen Störungen der beabsichtigte Zweck nach Angaben der betreffenden Betriebsleitungen durchaus erreicht wurde. Ueber das Resultat unserer eigenen Untersuchungen ist folgendes zu berichten.

Die andern Orts gemachten Versuche und die Erfahrungen der Praxis können wir dahin bestätigen, dass auch bei schwerster Beanspruchung des Schalters mit ausgesprochener Kaminbildung keine Verbrennungerscheinungen unter dem Schalterdeckel auftraten, auch nicht bei künstlicher Zündung durch den elektrischen Funken. Die behandelte Oelprobe hielt diese schützende Wirkung auch über eine grössere Anzahl (bis etwa 100) direkt aufeinanderfolgenden Abschaltungen bei. Als Begleiterscheinung zeigte sich eine ausserordentlich gesteigerte Kohlenstoffabscheidung im Oel, ein Teil hiervon stieg beim Abschalten in dichten Wolken auf, was rasch zu starker Verschmutzung des Apparates führte. Charakteristisch ist beim Abschalten die reichliche Produktion stechend riechender, nämlich chlorwasserstoffhaltiger Gase, die schon nach wenigen Versuchsserien zu zerstörenden Wirkungen an den Metallteilen der Apparatur führten. Die elektrischen Verhältnisse der Lichtbogenbildung sind nach unseren Messungen von denen unter Verwendung normaler Mineralöle nicht wesentlich verschieden.

Die Erklärung dieser Erscheinungen liefert die *Analyse des Oels und der Schaltergase*. Wir zitieren z. T. aus dem Bericht der Eidg. Prüfungsanstalt für Brennstoffe was folgt.

Das untersuchte Oel, Bezeichnung „Securol“, war gelblich-braun und dünnflüssig; es roch nach Tetrachlorkohlenstoff. Bei der Vornahme der Versuche betrug das spezifische Gewicht des verwendeten Oels 1,000. Eine Probe des gleichen Oeles, die einige Monate später vorgenommen wurde, hatte infolge der reichlichen Verdunstung, von der oben die Rede war, nur noch ein spez. Gewicht von 0,938. Es war fast reines Mineralöl zurück-

geblieben, denn beim Kochen dieser Oelprobe entwichen unter 100°C nur noch einige cm^3 einer wasserklaren, schweren, farblosen Flüssigkeit, die sich wie Tetrachlorkohlenstoff verhielt. *Beim Kochen bildeten sich reichliche Mengen von Salzsäure*; der Tetrachlorkohlenstoff wirkte also auf das Mineralöl ein.

Die beim Lichtbogendurchgang entstehenden Schaltergase riechen sehr stechend und geben mit Ammoniak starke Nebel von Chlorammonium; *sie sind also chlorwasserstoffhaltig*. Dagegen gelang es uns nicht, in diesen Gasen freies Chlor nachzuweisen. Durch den elektrischen Funken werden die Schaltergasluftmischungen in der Tat *nicht* entzündet.

Das gebrauchte Oel konnte durch sorgfältiges Filtrieren wieder geklärt werden; es blieb aber dunkelgefärbt. Die Jodzahl des Oels hatte durch die Abschaltungen nicht zugenommen. Sie betrug vor und nach den Versuchen 10,5. Es waren also keine ungesättigte Verbindungen neu entstanden.

Die quantitative Bestimmung des Chlorwasserstoffgehalts in den trockenen Schaltergasen geschah in der Weise, dass die Säuredämpfe mit titrierter (N: 10) Natronlauge in einer Gaspipe absorbiert wurden. Diese wurde mit destilliertem Wasser mehrmals sorgfältig ausgespült und der Ueberschuss der Lauge mit (N: 10) Säure zurücktitriert. Zur Kontrolle wurde in der titrierten Flüssigkeit das Chlor noch gewichtsanalytisch bestimmt. Die titrimetrisch und gravimetrisch gefundenen Werte stimmten vollkommen überein. Durch vergleichende Versuche wurde ferner festgestellt, dass Tetrachlorkohlenstoffdämpfe auf kalte Natronlauge nicht einwirken. Die gefundenen Chlormengen entsprechen also den vorhandenen Chlorwasserstoffmengen, denn freies Chlor war nicht vorhanden. Nach der Bestimmung der Salzsäure wurde das Gas in der üblichen Weise weiter analysiert. In nachstehender Zusammenstellung führen wir die Analysen zweier mit Stickstoff und Sauerstoff vermischten Schaltergasproben und der daraus berechneten Reingase an.

