Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 16 (1925)

Heft: 2

Artikel: Die theoretischen und praktischen Grundlagen für den Bau, die Wahl und den Betrieb von Oelschaltern

Autor: Brühlmann, G.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059220

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: 02.10.2025

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

Durch passende Aufteilung und eventuell mehrfache Umrechnung nach dieser Methode kann jedes beliebige Netz in ein offenes verwandelt werden, das dann analog den Beispielen behandelt werden kann. Mehrere speisende Zentralen werden als Punkte gleicher EMK betrachtet.

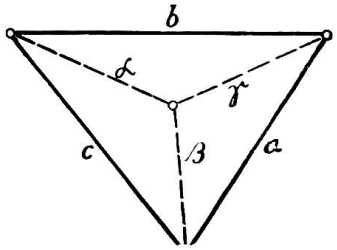

Fig. 4.
Umrechnung der Impedanzen dreier zum Dreieck zusammengeschalteter Leitungen in die entsprechende Sternschaltung.

Seite 226/17. Das *Beispiel* bezieht sich auf ein Einphasennetz, entgegen den Angaben für die Generatoren in Fig. 6 auf Seite 225/16. Für Dreiphasennetze müssten die Ströme noch durch $\sqrt{3}$ dividiert werden.

Seite 227/18. *Kurzschlusstrom von Asynchronmaschinen.* Bei grossen asynchronen Turbomotoren, welche zwar in der Schweiz kaum vorkommen, geschieht das Abklingen langsamer, so dass ein geringer Beitrag zur Erhöhung der Abschaltleistung möglich ist. Bei zwei- oder einpoligen Kurzschlüssen an Asynchronmaschinen klingt der Strom nicht bis auf 0 ab, sondern auf einen Wert ähnlich dem Dauerkurzschlusstrom der Synchronmaschinen, deshalb, weil der Motor von den gesunden Phasen aus weiter gespiesen wird und als Phasenumformer wirkt. Diese Möglichkeit ist aber praktisch ohne Bedeutung, weil die Beanspruchung eines Schalters bei nicht allpoligem Kurzschluss an und für sich kleiner ist gemäss Tabelle I, wobei direkte Generatorkurzschlüsse kaum in Betracht kommen. Ueberdies besitzen Stromverbraucher sehr oft Schalter mit Momentanauslösung, so dass sie im Dauerkurzschluss nicht mehr mitwirken. Stromverbraucher können nur dann die den Schalter durchfliessende Stromstärke erhöhen, wenn sie, vom Schalter aus gesehen, auf der speisenden Seite des Netzes liegen.

Seite 228/19. *Löschwiderstände.* Die Wirkung derselben ist von Bauer im Bulletin 1916, Seite 85 u. f. ausführlich behandelt und in den „Grundlagen für den Bau der Oelschalter" im vorliegenden Heft, Abschnitt IIIa 5, ergänzt; sie beruht auf einer Verzögerung des Spannungsanstieges am Lichtbogen im Löschmoment. Die Widerstände müssen so bemessen sein, dass sie, entsprechend der Forderung über die Schalthäufigkeit auf Seite 214/5 der Richtlinien, zweitletzter Absatz, dreimaliges Schalten in Abständen von einer Minute bei allen Betriebszuständen schadlos ertragen. Die grösste Beanspruchung des Widerstandes fällt übrigens nicht zusammen mit der grössten Abschaltleistung des Schalters.

Die theoretischen und praktischen Grundlagen für den Bau, die Wahl und den Betrieb von Oelschaltern.

Von *G. Brühlmann,* Ingenieur der A.-G. Brown Boveri, Baden.

Der Autor versucht einen Ueberblick über den heutigen Stand der Oelschalterfrage zu geben, als Grundlage für sein Referat an der Diskussionsversammlung des S.E.V. vom 3. April 1925 in Zürich[1]). Anknüpfend an die früheren Arbeiten des S.E.V. werden die Vorgänge im Oelschalter und ihr Verhalten im Betrieb beschrieben und die seither neu gewonnenen Kenntnisse besonders hervorgehoben.

[1]) *Einladung siehe Seite 111 des vorliegenden Bulletin.*

En vue de la conférence qu'il donnera à l'Assemblée de discussion de l'A.S.E. le 3 avril 1925 à Zurich l'auteur se propose de donner ici une vue d'ensemble de l'état actuel de la question des interrupteurs à huile[1]). Il décrit les phénomènes qui ont lieu à l'intérieur de ces appareils, et comment ceux-ci se comportent en exploitation. L'auteur se réfère aux travaux antérieurs de l'A.S.E. et insiste spécialement sur les résultats nouveaux obtenu depuis lors.

[1]) *Invitation voir page 111 du présent Bulletin.*

I. Allgemeines.

Der Oelschalter ist an und für sich ein recht einfacher Apparat. Nicht einfach sind dagegen die Vorgänge, die sich darin abspielen, besonders beim Ausschalten,

bei grossen Stromstärken auch beim Einschalten. Es ist bekannt, dass Oelschalter unter Umständen eine Gefahrenquelle bilden können, um trotzdem einen störungsfreien Betrieb sicherzustellen, ist es notwendig, ihre Wirkungsweise zu studieren und insbesondere Klarheit zu schaffen über die Betriebsbedingungen, welche die Arbeitsweise eines Schalters beeinflussen.

Unsere heutigen Kenntnisse über die Vorgänge in Oelschaltern sind noch lückenhaft. Die Kompliziertheit der physikalischen und chemischen Vorgänge und die Schwierigkeiten, welche der Ausführung von Versuchen mit genügend grossen, der Praxis entsprechenden Kurzschlussleistungen entgegenstehen, erschweren die restlose Klärung. Aber auch das bereits Bekannte, das übrigens in vielen Fällen vollauf genügt, ist noch wenig in die weiteren Fachkreise als diejenigen der Schalterkonstrukteure eingedrungen und doch ist für den Betrieb und die Projektierung von Anlagen eine gewisse Vertrautheit mit der Wirkungsweise der Schalter erwünscht, sie bietet die beste Gewähr für die Vermeidung von Fehlschlägen.

Währenddem fast alle andern Teile einer Anlage durch die Daten des Normalbetriebes, d. h. Betriebsspannung und Betriebsstromstärke eindeutig bestimmt sind und deshalb sehr einfach ausgewählt werden können, ist zur Bestimmung der Beanspruchung eines Schalters oft die Berücksichtigung der Verhältnisse eines sehr vielseitigen Kraftnetzes nötig. Um dies zu erleichtern, wurden vom S. E. V. die „Richtlinien für die Wahl der Schalter in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen" herausgegeben, welche im Bulletin S. E. V. 1924, Heft 5, Seite 210 u. ff. und in einem Separatabdruck publiziert sind. Siehe auch die „Erläuterungen zu den Richtlinien" im vorliegenden Heft. Die folgenden Ausführungen werden zum Verständnis der „Richtlinien" beitragen, indem sie die Grundlagen behandeln, auf welchen dieselben aufgebaut sind.

Im Schosse des S. E. V. und V. S. E. ist der Schalterfrage schon seit Jahren lebhaftes Interesse entgegengebracht worden. Sie bildete einen der Hauptprogrammpunkte der Kommission für Hochspannungsapparate und Brandschutz, deren umfangreiche Arbeiten über Oelschalter in vier Berichten im Bulletin des S. E. V. 1915/16 und 1917 niedergelegt sind. Sowohl der theoretische als der experimentelle Teil jener Arbeiten ist grösstenteils von Dr. Bruno Bauer sehr sorgfältig und vollständig durchgeführt worden. Sie führten zu praktisch brauchbaren Resultaten und können heute noch als die klassische Grundlage unserer Kenntnisse über den Abschaltvorgang in Oelschaltern bezeichnet werden.

Wegen der beschränkten Mittel, welche damals zur Verfügung standen, besonders der kleinen Leistung, lassen jene Arbeiten aber noch Lücken offen. Die Erfahrung zeigt, dass bei den grossen Beanspruchungen, mit welchen man heute die Schalter arbeiten lässt, die Vorgänge bei der Abschaltung zum Teil wesentlich anders verlaufen. Ein Schalter mit rund 100 Liter Inhalt, welcher bei jenen Versuchen höchstens 1000 kW bei geringer Induktivität abzuschalten hatte, wird heute für induktive Abschaltleistungen in der Grössenordnung von 20000 kVA verwendet. Es ist deshalb erklärlich, dass die Bauerschen Arbeiten ergänzungsbedürftig geworden sind. Ein weiterer Punkt, dessen Wichtigkeit sich erst in den letzten Jahren zeigte und welcher deshalb in diesen Arbeiten gar nicht behandelt wurde, ist das Verhalten der Schalter beim *Einschalten* auf grosse Kurzschlussströme.

Die Oelschalterkonstruktionen sind inzwischen auf Grund von Betriebserfahrungen und durch die Versuche mit grossen Leistungen einzelner Firmen weiter entwickelt worden. Wenn wir auch das Endziel der Schalterforschung, nämlich die Berechnung der Schalterdimensionen für gegebene beanspruchende Daten, noch nicht erreicht haben, so ist es doch heute dem Konstrukteur möglich, mit einiger Sicherheit die Beanspruchungen anzugeben, welchen ein gegebener Schalter ohne Gefahr standhalten kann. Tatsächlich sind auch in den schweizerischen Betrieben in den letzten Jahren sehr wenig grössere Störungen durch Schalterbrände vorgekommen.

Ebenso wichtig wie die konstruktive Frage der Dimensionierung eines Schalters für gegebene Beanspruchungen ist die richtige Auswahl der Schalter. Auch in dieser

Richtung sind Fortschritte gemacht worden, welche in den „Richtlinien" ihren Niederschlag gefunden haben.

II. Die Funktionen eines Schalters.

Die Aufgabe eines Schalters besteht im Schliessen und Unterbrechen einer Leitung bei Stromdurchgang. Vorrichtungen zum Schliessen und Oeffnen einer Leitung im stromlosen Zustand werden nach Definition in den „Richtlinien", Seite 212/3[1]), nicht als Schalter bezeichnet, sondern fallen unter den Begriff der Trenner. Das Oeffnen und Schliessen kann bei den verschiedensten Betriebszuständen des Netzes erfolgen, von besonderem Interesse sind die Verhältnisse bei Kurzschluss an den abgehenden Leitungen, weil dabei die grösste Stromstärke auftritt, welche den Schalter durchfliessen kann.