Schaltergase aus Oel, Marke „Securol“, von Dr. Grossmann.

Zusammensetzung	Probe a		Probe b	
	Rohgas	Reingas	Rohgas	Reingas
Chlorwasserstoff . . .	Vol. %/o	Vol. %/o	Vol. %/o	Vol. %/o
Chlorwasserstoff . . .	38,8	61,6	29,6	55,9
Wasserstoff	7,4	11,8	9,9	18,6
Methan	7,0	11,1	4,2	8,0
Schwere Kohlenwasserstoffe (Aethylen) . . .	9,8	15,5	9,3	17,5
Kohlensäure	Spuren	—	Spuren	—
Sauerstoff	1,9	—	2,8	—
Stickstoff	35,1	—	44,2	—
Totales Volumen . . .	100,0	100,0	100,0	100,0

Aus obigen Analysen ersieht man, dass die Schaltergase aus dem Oel, Marke „Securol“, fast zu $\frac{2}{3}$ aus Chlorwasserstoff bestehen. Der Chlorwasserstoff hat den Wasserstoff fast ganz ersetzt. Aethylen und Methan kommen ungefähr in gleicher Menge, wie bei den früher untersuchten Gasen vor.

Der chemische Vorgang beim Abschaltprozess wird wie folgt vor sich gehen.

Der Tetrachlorkohlenstoff wird durch den elektrischen Lichtbogen in Kohlenstoff und Chlor zerlegt: $\text{CCl}_4 \rightarrow \text{Cl}_2 + \text{C}$. Da in den Schaltergasen Chlor nicht nachgewiesen werden kann, sich dagegen viel *Chlorwasserstoff* (Salzsäure) vorfindet, muss sich das entstehende Chlor im status nascendi mit dem Wasserstoff, der bei der Oelzersetzung entsteht, verbunden haben: $\text{H} + \text{Cl} = \text{HCl}$. Bei diesen Oelen entsteht also Kohlenstoff aus dem Tetrachlorkohlenstoff *und* aus dem Oel; darum beobachtet man viel grössere Russwolken und eine stärkere Verschlammung des Oels. *Das entstehende Gas ist also sehr viel ärmer an Wasserstoff und enthält zugleich grosse Mengen von Chlorwasserstoff*. Dadurch kann bei Mischung mit Luft kein brennbares (explosibles) Gasgemisch entstehen. Das Gas ist zudem viel schwerer als die gewöhnlichen Schaltergase; das spezifische Gewicht ist ungefähr gleich demjenigen der Luft, sodass sich die Mischung nur langsam vollzieht.

Wenn das Oel Wasser enthält, so wird der Chlorwasserstoff von diesem gierig aufgenommen, unter Bildung von *wässriger Salzsäure*. Mit dieser Erscheinung ist im praktischen Oelschalterbetrieb immer zu rechnen. Da auch die Luft über dem Oel stets Feuchtigkeit enthält, wird auch über wasserfreien Oelen der Chlorwasserstoff in Form von Salzsäurenebeln auftreten. Dies war bei unseren Versuchen immer der Fall. Nach jeder Abschaltung lagerte über dem Oel ein weisser, dichter Nebel, der naturgemäss die in seinem Bereich liegenden Metallteile stark in Mitleidenschaft zog. Die im Oel infolge seines Feuchtigkeitsgehalts frei werdende Salzsäure trat an den Kontaktteilen durch starken Angriff zutage. Diese Erscheinung ist auch im praktischen Betrieb konstatiert worden, in einem Fall in sehr nachteiligem Masse. Immerhin muss gesagt werden, dass die wirklichen Zerstörungen im allgemeinen geringer sind, als man vorweg vermuten könnte. Es zeigte sich, dass die angegriffene Oberflächenschicht als Schutz für das darunter liegende Metall dient, auch scheint, dass durch Anstrich der Metalle dem Angriff begegnet werden kann. Das Mass des Angriffs hängt natürlich sehr von der Beanspruchung des Schalters ab; bei häufiger und schwerer Abschaltung ist die Gefahr entsprechend grösser als bei Schaltern, die wenig in Tätigkeit treten. Bei der Beurteilung des Oels ist daher dieser Gesichtspunkt nicht ausser acht zu lassen.

Neben der geschilderten unerwünschten Eigenschaft der „unverbrennlichen Oele“ treten noch elektrische Begleiterscheinungen auf, auf die hinzuweisen ist. Es zeigt sich nämlich, dass die *Durchschlagsfestigkeit* solcher Oele, die im ungebrauchten Zustand zum mindesten den gleichen Wert wie gewöhnliche Oele aufweist, mit wachsender Beanspruchung durch den Lichtbogen bis auf 50 % des früheren Wertes und mehr zurückgeht. Wir haben z. B. mit „Securol“ in einem Fall der Abschaltung von Gleichstrom vor Beginn der Versuche mit Nadel No. 4 bei 5 mm Distanz eine Durchschlagsspannung von 23 700 V gemessen, nach 10 Abschaltungen noch 8700 V, nach 30 Abschaltungen von 7600 V. Wir führen diese Erscheinung auf die Bildung wässriger Salzsäure im Oel zurück. Wäre dieses absolut wasserfrei, so würde wahrscheinlich die Durchschlagsspannung durch den entstehenden Chlorwasserstoff nicht beeinträchtigt. Wir haben indirekt diese Vermutung bestätigen können, indem die Durchschlagsspannung, die immer gleich nach der Abschaltung im Schaltergefäß bestimmt wurde, mit steigender Erwärmung des Oels wieder dem früheren hohen Wert zustrebte. Das Resultat solcher Messungen ist in Fig. 23 dargestellt.

Das starke Zurückgehen der elektrischen Festigkeit solcher Oele nach mehrfacher oder sehr schwerer Abschaltung würde eigentlich grössere Distanzen der spannungsführenden Teile im Schalter bzw. grössere Modelle benötigen, wollte man die gleiche Sicherheit wie bei Verwendung gewöhnlicher Oele erzielen.

Zieht man den Schluss über die Erfahrungen und Versuche mit unverbrennlichen Schalterölen, im besonderen mit der Marke „Securol“, so ist festzustellen, dass eine Zündung der entstehenden Gase, wie überhaupt die Bildung eines explosiven Gasgemisches unter dem Schalterdeckel praktisch vermieden ist. Die nachteiligen Begleiterscheinungen sind auch nicht derart, dass sie die Verwendung des Oels prinzipiell verunmöglichen würden. Es sind denn auch Fälle bekannt, wo das „Securol“ bei abnormaler Schalterbeanspruchung durch die Brandverhütung sehr gute Dienste leistete.

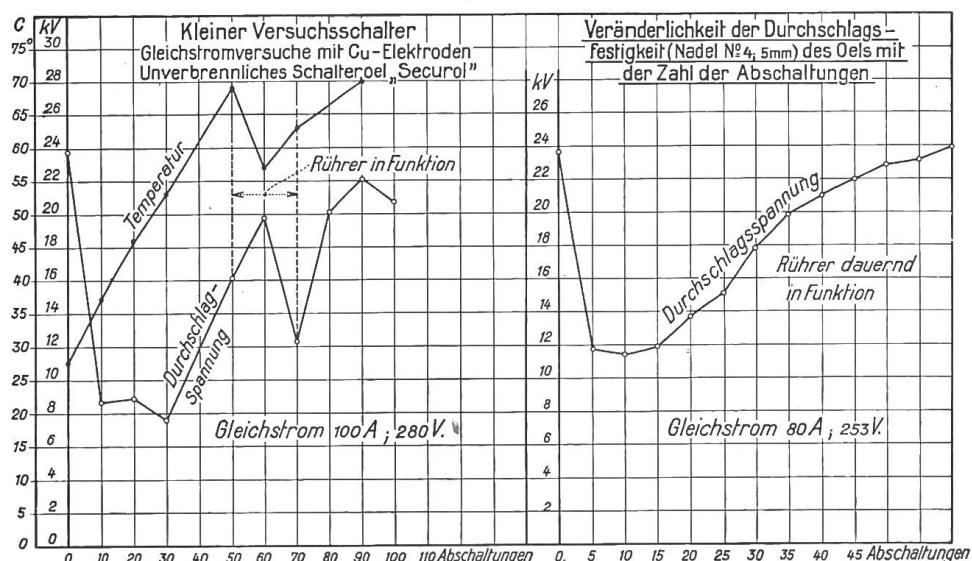


Fig. 23.