Die *Anforderungen*[2]), welche an einen Schalter zu stellen sind, damit derselbe seine Funktionen erfüllen kann, sind für die verschiedenen Betriebszustände die folgenden:

1. **In Ausschaltstellung** muss eine zuverlässige Isolation der spannungsführenden Teile gegen Erde und gegeneinander gewährleistet sein. Besonders zu beachten ist die Isolation zwischen den Klemmen der ankommenden und der abgehenden Leitung, weil bei einem Versagen derselben die abgeschaltete Leitung Spannung erhalten kann, wodurch das Personal gefährdet wird. Schaltergase, welche an die Isolatoren strömen, erzeugen an denselben, wenn sie unter Spannung stehen, einen Russbelag und können dadurch Ueberschläge einleiten[3]). Störungen dieser Art sind öfters aufgetreten, sie wurden oft als Ueberspannungsfälle erklärt. Die Expansionsöffnungen der Oelschalter sollen so angebracht sein, dass die Gase nicht direkt an die Isolatoren strömen können.

2. **In Einschaltstellung** ist ebenfalls zuverlässige Isolation der spannungsführenden Teile gegen Erde und Phase gegen Phase notwendig. Ueberdies ist der Schalter vom Betriebsstrom durchflossen und muss denselben dauernd ohne zu starke Erwärmung der Kontakte, der Durchführungsbolzen in den Isolatoren oder anderer leitender Teile oder des Oeles ertragen können. Gut ausgeführte Löschkontakte mit genügendem Kontaktdruck können bis einige hundert Ampere die dauernde Stromführung übernehmen.

Der geschlossene Schalter muss auch die kurzzeitigen Stromstösse ertragen können, wie sie bei Kurzschlüssen an der abgehenden Leitung entstehen und deren Wirkungen im Abschnitt III b behandelt werden, sie treffen die Hauptkontakte, sofern der Schalter solche besitzt, andernfalls die Löschkontakte.

Es ist zu beachten, dass für die mechanischen Beanspruchungen die höchste Stromspitze massgebend ist, es ist deshalb der „Sättigungsstoss" (siehe „Richtlinien", Seite 217/8) sowie die Asymmetrie mitzuberücksichtigen.

3. **Beim Einschalten.** Das Einschalten des Betriebsstromes stellt für den Schalter keine besondere Beanspruchung dar. Es muss aber verlangt werden, dass ein Schalter auch bei bestehendem Kurzschluss einschalten kann[4]). Dieser Fall kann besonders dann eintreten, wenn der Schalter durch sein Ueberstromrelais ausgelöst worden ist und wieder eingelegt wird, ohne die abgeschaltete Leitung auf ihren Zustand kontrolliert zu haben. Die Wirkungen der Kurzschlussströme treffen im Einschaltmoment immer die Löschkontakte, sie sind im Abschnitt III b behandelt.

4. **Beim Abschalten.** Im allgemeinen muss verlangt werden, dass ein Schalter den grössten, am Ort seiner Aufstellung möglichen Kurzschlusstrom abschalten kann.[5])

[1]) Die erste Zahl bezeichnet die Seite im Bulletin 1924, No. 5, die zweite gilt für den Separatabdruck.

[2]) Siehe darüber auch die „Richtlinien", Abschnitt 3, Seite 213/4: Für die Wahl eines Schalters erforderliche Angaben.

[3]) Vergleiche Bulletin 1924, No. 7, Seite 350 mit Fig. 4.

[4]) „Richtlinien", Seite 213/4, letzter Absatz und Seite 214/5, zweitletzter Absatz.

[5]) „Richtlinien" Seite 214/5, 4. Absatz.

Ausnahmen sind nur zulässig, wenn Gewähr dafür besteht, dass der Schalter bei Kurzschluss auf keine Weise ausgelöst werden kann (Nullspannungsauslösung, Handbetätigung). Motorenschalter haben z. B. gewöhnlich raschwirkende Nullspannungsauslösung; bei Kurzschluss verschwindet die Spannung, der Schalter wird betätigt und hat den vollen Netzkurzschlusstrom abzuschalten. Die Bemessung nur für den Betriebsstrom oder einen gewissen Ueberlaststrom ist also falsch. Die grösste Beanspruchung, die ein Schalter erfahren kann, bildet das Ein- und sofort wieder Abschalten unter Kurzschluss. Nach den „Richtlinien" (Seite 214/5, zweitletzter Absatz) soll ein Schalter das Abschalten, sowie zweimaliges Ein- und Wiederabschalten bei Kurzschluss in Zeitabständen von wenigstens 1 Minute erlauben. Diese Festlegung entspricht den Bedürfnissen der Praxis. Der Schalter soll nachher noch betriebsfähig sein, bedarf aber vor weitern schweren Schaltungen einer Revision. Die Begleiterscheinungen des Abschaltvorganges, wie Rauchbildung, Oelauswurf, Flammen, eventuell Deformationen dürfen nicht so stark sein, dass sie bei oder nach den drei genannten Schaltungen die Betriebssicherheit gefährden.

5. **Allgemeine Anforderungen.** Die Schalter sollen nicht als Ueberspannungserzeuger wirken, besonders beim Abschalten von Kurzschlüssen. Schalter, welche häufig leerlaufende Transformatoren zu schalten haben, erhalten aus diesem Grunde öfters Schutzwiderstände.

Der konstruktive Aufbau der Schalter soll einfach sein, ebenfalls der Antrieb. Im Interesse guter Raumausnützung sollen seine Abmessungen möglichst klein gehalten werden, ein Punkt der besonders in Anlagen mit vielen Schaltern sich an den Gebäudekosten stark fühlbar macht.

III. Die Vorgänge im Oelschalter.

a) Beim Abschalten.

1. **Rein Elektrisches.** Das Unterbrechen eines Stromes in einem beliebigen Stromkreise kann theoretisch auf zwei Arten erfolgen: entweder durch Einfügen einer elektromotorischen Kraft, welche der den Strom erzeugenden EMK entgegenwirkt und dieselbe kompensiert, oder durch Einfügen eines ohmschen Widerstandes (bei Wechselstrom eventuell auch einer Reaktanz), dessen Wert von annähernd 0 bis annähernd unendlich anwächst. Die praktisch verwendeten Schalter arbeiten alle mit dem veränderlichen ohmschen Widerstand, welcher dargestellt wird durch einen Lichtbogen, dessen Länge von 0 bis zur Abreisslänge ansteigt. Ist die Spannung der Stromquelle konstant (d. h. bei Gleichstrom) und keine Selbstinduktion im Stromkreis vorhanden, so sinkt die Stromstärke umgekehrt proportional dem totalen Widerstand bis auf 0. Liegt Induktivität im Stromkreis, so wirkt die durch das Abnehmen des Stromes darin induzierte Spannung in dem Sinne mit, dass sie sich zur Spannung der Stromquelle addiert. Bei Wechselstrom sind Strom und Spannung an und für sich schon eine Funktion der Zeit. In jeder Periode tritt zweimal ein Moment auf, in welchem der Strom = 0 ist. Könnte man in diesem Moment die Kontakte eines Schalters plötzlich öffnen, so wäre eine funkenfreie Unterbrechung möglich. Praktisch ist dies nicht ausführbar, so dass wir auch bei Wechselstrom mit einem Lichtbogen rechnen müssen, der aber bedeutend kleiner wird als bei Gleichstrom. Der Unterschied zwischen Gleich- und Wechselstrom verschwindet bei Schaltern, deren Abschaltzeit nur einen Bruchteil einer Halbperiode des Wechselstromes beträgt, wie das bei sogenannten Schnellschaltern in Luft mit starker magnetischer Blasung der Fall ist.

2. **Der Lichtbogen in Luft oder in Gasen.** Beim Oeffnen eines Kontaktes unter Stromdurchgang wird zunächst der Kontaktdruck und wegen der stets vorhandenen Unebenheiten auch die Berührungsfläche verkleinert bis auf 0, und damit der Uebergangswiderstand erhöht. Die an der Berührungsstelle erzeugte Wärmemenge, welche proportional ist $J^2 r$ wird deshalb immer grösser und vermag schliesslich kurz vor dem vollständigen Oeffnen einen Punkt der beiden Elektroden zum Glühen,

Schmelzen und Verdampfen zu bringen. Im Moment der Trennung haben wir also zwischen den Elektroden nicht Luft, sondern Metalldämpfe. Diese sind leitend, so dass der Strom trotz Trennung der Kontakte noch weiter fliessen kann; es ist ein Lichtbogen entstanden. Bei der weitern Verlängerung dieses Metalldampflichtbogens mischen sich die heissen Dämpfe mit der umgebenden Luft. Die in den Lichtbogen eintretenden Luftmoleküle werden durch Stossionisation in Ionen und Elektronen gespalten und werden dadurch ebenfalls leitend. Der Metalldampflichtbogen geht dadurch in einen Luft- resp. Gaslichtbogen über, welcher Vorgang beschleunigt wird durch die Bewegung des Lichtbogens gegenüber der umgebenden Luft und die dadurch veranlasste Wirbelbildung, besonders bei starker magnetischer Blasung.

Mit zunehmender Länge des Lichtbogens wächst dessen Widerstand und erreicht nach der Löschung den Wert unendlich, d. h. der Abschaltvorgang ist beendigt. Das Anwachsen geschieht aber nicht gleichmässig, sondern verläuft nach anfänglich nur langsamem Anstieg im Moment der Löschung sprungweise. Die Löschung tritt ein, wenn die dem Lichtbogen zugeführte und darin in Wärme umgesetzte Leistung ($J_a V_L$, wenn V_L = Spannung zwischen den Elektroden) nicht mehr genügt, um die Wärmeabgabe an die Umgebung zu decken. Da die Wärmeabgabe mit der Lichtbogenlänge wächst, ist durch diese Forderung die maximale Länge bestimmt.

Bei Wechselstrom sinkt die zugeführte Leistung bei jedem Stromdurchgang durch 0 unter den kritischen Betrag, so dass der Lichtbogen jedesmal kurz vor dem natürlichen Nullwert des Stromes löscht. Die Zeitdifferenz ist allerdings so klein, dass sie gewöhnlich in den Oszillogrammen gar nicht gesehen werden kann. Deshalb ist auch die Abkühlung der glühenden Gase nur gering und die Durchschlagsfestigkeit des heissen Gasstranges (Zündspannung) entsprechend tief, so dass nach Wiederherstellung der Existenzmöglichkeit des Lichtbogens eine Neuzündung stattfindet. Dieser Vorgang wiederholt sich nach jeder Halbperiode solange bis nach genügender Verlängerung des Lichtbogens die Zündspannung grösser als die Elektrodenspannung geworden ist und die Neuzündung unterbleibt. Fig. 1 stellt den beschriebenen Vorgang dar; sie ist insofern schematisiert, als die Zeiten der Stromlosigkeit übertrieben lang sind und die Schwingungsvorgänge, welche bei jedem plötzlichen Spannungssprung auftreten, weggelassen wurden.

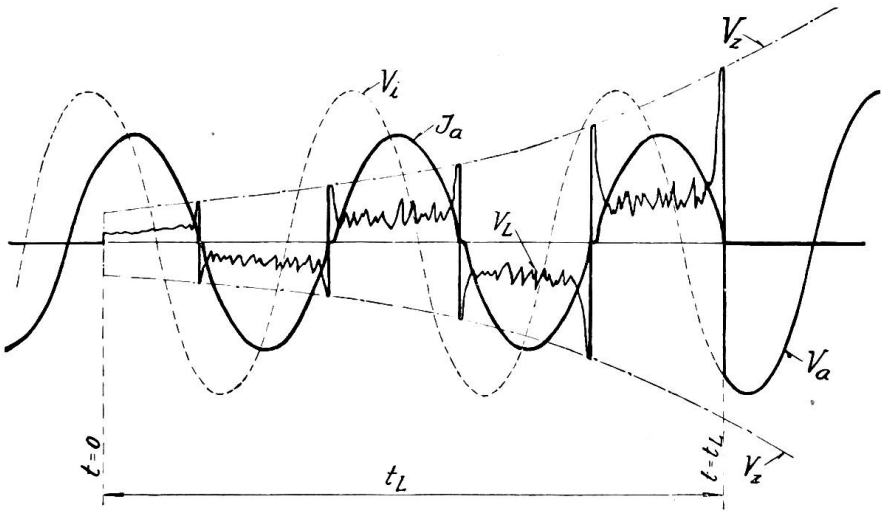

Fig. 1.
Verlauf des Abschaltvorganges bei Wechselstrom (teilweise schematisch).
V_i = Induzierte Spannung (nicht messbar).
J_a = Abschaltstrom, 60° nacheilend.
V_L = Lichtbogenspannung.
V_a = Abschaltspannung.
V_Z = Zündspannung des kurzzeitig stromlosen Lichtbogens.
t_L = Lichtbogendauer.
$t = 0$ = Moment der Kontaktöffnung.
$t = t_L$ = Löschmoment.

Ausführliche Angaben über die Existenzbedingungen des Lichtbogens enthält die Bauersche Arbeit im Bulletin 1915, Seite 142–156.

Die im Schalter bei einer Abschaltung entwickelte Wärmemenge ist gegeben durch die Schalterarbeit

$$A = \int J_a V_L \, dt,$$

sie ist massgebend für die Wirkungen des Lichtbogens, also für die Beanspruchung des Schalters beim Abschalten.

Luftschalter kommen für Wechselstrom-Hochspannungsanlagen weniger in Betracht, ihr Anwendungsgebiet ist hauptsächlich der Gleichstrom. Ihre Konstruktion ist in den letzten Jahren stark entwickelt worden; sie sind heute verwendbar für Spannngen bis ca. 5000 V und Abschaltleistungen bis ca. 50000 kW, wobei Lichtbogen bis 5 m Länge auftreten.

3. **Der Lichtbogen in Oel.** Die Vorgänge sind grundsätzlich dieselben wie in Luft. Das Oel in der nächsten Umgebung des Lichtbogens wird durch die Wärme verdampft und vergast, so dass in Wirklichkeit auch in diesem Fall der Lichtbogen nicht eigentlich in Oel, sondern in einer Gas- und Dampfsphäre brennt, welche ihrerseits vom Oel umgeben ist. Der Einfluss des Oeles auf den Lichtbogen besteht hauptsächlich in einer viel kräftigern Kühlung und einer Aenderung der Druckverhältnisse der Lichtbogengase infolge der bei der Verdampfung und Vergasung des Oeles entstehenden Volumenvermehrung. Ausserdem bringt das Oel Nebenerscheinungen teils physikalischer, teils chemischer Natur mit sich, welche weniger auf die Löschung und deshalb die Lichtbogenlänge, als auf die Wirkungen des Lichtbogens im Schalter von Einfluss sind. Dass der Abschaltvorgang in seinen Grundzügen tatsächlich so verläuft, wie in der Fig. 1 dargestellt, ist praktisch bestätigt durch hunderte von Oszillogrammen induktiver Abschaltungen mit Spannungen bis 30000 V und Strömen bis 30000 A.

Das Bild, das wir uns vom Lichtbogen unter Oel machen, ist also dasjenige einer heissen Gasblase, in deren Zentrum eine Temperatur von einigen tausend ^{0}C herrschen mag, abnehmend gegen die gekühlte Oberfläche. Entsprechend der Temperaturverteilung besteht auch im Innern die grösste Stromdichte und deshalb die grösste Wärmeentwicklung, welche einen Wärmetransport durch Leitung und Strahlung an die umgebenden Oelwände zur Folge hat. Die totale in einem beliebigen Moment zugeführte Leistung $J_a V_L$ (mit Bezug auf Fig. 1) wird verwendet für: Erwärmung, Schmelzen und Verdampfen von Elektrodenmetall; Erwärmung, Verdampfen und teilweise Vergasen, d. h. chemisch Zerlegen von Oel; Erhitzung der gebildeten Gase und Dämpfe; Erwärmung einer die Gasblase direkt umgebenden dünnen Oberflächenschicht des Oeles; ferner wird mechanische Arbeit erzeugt in Form von Druck in der Gasblase selbst und eventuell im Luftraum über dem Oel, und als kinetische Energie durch Beschleunigung der umgebenden Oelmasse. Qualitativ sind also die innern Verhältnisse der Gasblase ziemlich gut bekannt, quantitativ wissen wir aber sehr wenig über dieselben. Wir werden im folgenden Abschnitt sehen, welche Rolle die Temperaturverhältnisse der Gasblase auf das praktische Verhalten eines Schalters ausüben.

Die Konstanten, welche den Verlauf des Abschaltvorganges bestimmen, sind unter Oel natürlich andere als in Luft, und zwar in dem Sinne, dass zum Löschen unter gegebenen Leistungsverhältnissen in Oel eine viel kleinere Lichtbogenlänge genügt. Die günstigen Wirkungen zeigen sich hauptsächlich in der Zündspannung, welche für das Löschen bei Wechselstrom massgebend ist. Deshalb ist der Oelschalter ein typischer Wechselstromschalter; für grosse Gleichstromleistungen kommt er kaum in Betracht, auch deshalb nicht, weil bei Gleichstrom noch andere Nachteile auftreten, wie Erzeugung von Ueberspannungen und unzulässige Oelverrussung.

4. **Wirkungen des Lichtbogens im Oelschalter.** Beobachten wir einen Schalter bei der Abschaltung von aussen, so werden wir zunächst beim Abschalten nur einer kleinen Leistung, z. B. des Belastungsstromes im Netz, überhaupt nichts konstatieren, d. h. die Ausschaltung unterscheidet sich nicht von derjenigen im stromlosen Zustand. Könnten wir den Schalter im Innern beobachten, so würde das Aufsteigen einiger Gasblasen aus dem Oel und etwas Rauchbildung zu bemerken sein. Bei grössern Abschaltleistungen ist im Schaltmoment ein deutlicher Schlag zu verspüren, aus den Expansionsöffnungen entweicht etwas Rauch und wird vielleicht auch etwas Oel ausgeworfen. Bei starken Kurzschlussabschaltungen, worunter wir solche verstehen

wollen, welche der maximal zulässigen Beanspruchung des Schalters nahe kommen, ändert sich aber das Bild ganz wesentlich. Der Schalter erfährt eine heftige Erschütterung, welche unter Umständen im ganzen Gebäude spürbar ist, ein freistehender Schalter wird sogar oft einige Zentimeter vom Boden abgehoben. Aus den Oeffnungen wird Oel mit grösster Heftigkeit ausgestossen und eventuell mehrere Meter weit oder hoch geschleudert. Dem Schalter entströmen dicke, schwarze Rauchmassen, und in vielen Fällen Flammen.

Direkte Beobachtungen schwerer Abschaltungen im Betrieb sind naturgemäss selten, weil ihr Auftreten nicht vorher bekannt ist; nur bei Abschaltversuchen mit entsprechend grossen Leistungen ist es möglich, die Vorgänge, die sich dabei abspielen, genau zu verfolgen. Im Betrieb kann im allgemeinen nur das Bild aufgenommen werden, das sich nach der Abschaltung bietet, und das Personal ist dann oft überrascht von der Menge des Rauches und des herumgespritzten Oeles.

Alle diese äussern Beobachtungen zeigen, dass beim Abschaltvorgang gewaltige Kräfte an der Arbeit sein müssen.

Wir wollen nun den Vorgang betrachten, wie er sich im Innern des Schalters abspielt.

Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, bildet sich um jeden Lichtbogen im Oel eine Gasblase. Bei kleinen Leistungen verursacht dieselbe ein Aufwallen der Oeloberfläche und tritt, im allgemeinen nachdem sie sich beim Aufstieg durch das Oel abgekühlt hat, in den Luftraum des Schalters. Bei genügender Leistung und passenden Raumverhältnissen können die Gase noch glühend die Oberfläche erreichen; es tritt sogenannte Kaminbildung ein mit ihren Gefahren durch Zündung explosiver Gasgemische. Da die Entstehung der Gasblase eine sehr rasche ist (einige hundertstel Sekunden), und wegen des labilen Charakters des Lichtbogens entstehen im Oele Druckstösse von oszillierendem Charakter mit teilweise hohen Frequenzen, welche im allgemeinen unschädlich sind und sich gegen aussen nicht stark bemerkbar machen. Dies ist in groben Zügen das Bild, wie es von Bauer beschrieben wurde und bei der damals in der Beznau zur Verfügung stehenden kleinen Leistung experimentell untersucht werden konnte.

Fragen wir uns nun, wie ändert sich das Bild des innern Vorganges, wenn wir mit einem gegebenen Schalter immer grössere Leistungen abschalten.

Die Vorstellung, dass an jedem Lichtbogen mehrere kleine Blasen infolge ihres Auftriebes an die Oberfläche steigen und sich dabei abkühlen, kann bei grossen Leistungen nicht aufrecht erhalten werden. Das geht schon hervor aus der Grösse, welche diese Blasen annehmen müssten. Wir gewinnen einen Ueberblick über die Verhältnisse, wenn wir für ein Beispiel die entwickelte Gasmenge bestimmen, was durch eine einfache Rechnung, allerdings auf Grund sehr roher Schätzungen, möglich ist.