Andererseits erlauben die besagten Erscheinungen wohl doch dessen allgemeine Verwendung. Das „Securol“ und ähnlich wirkende, unverbrennliche Oele scheinen überall da am Platze zu sein, wo kleineren Schaltern ausnahmsweise einmal grössere oder häufigere Beanspruchungen zugemutet werden, z. B. in provisorischen Installationen u. dgl., ferner vielleicht da, wo Schalter unvermeidlich an Orten besonderer Brandgefahr aufgestellt werden müssen.

6. Kühlung des Gases und Dämpfe, die in den Mischungsraum aufsteigen.

Da anzunehmen ist, dass sich der grösste Teil der Abschaltungen mit Feuererscheinung unter dem Schalterdeckel auf Zündung der Gase durch Kaminbildung zurückführt, dürften in erster Linie Vorkehrungen zur Unterkühlung der aufsteigenden Gase und Dämpfe in Frage kommen. Es handelt sich hiebei darum, die Gase unter die Entzündungstemperatur, die etwa bei 500° liegt, abzukühlen, bevor sie in den Mischungsraum eintreten. Hiefür können bekanntlich *Siebe* oder *Kühlplatten* verwendet werden, die vom Gas durchströmt werden. So werden in der Patentliteratur Anordnungen angegeben (z. T. sind sie auch ausgeführt worden), bei denen ein Teil oder die ganze Oeloberfläche des Schalters durch ein Sieb abgedeckt ist. Andere Lösungen sammeln das Gas unter einer über die Kontakte gestülpten Tauchglocke, in deren Abzug Siebe oder Kühlplatten eingebaut sind. In Fig. c Tafel III ist eine solche Anordnung angegeben.

Wir haben die *Kühlwirkung* der *Siebe* im kleinen Versuchsschalter untersucht. Zu diesem Zweck sind verschiedene Lagen eines feinmaschigen Siebes ($0,5 \times 0,5$ mm Maschengrösse) eingebaut worden. Die Oelhöhe wurde so eingestellt, dass bei jeder Abschaltung Kaminbildung auftrat. Das zylindrische Oelgefäß wurde in geeigneter Höhe zugedeckt, um einen geschlossenen Mischungsraum zu erhalten, der die Bildung eines explosiblen Gasluftgemisches ermöglichte. Die Versuche ergaben folgendes Bild.

Zur sicheren Kühlung der aufsteigenden Gase reichte ein Sieb allein nicht aus; von mehreren hintereinander vorgenommenen Abschaltungen unter gleichen Bedingungen führten noch $30 \div 40\%$ zur Explosion. Bei zwei direkt aufeinanderliegenden, in der Drahtrichtung sich kreuzenden Sieben konnte in jedem Fall die Unterkühlung der Gase erzielt werden. Lagen hiebei die Siebe oberhalb der Oeloberfläche, so trat im Zwischenraum *unter* den Sieben Verbrennung ein, die aber nicht in den Raum zwischen Sieb und Deckel übergriff. Um überhaupt jede Zündung zu verhindern, mussten die Siebe ins Oel getaucht werden. Mit dieser Anordnung konnten auch bei schwerster Abschaltung (bezüglich der Grösse des

Versuchschalters) keine Verbrennungserscheinungen im Mischungsraum konstatiert werden, trotzdem das Gasgemisch explosibel war, wie Fremdzündungen unter dem Deckel ergaben. Diese Schutzmassnahme war aber noch nicht zuverlässig, weil die Siebe dem zuweilen mit den Gasen aufsteigenden Lichtbogen nicht lange stand hielten. Es traten oft nach wenigen Abschaltungen wieder Explosionen auf, da die Kühlung der Gase durch die vom Bogen ausgebrannten Löcher im Sieb stark beeinträchtigt wurde. Mit dieser Erscheinung wird auch im praktischen Betrieb zu rechnen sein. Es muss übrigens darnach getrachtet werden, die Kühlvorrichtung vom Kasten zu isolieren, weil sonst die Gefahr besteht, dass der aufsteigende Lichtbogen am Kühler stehen bleibt.