Bauer hat bei seinen Versuchen gefunden, dass pro 1 kWsec Schalterarbeit ca. 50 cm^3 = 0,05 l Gas entstehen. Versuche von Brown Boveri haben übrigens diese Zahl annähernd bestätigt. Die Schalterarbeit anderseits kann, ebenfalls nach Bauer, bestimmt werden als

$$A = c \frac{J_a V_a}{1000} t \text{ kWsec}$$

wobei c eine Konstante, $\frac{J_a V_a}{1000}$ die Abschaltleistung (einphasig) in kVA und t die Lichtbogendauer bedeutet.

Die Konstante c ergab sich zu ca. 0,07, mit einer Tendenz zum Steigen bei grössern Leistungen. Von Brown Boweri erhaltene Resultate bei grossen Leistungen lassen tatsächlich auch auf bedeutend höhere Werte schliessen. Es kann schätzungsweise mit ca. 0,2 gerechnet werden.

Nehmen wir als Beispiel eine Abschaltleistung (bei Kurzschluss) von 50000 kVA für einen einpoligen Schalter und eine Lichtbogendauer von 0,05 sec, so ergibt sich zunächst eine Schalterarbeit von

$$A = 0{,}2 \cdot 50000 \text{ kVA} \cdot 0{,}05 \text{ sec} = 500 \text{ kWsec}$$

und damit eine Gasmenge von

$$500 \cdot 0{,}05 \text{ l} = 25 \text{ Liter.}$$

Dies ist die Gasmenge, welche nach der Abschaltung, unter normalem Druck und bei Raumtemperatur gemessen, vorhanden ist. Während des Abschaltvorganges, solange die Gase direkt den Lichtbogen umgeben, stehen dieselben aber unter ausserordentlich hohen Temperaturen und nehmen deshalb ein entsprechend grösseres Volumen ein. Dazu kommt, dass im heissen Zustand auch Oeldämpfe vorhanden sind, welche gar nicht mitbestimmt werden, da sie sich bereits vorher kondensieren. Ueber die Höhe der Gastemperaturen und den Dampfgehalt des Gases besitzen wir leider keine Kenntnisse. Um trotzdem ein rohes Bild von der Gasentwicklung im Schalter während der Abschaltung zu gewinnen, machen wir darüber Annahmen und schätzen die mittlere Temperatur zu 1200° C und den Dampfgehalt zu 50 % des Gasvolumens, womit sich folgendes ergibt:

Das Volumen wächst, vorläufig immer konstanten Druck vorausgesetzt, proportional der absoluten Temperatur. Die Raumtemperatur kann ca. 300° absolut gesetzt werden, so dass das Gasvolumen heiss $\frac{300 + 1200}{300} = 5$ mal grösser wird als kalt. Mit 50 % Dampfgehalt wird dann das Volumen des heissen Gas- und Dampfgemisches $5 \times 1{,}5 = 7{,}5$ mal so gross wie die kalt gemessene Gasmenge. Im gewählten Beispiel würde demnach im Abschaltmoment ein Gemischvolumen vorhanden sein von

$$7{,}5 \times 25 \text{ l} = \textit{rund 200 l.}$$

Die Grösse dieser Zahl überrascht. Sie stellt der Grössenordnung nach den totalen Inhalt eines Schalters dar, welcher für die maximal zulässige Abschaltleistung von 50000 kVA gebaut ist.

Daraus geht ohne weiteres hervor, dass mit der Vorstellung von einzelnen an die Oeloberfläche steigenden Gasblasen, welche bei kleinen Leistungen so vorzügliche Dienste versah, nichts mehr anzufangen ist, und wir wollen versuchen, das Bild des Vorganges bei der Abschaltung so abzuändern, dass es mit Rechnung und Beobachtung besser übereinstimmt.

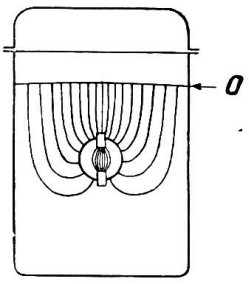

Fig. 2.
Strömungslinienbild in der beschleunigten Oelmasse während der Entwicklung der Gasblase.
O = Oelniveau.

Da ist zunächst zu berücksichtigen, dass die grosse, soeben ausgerechnete Gasmenge in der kurzen Zeit von einigen hundertstel Sekunden entsteht, d. h. die um den Lichtbogen sich bildende Gas- und Dampfsphäre vergrössert sich rapid und das umgebende Oel muss entsprechend rasch ausweichen. Zur Erzeugung dieser Oelbewegung sind aber starke Beschleunigungskräfte notwendig. Diesen gegenüber sind die Auftriebskräfte vernachlässigbar; es genügt zu vergleichen, dass während der Lichtbogendauer von 0,05 Sekunden die im freien Fall zurückgelegte Wegstrecke nur 1,2 cm beträgt, währenddem in dieser Zeit durch Beschleunigung des Oeles Platz geschaffen werden muss für das ganze Gasvolumen. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass die *ganze Entwicklung der Gassphäre* im Schalter praktisch als ein *reiner Beschleunigungsvorgang* zu betrachten ist. Die Oelbewegung während der Entstehungszeit der Gasblase kann dann durch ein Strömungslinienbild dargestellt werden, ähnlich Fig. 2, bei welcher das Gasvolumen im Anfangszustand kugelförmig angenommen ist.

Aus dem Verlauf der Strömungslinien ist anderseits zu schliessen, dass die Gasblase anfänglich tatsächlich ungefähr kugelförmige Gestalt beibehält.

Entsprechend der Volumenvermehrung der Gaskugel unter Oel muss der Oelspiegel steigen. Das Strömungslinienbild zeigt, dass die ganze Niveaufläche und nicht nur ein Teil davon sich hebt, wenn auch nicht gleichmässig. Die Verteilung ist übrigens dieselbe wie bei einer Explosion unter Wasser oder im Erdboden, wobei bekanntlich stets ein ganzer Trichter in die Höhe geworfen wird. Die Entwicklung der Gasblase innerhalb einiger hundertstel Sekunden ist auch tatsächlich ein explosionsartiger Vorgang. Im Schalter, dessen Oelfläche seitlich durch die Wände begrenzt ist, ist das Aufwerfen des Oeles noch geschlossener als an freier Oberfläche; noch viel mehr ist das der Fall, wenn die Gasentwicklung auf mehrere Unterbrechungsstellen verteilt ist. Der Vorgang, für nur einen Lichtbogen im Schalter, ist in Fig. 3 dargestellt, welche allerdings auf Genauigkeit keine Ansprüche erhebt.

Enthält der Schalter z. B. zwei Unterbrechungsstellen, so wird im allgemeinen die Gasproduktion der Lichtbogen sich zu einer einzigen Blase entwickeln, welche die Kontakte einschliesst.

Beim Steigen des Oelspiegels *wird die im Schalter befindliche Luft durch die Expansionsöffnungen hinausgedrückt,* und das Oel steigt so lange, bis überhaupt keine Luft mehr im Schalter vorhanden ist. Gasblase und Luft im Schalter kommen also während des ganzen Vorganges nie in Berührung, sie sind stets durch eine Oelschicht getrennt, welche die Rolle eines beweglichen Kolbens übernimmt. *Diese Tatsache ist ausserordentlich wichtig für die Sicherheit des Schalters, da sie die Entstehung von Gasexplosionen,* sei es durch Mischen der Gasblase mit der Luft, sei es durch Zünden eines im Luftraum bereits vorhandenen Gasgemisches durch Berührung mit den glühenden Lichtbogengasen *verhindert.*

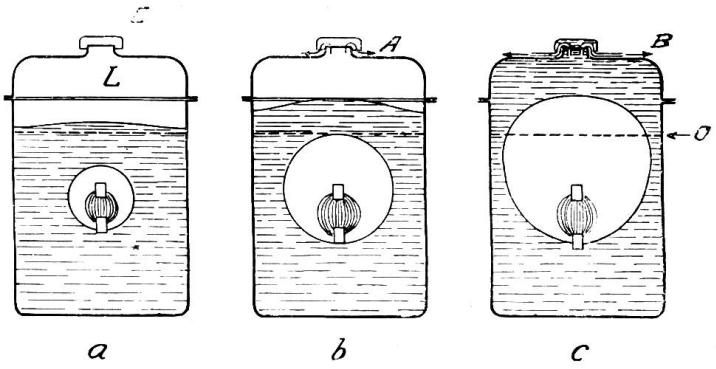

Fig. 3.
Entwicklung des Gasvolumens nach der „Oelkolbentheorie".

O = Oelniveau vor der Schaltung.
L = Luftraum des Schalters.
E = Expansionsöffnung.
A = Ausgestossene Luft.
B = Ausströmendes Oel.

Die Figur ist schematisch aufzufassen, durch die Konstruktionsteile des Schalters wird der gleichmässige Verlauf gestört, aber nicht so, dass er in seinem Wesen verändert würde.

Der beschriebene Verlauf der Vorgänge im Schalter erklärt auch die aus der Erfahrung bekannte und durch Versuche mit grossen Leistungen bestätigte Tatsache, dass ein Schalter noch betriebssicher schalten kann bei Leistungen, welche weit über derjenigen liegen, welche nach den Bauerschen Versuchen zur „Kaminbildung", d. h. Heraustreten heisser, zündungsfähiger Gasblasen aus dem Oel, führen müsste. Die Möglichkeit, dass bei einer kleineren als der maximal zulässigen Leistung Kaminbildung auftreten kann, bleibt bestehen; es ist Sache des Konstrukteurs, die Verhältnisse so zu wählen, dass eine „kritische Leistung" nicht besteht.

Die beschriebene Entwicklung des Gasvolumens im Schalter gibt uns aber noch weitere Auskünfte über Wirkungen des Abschaltlichtbogens im Schalter, welche bisher nicht befriedigend erklärt werden konnten. Wir wollen nun schrittweise den weiteren Verlauf des Vorganges verfolgen und speziell kontrollieren, wie die Wirkungen des Vorganges übereinstimmen mit den oben beschriebenen Beobachtungen am Schalter bei schweren Abschaltungen.