Wir haben über die *Kühlwirkung von Platten* (z. B. sog. Plattenschutz, bestehend aus einer grösseren Anzahl paralleler Metallplatten, durch deren enge Zwischenräume das Gas aufsteigt) keine Untersuchungen angestellt. Solche Anordnungen werden z. B. von einigen Konstrukteuren am Auspuff-Ende grösserer Sicherungen zur Kühlung der Stichflamme eingebaut und scheinen sich dort zu bewähren. Es darf daher angenommen werden, dass sie bei genügend engem Zwischenraum auch zur Unterkühlung der Schaltergase und -Dämpfe geeignet sind. Sollen die Gase vor dem Eintreten in den Mischungsraum unterkühlt werden, so muss der Plattenschutz jedenfalls auch unterhalb des Oelspiegels angeordnet werden. Damit vergrössert sich aber wieder die Gefahr der Zerstörung (Ausbrennung) durch den aufsteigenden Lichtbogen.

7. Die Anordnung eines ungefährlichen Mischungsraums.

Wir haben weiter oben dargelegt, dass das Explosionsbereich des Gas- und Dampfgemisches unter dem Schalterdeckel, sei die Verbrennung durch Eigen- oder Fremdzündung eingeleitet, zwischen den Grenzen $1/2\%$ bis 40% des Mischungsverhältnisses liegt. Hiebei bezieht sich die Verhältniszahl der Mischung auf den Volumenanteil des reinen Schaltgases am totalen Volumen. *Tritt daher z. B. bei einer Abschaltung ein Gas mit einem Volumen (bei Atmosphärendruck und 25^0 C) grösser als 40% des Mischungsraums in letzteren auf, so ist das Gemisch nicht brennbar.* Es liegt daher nahe, diesen so zu dimensionieren, dass bei schwerer Abschaltung, bei der die Zündung durch Kaminbildung wahrscheinlich ist, ein unverbrennliches Gasgemisch entsteht. Diese Bedingung ist, wie schon früher erwähnt, aus konstruktiven Gründen bei Topfschaltern erfüllt. Für die Versuche von *Merriam* an Topfschaltern der General Electric Comp. (siehe Seite 275) berechneten wir die pro Topf erzeugte Schalterarbeit in einem Fall zu 84 kW Sek. Dem entspricht nach früheren Angaben eine Gasmenge von rund 3900 cm^3 . Das Volumen des Mischungsraums schätzten wir für das 25 cm Modell zu ca. 4500 cm^3 . Das Gasvolumen macht also mehr als 85% des Mischungsraums aus. Bei der $20,3 \text{ cm}$ -Ausführung liegen die Verhältnisse noch günstiger. Das erstgenannte Topfschaltermodell würde nach unserer überschläglichen Rechnung auch bei der bedeutend kleineren Leistung von rund 8000 kVA noch ein unbrennbares Gasgemisch unter dem Deckel aufweisen. Darin liegt ein nicht gering zuachtender Vorteil der Topfschalter gegenüber dem Kastenmodell, dessen heutiger konstruktiver Aufbau bedeutend grössere Räume unter dem Schalterdeckel benötigt ($20\,000 - 100\,000 \text{ cm}^3$). Darin mag eine Erklärung liegen für die grosse Betriebssicherheit, die in Amerika den Topfschaltern im allgemeinen nachgerühmt wird. Bei der Prüfung der Frage, welche der beiden Ausführungsformen im gegebenen Fall heranzuziehen ist, spielen allerdings auch noch andere Erwägungen eine Rolle.

Es lässt sich nun auch in Kastenschaltern der gleiche Vorteil erzielen durch *Einbau eines besonderen „ungefährlichen Mischungsraumes“ unter den Schalterdeckel*. Dies bedingt allerdings das Auffangen des Gases durch eine besondere Glocke, die die Gase dem Mischungsraum zuführt. Nach diesem Prinzip haben unter andern unsere Firmen *Sprecher & Schuh*, Aarau und *Maschinenfabrik Oerlikon* Schalterkonstruktionen in Ausführung. Als Beispiel zeigt Fig. c Tafel III die der Patentschrift entnommene Anordnung von erstgenannter Firma. Hier ist über jeder Unterbrechungsstelle eine Glocke aus Isoliermaterial²⁰⁾