Zunächst ist zu erkennen, dass *das über der Gasblase liegende Oel* (der Oelkolben) *mit bedeutender Geschwindigkeit gegen den Schalterdeckel geworfen wird.* Beträgt z. B. die Höhe von Oelniveau bis Deckel 20 cm und wird in 0,03 Sekunden zurückgelegt, so prallt das Oel mit einer Geschwindigkeit von ca. 13 m/sec auf

den Deckel auf. Die Wirkung kann diejenige eines Hammerschlages sein, welcher für den Deckel gefährlich werden kann. Die im Schalter befindlichen Konstruktionsteile können die Schlagwirkung abschwächen, unter Umständen durch reflexions- und brandungsähnliche Erscheinungen aber auch verstärken.

Der Oelanprall erklärt uns zwanglos *das beobachtete Aufspringen des Schalters* vom Boden bei schweren Abschaltungen. Es kann sogar rechnerisch verfolgt werden und stimmte bei Versuchen mit ca. 50 000 kVA Abschaltleistung tatsächlich gut mit der Beobachtung überein.

Von dem Augenblick an, in welchem alle Luft aus dem Schalter hinausgedrückt worden ist, tritt Oel vor die Expansionsöffnungen. Besteht im Schalter Ueberdruck, so wird dasselbe mit einer Geschwindigkeit, welche der Druckhöhe entspricht, ausströmen. Wegen der grossen Masse ist aber die Ausströmgeschwindigkeit viel geringer als diejenige der Luft, deshalb bildet das ausgeströmte Oelvolumen stets einen vernachlässigbaren Betrag im Vergleich mit dem erzeugten Gasvolumen. Ist der Abschaltvorgang in diesem Zeitpunkt noch nicht beendigt, und dies ist im allgemeinen der Fall, so wird weiter Gas produziert. Die Gasblase, welche jetzt genau das gleiche Volumen einnimmt wie vor der Abschaltung die Luft im Schalter, kann sich aber wegen des besprochenen Oelabschlusses an den Expansionsöffnungen praktisch nicht mehr vergrössern. *Die Folge davon muss unvermeidlich eine Drucksteigerung in der Gasblase und damit im ganzen Schalter sein.*

Auf Grund der gemachten Ueberlegungen müsste es auch, sofern die Gasmenge im heissen Zustand genügend genau bekannt wäre, ohne weiteres möglich sein, *die Grösse des entstehenden Druckes zu bestimmen.* Sie ergibt sich durch die Forderung, dass die gesamte entwickelte Gasmenge im heissen Zustand Platz haben muss in einer Gasblase, deren Volumen gleich ist dem Luftvolumen im Schalter.

Im obigen Beispiel eines Schalters mit 50 000 kVA Abschaltleistung und mit den damals gemachten Annahmen über Temperatur und Dampfgehalt ergab sich das entwickelte Volumen im heissen Zustand zu ca. 200 l, auf atmosphärischen Druck bezogen. Der Luftinhalt des Schalters möge 40 l betragen, dann finden wir am Ende der Lichtbogendauer eine Gasmenge von 200 l auf 40 l komprimiert vor. Der entstehende Druck ist nach dem Mariotteschen Gesetz umgekehrt proportional den Volumina, in unserem Falle also:

$$\frac{200}{40}\,1\ \mathrm{kg/cm^2} = 5\ kg/cm^2\ absolut.$$

Dieser Druck beansprucht sowohl den Oelkessel als den Deckel und die Verschraubung zwischen beiden, halten diese Teile dem Druck nicht Stand, so wird der Schalter explodieren. *Wir erkennen* als Folge der beschriebenen Entwicklung der Gasblase *eine zweite Ursache von Schalterexplosionen,* welche mit der explosiblen Verbrennung der Gase nichts zu tun hat. Dieser Vorgang der Druckerzeugung ist der gleiche wie in jedem Dampfkessel, durch Wärmezufuhr wird ein Teil der Flüssigkeit verdampft oder vergast, die dadurch entstehende Vermehrung des Raumbedarfes hat inneren Druck zur Folge.

Der durch die Lichtbogengase erzeugte Druck kann übrigens auf den Verlauf des Lichtbogens zurückwirken, da die Lichtbogenspannung und der Löschvorgang vom Druck abhängig sind.

Die Beanspruchung des Schalters durch den Gasdruck tritt nicht gleichzeitig auf mit der Beanspruchung des Deckels durch den Aufprall des Oeles, und ebenfalls nicht gleichzeitig mit den Druckstössen im Oel, welche während der Vergrösserung der Gasblase durch die Beschleunigung des Oeles entstehen und welche nur den Kessel beanspruchen.

Schalterkessel mit ebenen Wänden oder Böden werden durch die inneren Ueberdrucke oft eine teilweise bleibende, teilweise elastische Ausbiegung erfahren. Diese bringt für den Schalter keine Gefahr mit sich, im Gegenteil, erst im aus-

gebogenen Zustand erreichen solche Wände ihre volle Festigkeit. Anderseits wirkt die Ausbiegung günstig, weil sie im Moment der Abschaltung das innere Schaltervolumen vergrössert und dadurch die Höhe des Druckes reduziert.

Der grösste Gasdruck besteht am Ende der Lichtbogendauer. Das Bild im Schalter in diesem Moment ist durch Fig. 3c dargestellt.

Da oben am Schalterdeckel sich nur Oel befindet, wird *aus den Expansionsöffnungen ein Strahl von Oel* mit dem vollen im Schalter herrschenden Druck hinausgepresst. Bei 4 kg/cm² Ueberdruck erreicht dieser Strahl eine *Geschwindigkeit von ca. 30 m/sec* und müsste theoretisch imstande sein, 40 m in die Höhe zu steigen. Die Heftigkeit des Strahles ist also gleich derjenigen des Wasserstrahles aus dem Hydranten der Feuerwehr, in Uebereinstimmung mit den beobachteten Wirkungen.

Es wird solange Oel ausgeworfen, als die Oelschicht unter dem Schalterdeckel besteht. Diese Schicht befindet sich in labilem Gleichgewicht und wird deshalb unter der Wirkung der Schwerkraft zu fallen beginnen. Sie kann aber nicht als Ganzes fallen, sondern nur an einzelnen Stellen, während an andern Stellen die Gasblase infolge ihres Auftriebes zu steigen beginnt. Im Zeitpunkt, in welchem alles vor den Expansionsöffnungen liegende Oel heruntergefallen resp. die Gasblase aufgestiegen ist, ist der Oelauswurf beendigt, die Zeitdauer dieses Umsatzvorganges ist also massgebend für die Dauer und damit auch für die Menge des ausgeworfenen Oeles. Zahlen über ihre Grösse sind leider nicht bekannt, dafür fehlen Versuche, auf Grund von Ueberlegungen lässt sich immerhin sagen, dass es sich um einige Zehntelsekunden handeln muss. Den besten Aufschluss darüber würden übrigens Abschaltversuche mit grossen Leistungen geben, bei welchen die äusseren Vorgänge am Schalter kinematographisch festgehalten werden.

Es folgen demnach aus der aufgestellten Gasblasentheorie die weiteren Schlüsse:

Ein Auswerfen von Oel kann bei grossen Abschaltleistungen nicht verhindert werden. Die oft beobachtete *Heftigkeit des Oelstrahles ist erklärt. Die Grundlagen zur Bestimmung der ausgeworfenen Oelmenge sind gegeben.* Es fehlen noch die experimentellen Konstanten dazu.

Eine Frage für sich ist die Sammlung und Zurückführung des ausgeworfenen Oeles durch besondere Oelabscheider. Die europäische Praxis hat bisher meistens davon abgesehen. Uebrigens sind die ausgeworfenen Mengen trotz der Heftigkeit des Vorganges nur mässige (bei schweren Schaltungen einige Liter), weil die Ausströmung nur einige Zehntelsekunden dauert.

Im Interesse geringen Oelauswurfes wird man die Expansionsöffnuugen möglichst klein halten. Ihre minimale Grösse ist gegeben durch die Bedingung, dass die im Schalter enthaltene Luft in genügend kurzer Zeit entweichen kann. Unter der Voraussetzung, dass die entwickelte Gasmenge im heissen Zustand bekannt ist (wozu noch Versuche notwendig sind), *lässt sich also die Grösse der notwendigen Expansionsöffnungen bestimmen.* Es würde zu weit führen, an dieser Stelle Genaueres über diese Rechnung anzuführen.

Vom Augenblick der Lichtbogenlöschung an, bis zum Aufstieg der Gasblase an die Expansionsöffnung erleiden die Gase einen gewissen Wärmeverlust. Infolgedessen wird der Druck etwas sinken. Im allgemeinen wird aber doch auch nachher noch ein starker Ueberdruck bestehen, so dass im Moment, wo die Gasblase die Expansionsöffnung erreicht, *ein Teil der Gase mit Gewalt auspufft,* ganz analog dem Explosionsmotor im Moment der Oeffnung des Auspuffventils. Teile von mitgerissenem Oel werden durch diese heftigen Gasströme zerstäubt. Tatsächlich sind schon Strahlen von feinem Oel bis zu mehreren Metern Länge beobachtet worden, in einem Fall gelang es sogar, dieselben sehr schön zu photographieren, Fig. 4 zeigt die Aufnahme. Der dabei mit starken Kurzschlussabschaltungen probierte Schalter besitzt Expansionsöffnungen mit gefederten Abschlussklappen, welche so wirken, dass der Auspuff allseitig radial erfolgt, die entstandene horizontale Scheibe von zerstäubtem Oel hat etwa 5 m Durchmesser.

Die ausströmenden Gase sind aber auch noch heiss und können sich deshalb beim Austritt in die Aussenluft entzünden. Selbst wenn sie durch ihre Expansion beim Austritt unter die Entzündungstemperatur abgekühlt werden sollten, ist eine Entzündung durch mitgerissene, glühende Metallteilchen denkbar. Die Folge davon ist eine kurze, stichflammenartige Feuererscheinung, welche wegen ihrer kurzen Dauer vollständig unschädlich ist. Im Schalterinnern tritt selbstverständlich kein Feuer auf, weil dort nur reines Gas ohne Luft vorhanden ist. Nach Ausgleich der Druckdifferenzen kann dieses Gas eventuell je nach Anordnung der Oeffnungen ausströmen und ruhige, mehrere Sekunden dauernde, leuchtende Flammen bilden. Dieselben wirken vielleicht durch ihren Anblick erschrekkend, schaden aber weiter nichts. Sie sind sogar der einwandfreie Beweis dafür, dass im Innern des Schalters sich nur reines, wegen Luftmangel nicht entzündbares Gas befindet. Es muss aber vermieden werden, dass die Flammen an die Isolatoren schlagen, weil sie leitend sind und deshalb Ueberschläge einleiten können.

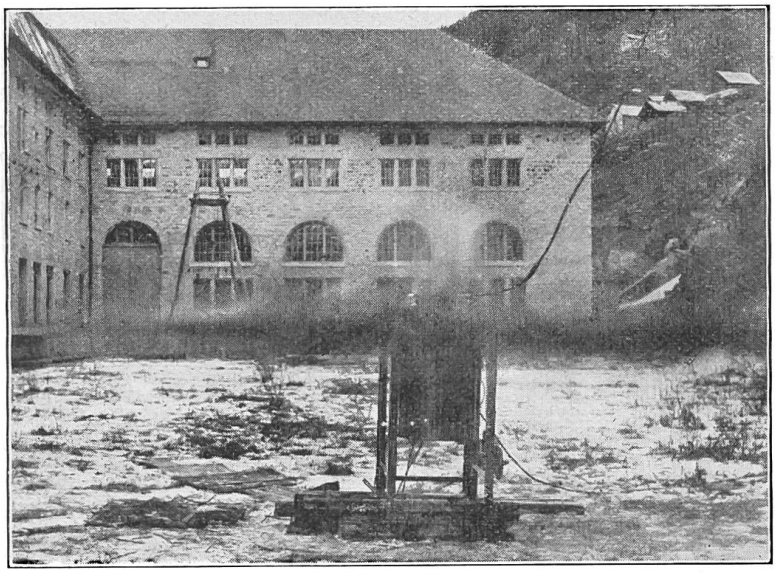

Fig. 4.
Auspuff der Gase mit zerstäubtem Oel bei Abschaltung eines Kurzschlusses von ca. 60000 kVA Abschaltleistung.

Treten die Gase nicht brennend aus, so erscheinen sie in Form schwarzer Rauchwolken. Es wurde schon früher erwähnt, dass dieselben ebenfalls Ueberschläge an den Isolatoren einzuleiten vermögen.

Nach beendigtem Abschaltvorgang ist der Luftraum des Schalters im allgemeinen mit reinem Gas gefüllt. Durch weitere Abkühlung oder durch Zirkulation kann nachher Luft dazu treten, so dass mit dem Vorhandensein eines explosiblen Gemisches in jedem beliebigen Verhältnis gerechnet werden muss.

Der Uebersichtlichkeit halber seien nachstehend die Wirkungen des Abschaltlichtbogens im Oelschalter, wie sie sich auf Grund der hier entwickelten „Oelkolben-Theorie“ und der daran geknüpften Ueberlegungen bei grossen Abschaltleistungen ergeben, nochmals kurz zusammengefasst:

Die entwickelte heisse Gas- und Oeldampfmenge ist so gross, dass sie unter Normaldruck etwa den Raum des ganzen Schalters einnehmen würde. Die Volumenentwicklung geht nach den Beschleunigungsgesetzen in Form einer einzigen Blase vor sich. Durch die Oelbeschleunigung entstehen Ueberdrücke im Oelkessel. Ueber dem Gas bleibt ein Oelkolben bestehen, welcher aufsteigt und die Luft aus dem Schalter drückt, wodurch die Gefahr von Gasexplosionen beseitigt wird. Durch den Aufprall des Oelkolbens entsteht ein Schlag auf den Schalterdeckel. Die Gasblase kann kein grösseres Volumen einnehmen als vorher die Luft im Schalter, alles mehr produzierte Gas erzeugt Ueberdruck im ganzen Schalter, für welchen die Festigkeit aller Teile bemessen sein muss. Aus den Expansionsöffnungen strömt zunächst die im Schalter enthaltene Luft, nachher ein Strahl von Oel unter dem vollen inneren Ueberdruck, sodann pufft das Gas aus, entweder mit Stichflamme oder als Rauchstrahl. Zum Schluss treten ruhige, leuchtende Flammen, oder dann dicke Rauchwolken aus.

Alle nach diesen Ueberlegungen auftretenden äusseren Erscheinungen beim Abschaltvorgang decken sich qualitativ vollständig und quantitativ, soweit zu beur-

teilen, ebenfalls mit den bei vielen Versuchen mit grossen Abschaltleistungen gemachten Beobachtungen.

Die maximal zulässige Abschaltleistung ist begrenzt durch die Festigkeit der Schalterkonstruktion gegenüber den beschriebenen inneren Drücken. Es muss darauf geachtet werden, dass nicht bei einer kleineren als der maximal zulässigen Leistung durch Kaminbildung Gasluftgemische über dem Oel gezündet werden können. Oelauswurf und Flammenbildung begrenzen die zulässige Abschaltleistung nicht.

Für die zahlenmässige Behandlung des ganzen Vorganges fehlen heute noch:

Die Kontrolle der Bauerschen Konstanten für Schalterarbeit und Gasmenge im kalten Zustand bei grossen Abschaltleistungen. Sichere Kenntnisse über die Grösse des Gasvolumens im heissen Zustand, resp. dessen Temperaturen und Dampfgehalt. Kenntnisse über die Zeiten, welche die Gasblase zum Aufsteigen, resp. der Oelkolben zum Zerfallen braucht.

Alle diese Zahlenwerte können nur auf experimentellem Wege erhalten werden.

Mit ihrer Hülfe können dann aber die hauptsächlichen konstruktiven Daten eines Schalters für gegebene Abschaltleistung vorausberechnet werden, wie Druckbeanspruchungen, Grösse des Luftraumes, Grösse der Expansionsöffnungen, ferner die pro Schaltung ausgeworfene Oelmenge. Die Vorausberechnung dieser Daten, oder wenn die Aufgabe umgekehrt gestellt wird, die Berechnung der maximal zulässigen Abschaltleistung für einen gegebenen Schalter, ist wohl heute ein dringender Wunsch aller Schalterkonstrukteure, die Beschaffung der Unterlagen dafür ist deshalb gegenwärtig als eine der wichtigsten Aufgaben des Schalterbaues zu bezeichnen.

5. Einfluss elektrischer und konstruktiver Daten auf den Abschaltvorgang. Die elektrischen Daten bestimmen die *Wahl* der Schalter, während die konstruktiven Daten die Grundlagen für *den Bau derselben* bilden.

Die Bauersche Arbeit behandelt diese Einflüsse zum Teil sehr ausführlich (Bulletin 1915, Seite 165 bis 199); die dort gemachten Angaben sind heute noch gültig. Dieser Abschnitt soll deshalb mehr eine kurze Uebersicht geben mit einigen Ergänzungen entsprechend unseren heutigen Kenntnissen der Vorgänge.

Abschaltspannung und Abschaltstromstärke ergeben die *Abschaltleistung* und sind in erster Linie, aber nicht allein massgebend für die Beanspruchung eines Schalters. Für die rechnerische Behandlung von Schalterproblemen wird die Abschaltleistung am besten stets auf einen Schalterpol bezogen, d. h. als Abschaltspannung ist die „beanspruchende Spannung pro Schalterpol" einzusetzen (siehe darüber die Richtlinien Seite 215/6).

Grosse Spannung ergibt grosse Lichtbogenlänge (vergl. Fig. 1), während grosser Strom mehr den Querschnitt des leitenden Gasstranges und wahrscheinlich dessen Temperaturen vergrössert, die Wirkungen des Vorganges äussern sich entsprechend kürzer, aber heftiger.

Die Abschaltleistung allein ohne Kenntnis der beanspruchenden Spannung stellt kein genaues Mass für die Beanspruchung eines Schalters dar. Welcher Art der Einfluss der Spannung ist, darüber sind allerdings die Meinungen noch geteilt, innerhalb kleiner Grenzen kann derselbe aber sicher vernachlässigt werden. Brown Boveri gibt auf Grund ihrer Erfahrungen die zulässige Abschaltleistung innerhalb des ganzen Spannungsbereiches, für welches ein Schalter überhaupt in Betracht kommt, konstant an.

Die *Phasenverschiebung* zwischen Strom und Spannung im Abschaltmoment, d. h. die Grösse der Induktivität oder Kapazität im Stromkreis wirkt in dem Sinne, dass Nacheilung des Stromes die Löschung des Lichtbogens erschwert, Voreilung erleichtert. Anhand von Fig. 1 lässt sich leicht verfolgen, wie der Momentanwert der Spannung zur Nullzeit des Stromes sich mit der Phasenverschiebung ändert und auf die Löschung einwirkt. Bei Angaben über Abschaltleistungen ohne Nennung des $\cos\varphi$ ist immer der schwerste Fall, d. h. annähernd 90^0 Nacheilung verstanden

(siehe auch Richtlinien Seite 214/5, 3. Absatz), welcher allein interessiert, da er bei Kurzschlüssen auftritt.

Die *Kurvenform der induzierten Spannung* bestimmt den Momentanwert der Spannung der Nullzeit des Stromes und beeinflusst dadurch die Löschung. Bei Abschaltung induktiver Ströme verläuft der Vorgang um so schwerer, je spitziger die Kurve ist. Bei allen Angaben über Schalterbeanspruchungen, wo nichts besonders bemerkt ist, wird praktisch reine Sinusform vorausgesetzt.

Die *Frequenz* hat einen Einfluss auf den Löschvorgang, und zwar geschieht die Löschung leichter bei kleiner Frequenz, weil dabei die Zeit der Existenzunmöglichkeit des Lichtbogens beim jedesmaligen Nullwert des Stromes grösser ist und weil die sogenannte Lichtbogen-Hysteresis, welche aus der Wärmeträgheit hervorgeht, weniger zur Geltung kommt. Anderseits kommen aber bei kleiner Frequenz weniger Nullmomente vor, so dass die Gelegenheit zum Löschen seltener auftritt, woraus eine Verlängerung entstehen kann. Bei an und für sich kleiner Lichtbogendauer ist deshalb von der Verkleinerung der Frequenz eine Erschwerung, bei grosser Lichtbogendauer eine Erleichterung des Abschaltvorganges zu erwarten. Wo die Grenze zwischen gross und klein gezogen werden muss und wie gross der Einfluss ist, lässt sich mit dem heute bekannten Versuchsmaterial nicht entscheiden.

Ueber *Grösse, Form und Material der Löschkontakte* ergaben die Versuche Bauers und andere, worunter eine grosse Reihe von Brown Boveri ausgeführte, dass massige Kupferkontakte ohne scharfe Kanten die besten Abschaltbedingungen ergeben.

Grosse *Schaltgeschwindigkeit* verkürzt die Lichtbogendauer und verbessert damit den ganzen Abschaltvorgang.