²⁰⁾ Zur Vermeidung des Ueberschlagens des Lichtbogens an die Kastenwandung. Aus gleichem Grunde kleiden einige Konstrukteure den Kasten mit Isolierplatten aus. Diese Vorsichtsmassregel sollte allgemein angewendet werden.

zum Sammeln des Gases angebracht, welches durch einen Rohrkrümmer ins Freie abgeht. Der Krümmer bildet den eigentlichen Mischungsraum, der gegen das Öl durch mehrere Siebe zur Kühlung der Gase abgeschlossen ist und sich nach aussen frei öffnet. Durch eine solche Anordnung wird auch die Fremdzündung des Gases durch Gleitfunken und dergleichen höchst unwahrscheinlich, da der Mischungsraum nicht im Bereich elektrischer Entladungen steht. Sollte aus irgend einem Grunde doch eine Verbrennung im Krümmer stattfinden, so werden sich keine gefährlichen Druckkräfte entwickeln, da der Mischungsraum nach aussen offen ist. Fig. c Tafel III soll das Grundsätzliche der Schutzbauvorkehrung darstellen; es sind auf dem gleichen Prinzip fußend noch andere Lösungen denkbar. Die weitere Verfolgung führt auf den Gedanken, vom Begriff der kritischen Ölöhöhe, bei der Kaminbildung eintritt, abzusehen, weil diese Erscheinung in unserem Fall an Gefährlichkeit verliert. Es sind Anordnungen denkbar, bei denen auf diese Weise ohne Gefahr mit einer wesentlich geringeren Ölmenge auszukommen ist. Wie weit man hierin gehen kann, müsste durch praktische Versuche geprüft werden.

8. Der druckfeste Oelschalter

will von vornehmerein den beim Abschalten möglichen Druckerscheinungen durch eine geeignete kräftige Konstruktion standhalten. Insofern man die zu erwartende Beanspruchung mit einiger Sicherheit festzulegen vermag, steht einem betriebsicheren Aufbau solcher Apparate nichts im Wege. Die *Siemens-Schuckertwerke* haben heute eine druckfeste Oelschalterausführung auf dem Markt, von der Fig. b Tafel III ein Bild gibt. Das Gefäß zur Aufnahme des Unterbrechers ist als Ueberdruckgefäß geformt, Deckel und Boden sind gewölbt und kreisrund im Querschnitt. Das Ölgefäß tritt in eine ausgedrehte Nut des Deckels, in der eine Dichtung liegt. Das Gefäß wird durch starke Bolzen gegen einen vorübergehenden Ueberdruck von 8—10 kg/cm² ölf- und gasdicht verschraubt. Nach dem Freien führt ein Gasabzugrohr. Die Firma stellt, entsprechend der Sicherheit, die sie sich von dieser Konstruktion verspricht, die Schalter ohne besonderen Zelleneinbau in der Schaltanlage auf, womit unbestritten ein grosser Vorteil gewonnen wäre.

Die Frage, ob in druckfesten Konstruktionen wirklich für alle möglichen Fälle abnormaler Abschaltung die gewünschte Sicherheit gegen Brandgefahr vorhanden ist, hängt nach unserer Auffassung davon ab, ob die Bildung und Zündung eines explosiven Gasgemisches grundsätzlich vermieden ist oder nicht. Sind in diesem Sinne Schutzbauvorkehrungen getroffen, wie wir sie etwa vorgängig erörtert haben, so darf im druckfesten Oelschalter eine empfehlenswerte Lösung ersehen werden, den Einbau des Schalters in besondere Schutzzellen mit Ölablau u. dgl. zu vermeiden. In diesem Sinne stellt der moderne Topfschalter eine analoge Ausführung dar. Da er, wie früher gesagt, seines kleinen Mischungsraums wegen keine Verbrennung der Gase unter dem Schalterdeckel ermöglicht, ist damit die Gefahr der eigentlichen Schalterzertrümmerung durch die Explosion vermieden. Die noch möglichen Druckkräfte im Schalterinnern infolge der Gasproduktion sind andererseits, wie gezeigt, nicht derart, dass sie durch eine kräftige Ausführung von Kessel und Deckel nicht aufgenommen werden könnten. Der Topfschalter mit verschraubtem Deckel und gedichteter Einführung der Kontaktstange, wie er heute ausgeführt wird, ist daher ebenfalls als druckfester Oelschalter anzusprechen.