Die *Mehrfachunterbrechung* verkleinert Lichtbogendauer, Schalterarbeit und Gasmenge, ausserdem verteilt sie die Gasentwicklung auf mehrere Lichtbogen und erleichtert dadurch die Abschaltung. Ihr Nutzen kommt bei hohen Spannungen besonders stark zur Geltung. Der beliebigen Vermehrung der Kontaktstellen sind aus naheliegenden konstruktiven Gründen Grenzen gezogen, es gehört viel Erfahrung dazu, um für gegebene Verhältnisse die beste Lösung zu finden.

Statischer Druck im Oel ergab nach den Bauerschen Versuchen bei ca. 100 A, 8000 V und 7 kg/cm² Ueberdruck eine bedeutende Verschlechterung des Abschaltvorganges in jeder Beziehung. Versuche von Brown Boveri, mit ca. 500 A, 1400 V induktiv, bestätigten das Resultat, bei 7 kg/cm² wurde die Lichtbogenlänge ca. 70 % grösser, die Schalterarbeit stieg auf das 5fache und die Gasmenge sogar auf mehr als das 20fache. Erhöhung des Druckes bis ca. 50 kg/cm² vermöchte das Ergebnis nicht in ein günstiges zu verwandeln. Die vielfach behauptete Ansicht, dass grosse Drucke den Abschaltvorgang erleichtern, konnte also durch diese Versuche nicht bestätigt werden.

Die *Beschaffenheit des Oeles* ist, soweit sie unter den praktisch verwendeten Oelsorten schwankt, ohne wesentlichen Einfluss. Insbesondere spielt die Durchschlagsfestigkeit für den Abschaltvorgang keine Rolle, da ja der Lichtbogen in einer Gassphäre brennt. Feuchtigkeit, Staubgehalt, starke Verschlammung durch viele Abschaltungen interessieren mehr vom Isolationsstandpunkt aus, besonders weil dadurch leitende Brücken längs den Isolierteilen eingeleitet werden können. Die Viskosität innerhalb normaler Grenzen ist ebenfalls ohne Bedeutung, dagegen muss Abkühlung des Oeles unter seinen „Stockpunkt" vermieden werden, weil dadurch die Schalterbewegung gehemmt und die Kühlung des Lichtbogens und dadurch die Löschwirkung verschlechtert wird.

Die *Verwendung von Löschwiderständen* ist ein Mittel zur Erleichterung des Abschaltvorganges. Die Theorie der Wirkung solcher Widerstände ist von Bauer im Bulletin 1916, Seite 85—112 ausführlich behandelt worden. Der Verlauf einer Abschaltung mit Löschwiderständen ist in den Fig. 5a und 5b für die beiden Schaltstufen dargestellt, wobei angenommen ist, dass der Ohmwert des Widerstandes relativ

gross ist gegenüber der Impedanz des Kurzschlusstromkreises und dass die beiden Stufen nacheinander ausschalten. Als Stufe I (Fig. 5a) ist diejenige bezeichnet, welcher der Widerstand parallel liegt.

Man beachte den stark verschiedenen Anstieg der Spannung nach der Löschung an Stufe I, welche ohne Widerstand nach der punktierten Linie 7, mit Widerstand nach 4 verläuft. Auf dem verlangsamten Anstieg beruht die günstige Wirkung des Widerstandes, weil die Lichtbogengase Zeit haben um sich abzukühlen. Aus der Fig. 5a geht auch der starke, günstige Einfluss der Lichtbogenspannung vor der Löschung, resp. deren Spitze im Löschmoment, welche gleich der Zündspannung in diesem Augenblick ist (mit 3 bezeichnet) hervor. Dieser Einfluss ist in der Bauerschen Behandlung nicht berücksichtigt, was die Erklärung dafür geben mag, dass seither vorgenommene Versuche ein günstigeres Resultat ergaben als die Theorie erwarten liess. Brown Boveri probierte einen solchen Schalter mit verschieden grossen Widerständen mit einer dreiphasigen Abschaltleistung von ca. 26000 kVA bei 6000 V und erhielt für die Lichtbogenlänge und die Schalterarbeit die Resultate, die in den Fig. 6 und 7 dargestellt sind.

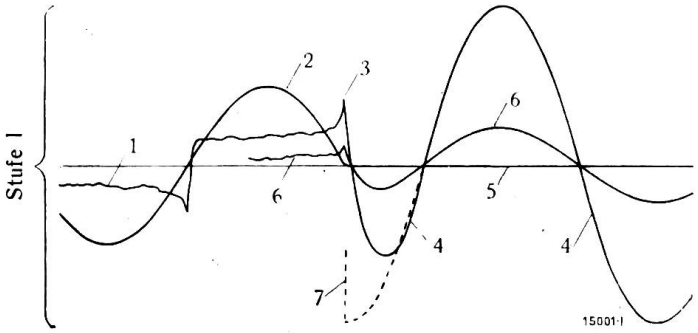

Fig. 5a.

Verlauf von Spannung und Strom an Stufe I bei einer Kurzschlussabschaltung mit Löschwiderstand.

1 = Lichtbogenspannung.
2 = Strom im Lichtbogen.
3 = Zündspannung im Löschmoment.
4 = Spannung an Elektroden und Widerstand.
5 = Strom im Lichtbogen = 0.
6 = Strom im Widerstand.
7 = Spannungsverlauf ohne Widerstand.

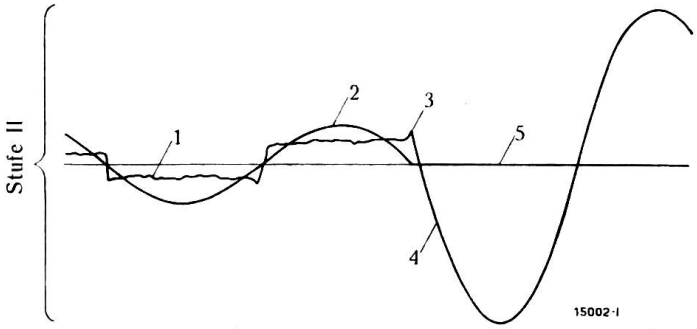

Fig. 5b.

Verlauf von Spannung und Strom an Stufe II bei einer Kurzschlussabschaltung mit Löschwiderstand.

1 = Lichtbogenspannung.
2 = Strom, welcher den Widerstand durchfliesst.
3 = Löschmoment.
4 = Abschaltspannung.
5 = Strom im Lichtbogen = 0.

Bei Schaltung ohne Widerstand betrug die Lichtbogendauer 0,069 Sekunden und die Schalterarbeit 57 kWsec, letztere kann demnach durch Verwendung eines Widerstandes auf weniger als $^1/_{10}$ verkleinert werden. Der günstigste Wert des Widerstandes ist nach diesen Versuchen mindestens gleich der 8fachen Kurzschlussimpedanz, während die Bauersche Theorie nur den einfachen Wert ergibt. Auf Grund dieser Versuche verwendet Brown Boveri die Schalter mit Löschwiderständen für die 4fache Abschaltleistung wie ohne Widerstände, wobei noch ein grosser Sicherheitsfaktor inbegriffen ist.

Ueber die *Grösse des Luftraumes im Schalter* und der Expansionsöffnungen, sowie die *Druckfestigkeit des Schalters* ist im vorhergehenden Abschnitt gesprochen worden. Wir erkannten, dass diese Grössen für die Arbeitsweise und die Sicherheit eines Schalters von entscheidendem Einfluss sind.

6. Erzeugung von Ueberspannungen. Solche wurden bei Kurzschlussabschaltungen vermutet, konnten aber nicht nachgewiesen werden. Wohl findet im Löschmoment ein plötzlicher Spannungssprung statt, derselbe scheint aber nicht rasch genug zu sein, um eine Sprungwelle zu erzeugen. Ob bei Schaltern, welche mit sehr grossen Drucken arbeiten, die Verhältnisse sich ändern, wie auf Grund gewisser Ueberlegungen vermutet werden kann, müsste durch Versuche festgestellt werden. Die Ueberspannungen, welche unter Umständen entstehen können durch Kurvenverzer-

rung in der 3. Phase von zweiphasig kurzgeschlossenen Generatoren haben natürlich mit dem Schalter nichts zu tun.

Bei der Abschaltung kleiner, induktiver Ströme, wie insbesondere des Leerlaufstromes von Transformatoren oder Motoren sind die Verhältnisse etwas andere. Der von nur wenig Gas umgebene Lichtbogen wird durch das Oel ausserordentlich kräftig gekühlt und wirkt dann unter Umständen als Dudellscher Lichtbogen, welcher in dem aus der Selbstinduktion und Kapazität des Netzes gebildeten Kreis Schwingungen erzeugt, deren Amplitude die Betriebsspannung wesentlich übersteigen kann. Diese Ueberspannungen können stark vermindert werden durch Anwendung von Schutzwiderständen, welche gleichzeitig die Reduktion der Einschaltstromstösse übernehmen können. In welchen Fällen Schutzwiderstände anzuwenden sind, darüber bestehen noch verschiedene Meinungen. Nachdem die neuzeitliche Tendenz dahin geht, die Transformatoren so zu isolieren, dass sie kurzzeitige Ueberspannungen von bedeutender Grösse schadlos zu ertragen vermögen, werden Schutzwiderstände immer mehr entbehrlich, was im Interesse der Einfachheit durchaus zu begrüssen ist.

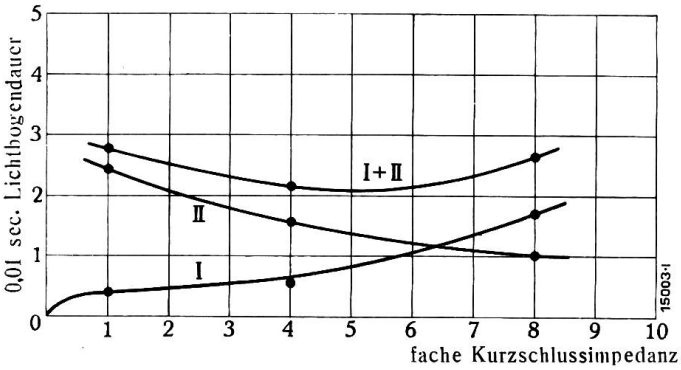

Fig. 6.
Lichtbogendauer bei Abschaltung einer dreiphasigen Kurzschlussleistung von 26000 kVA bei 6000 Volt mit verschiedenen Löschwiderständen.
I = Stufe I.
II = Stufe II.
I + II = Summe von Stufe I und Stufe II.

b) Beim Einschalten.

Besondere Erscheinungen zeigen sich nur beim Einschalten auf bestehenden Kurzschluss, wenn der Anfangskurzschlusstrom einige tausend Ampere übersteigt. Für Zentralenschalter wird dieser Strom schon in Anlagen mit einigen tausend Kilowatt Leistung erreicht, grosse Zentralen können bis ca. 50 000 A Effektivwert ergeben.