Druckfeste Oelschalterkonstruktionen, die aber die Möglichkeit der Verbrennung des Gasgemisches in sich schliessen, versprechen wegen der Unsicherheit in der Bestimmung der Explosionsdruckkräfte keine grössere Betriebssicherheit, als irgend eine der heute üblichen ungeschützten Konstruktionen.



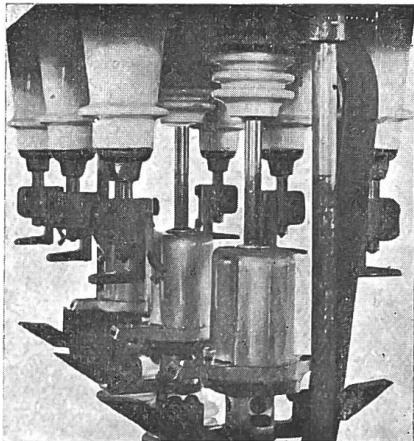
Tafel III.

Fig. a
Oelspritzvorrichtung zum vorzeitigen Abreissen
des Lichtbogens.
Sprecher & Schuh A.-G., Aarau.

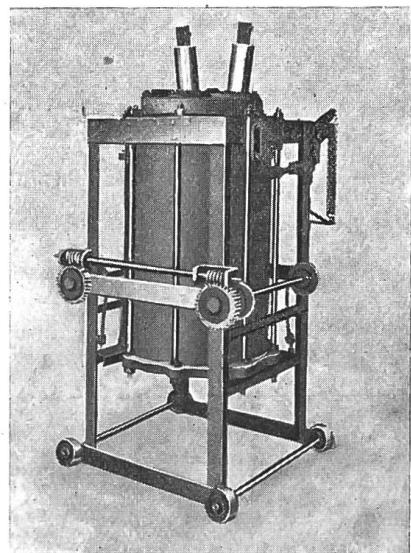
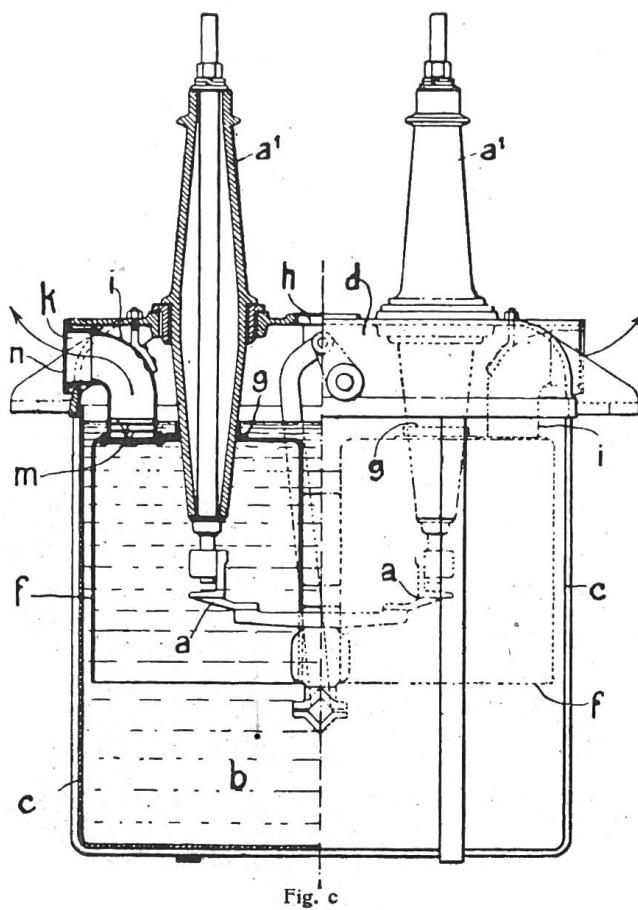


Fig. b
Druckfester Oelschalter
Siemens Schuckertwerke.



Explosionssicherer Oelschalter
Sprecher & Schuh A.-G., Aarau.

f: Gasauflangglocke aus Isoliermaterial.
i: Mischungsraum.
m: Kühlsiebe.