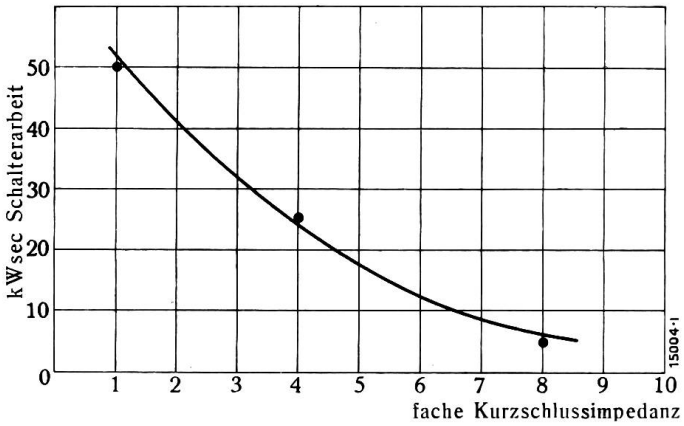

Fig. 7.
Schalterarbeit bei Abschaltung einer dreiphasigen Kurzschlussleistung von 26000 kVA bei 6000 Volt mit verschiedenen Löschwiderständen.

Wir wollen im folgenden die physikalischen Vorgänge betrachten, welche sich beim Einschalten auf sehr grosse Ströme im Schalter und speziell an den Kontakten abspielen.

Beim Einschalten von Hochspannungsschaltern wird im allgemeinen der Stromschluss kurz vor der Berührung der Löschkontakte infolge Durchschlag einer dünnen Oelschicht erfolgen. Es wird sich also von Anfang an ein kleiner Lichtbogen bilden, der aber bedeutungslos ist, nicht nur deshalb, weil er klein ist und sehr kurze Zeit dauert, sondern auch weil der Strom in dieser Zeit nicht auf grosse Weite anzusteigen vermag.

Die nachfolgende Berührung findet sodann, wenn die Löschkontakte nicht mehr neu, sondern mit Brandperlen bedeckt sind, nur an einem einzigen Punkt statt. Dieser übernimmt die Stromleitung solange, bis nach einer weiteren Bewegung der Schaltertraverse um ca. 2 cm die Hauptkontakte zur Berührung kommen, insofern der Schalter überhaupt solche besitzt.

Die durch die sehr grossen Ströme ausgeübten elektrodynamischen Kräfte äussern sich nun auf 2 verschiedene Arten. Zunächst wirken sie auf die beweglichen Leiterteile derart, dass die *Einschaltbewegung der Schaltertraverse gehemmt* wird. Der Schalter kann dadurch in einer Zwischenstellung stehen bleiben, was unter Umständen Stehlichtbogen und Zerstörung des Schalters zur Folge haben kann. Es ergibt sich daraus die Forderung, dass die *Einschaltkraft des Schalterantriebes gross genug* sein muss, um diese Kräfte, welche hunderte von kg betragen können, zu überwinden. Beim Einschalten von Hand kann in solchen Fällen das notwendige Drehmoment nicht erreicht werden, auch ist die Einschaltgeschwindigkeit zu gering, daraus ziehen wir den Schluss, dass *das Einschalten von Hand in Anlagen, welche sehr grosse Kurzschlussströme ergeben, sehr gefährlich ist.*

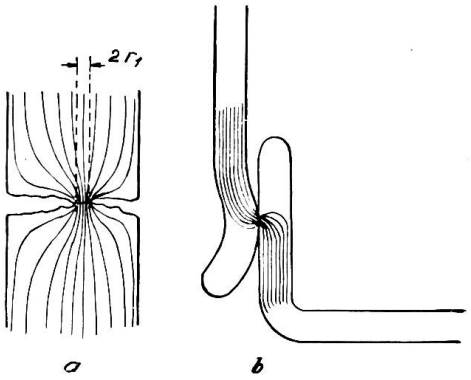

Fig. 8.
Konzentration der Stromlinien an angebrannten Klotz- *(a)* und Schleifkontakten *(b)*.
In der Umgebung der Kontaktstelle wird die magnetische Feldstärke sehr gross.
$2r_1$ = Durchmesser der Kontaktstelle.

Es entstehen sodann Stromkräfte an den Kontakten selbst, welche bestrebt sind, dieselben entgegen dem Druck der Kontaktfedern wieder zu öffnen. Diese Erscheinung der sogenannten *Kontaktabhebung* ist lange unbeachtet geblieben. Die Grösse der abhebenden Kraft an einem Kontaktpaar lässt sich berechnen, sie hängt ausser von der Kontaktform (Klotz-, Schleif-, Bolzen-, Messerkontakte) auch vom Stromübergangsquerschnitt ab und wird umso grösser, je kleiner der Berührungspunkt ist. Diese Wirkung lässt sich erklären durch die an der Kontaktstelle auftretende Konzentration des den Stromfluss umgebenden magnetischen Feldes, welche mit abnehmendem Stromquerschnitt immer stärker wird (siehe Fig. 8). Bei Klotzkontakten in der Anordnung nach Fig. 9 wird z. B. die Abhebkraft pro Kontakt:

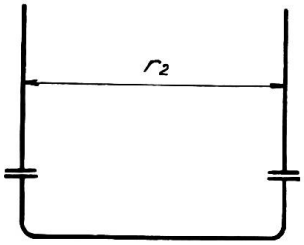

Fig. 9.
Schematische Anordnung der Kontakte eines Schalters.
r_2 = Bolzenabstand.

$$P = J^2 \left(\frac{1}{2} + ln \frac{r_2}{r_1} \right) \frac{1}{9{,}81 \cdot 10^7} \text{ kg} \cdot$$

Die Bedeutung der Abhebkraft zeigt sich am besten an Hand eines *Beispiels.* Der Anfangskurzschlusstrom an den Sammelschienen einer Zentrale von 30 000 kVA und 6 000 Volt betrage 30 000 A Effektivwert, inklusive Sättigungsstoss. Für die Kraftwirkungen ist naturgemäss der grösste Momentanwert massgebend, derselbe wird, wenn der Kurzschluss noch asymmetrisch verläuft ca. $1{,}8 \cdot \sqrt{2} \cdot 30\,000 = 76\,000$ A. Beträgt der Bolzenabstand $r_2 = 25$ cm und der Durchmesser der Kontaktstelle $2r_1 = 0{,}5$ cm, so ergibt sich die Abhebkraft zu *285 kg pro Kontakt.* Der Berührungspunkt wird anfänglich noch viel kleiner sein, bei der ungeheuren Stromdichte wird er aber durch Erhitzung und Erweichung sich vergrössern bevor der Strom seinen ersten Scheitelwert erreicht hat. Im flüssigen oder erweichten Zustand, wie auch beim Bestehen eines Lichtbogens kommt übrigens noch ein in allen flüssigen Leitern wirkender innerer Druck dazu im Betrage von ca. 30 kg.

Zur elektrodynamischen Abhebkraft gesellt sich überdies noch eine solche thermischen Ursprungs, indem durch die rasche Erhitzung an der Kontaktstelle Oelgase und -Dämpfe erzeugt werden, welche einen Ueberdruck zwischen den Kontaktflächen erzeugen.

Auch an den Hauptkontakten treten abhebende Kräfte auf, dieselben sind aber wegen der grossen Kontaktfläche und dem grossen Anpressungsdruck leicht zu beherrschen.

Die Folgen der Abhebung der Löschkontakte beim Einschalten auf Kurzschluss sind die nachstehenden:

Es werden Lichtbogen erzeugt im ersten Moment des Kurzschlusses, also beim grössten Strom, welcher ein vielfaches des zulässigen Abschaltstromes sein kann, also *Ueberbeanspruchung des Schalters,* welche sich zu der normalen Beanspruchung bei der sofort folgenden Auslösung addieren kann. Ist der Schalter bei der Abschaltung des Kurzschlusses schon mit seiner maximal zulässigen Leistung beansprucht, so wird er wahrscheinlich unter diesen Umständen explodieren.

Die Erfahrung bestätigt die gemachten Ueberlegungen. Bei Kurzschlussversuchen mit einem Turbogenerator von 12000 kVA und Drehzahl 3000 wurde an einem Schalter, welcher auf etwa 20000 A nur einzuschalten hatte, eine Schweissnaht des Kastenbodens aufgerissen. Andere Schalter zeigten, dass das Einschalten solcher Kurzschlüsse eine ebenso schwere Beanspruchung darstellt, wie das Abschalten.

Die Abhebung hat sehr häufig ein Verschweissen der Kontakte zur Folge. Das kommt dadurch zustande, dass die Kontakte durch den erzeugten Lichtbogen angeschmolzen werden und, nachdem sie beim Aufliegen der Hauptkontakte stromlos geworden sind, mit flüssiger Oberfläche durch die Kontaktfedern zusammengedrückt werden. *Der Schalter ist nachher nicht mehr imstande auszuschalten.* Bei Versuchen wurden Schweissungen konstatiert, bei welchen die Kontakte nur mit Meissel und Hammer getrennt werden konnten. *Welche gefährliche Folgen das Verschweissen der Kontakte haben kann, zeigt am besten ein Beispiel aus der Erfahrung.* In einem Schalter schweissten bei Abschaltversuchen mit ca. 13000 A Spitzenwert und 15000 Volt einzelne Kontakte, die andern nicht. Die Traverse blieb deshalb hängen, die nicht geschweissten Kontakte bildeten wegen ihrer Abhebung Lichtbögen, welche aber zu kurz waren, um Löschen zu können, sodass sie dauernde *Stehlichtbogen* bildeten, welche eine enorme Gasmenge produzieren mussten. *Das Resultat war die Explosion des Schalters.* Trotz der Zerstörung des Deckels und der inneren Teile durch die Drücke und den nachherigen Oelbrand konnte noch einwandfrei festgestellt werden, welche Kontakte verschweisst waren.

Eine weitere Folge der Abhebung der Löschkontakte ist die Bildung von Brandstellen an den Hauptkontakten, welche dadurch zustande kommt, dass die letzteren im Moment der ersten Berührung, wobei erst ein Punkt aufliegt, sofort den vollen Scheitelwert des Stromes übernehmen können. Die grosse Stromdichte an diesem Punkt, verbunden mit der gerade an dieser Stelle auftretenden Abhebung vermag dann Brandstellen zu erzeugen.

Nochmals kurz zusammengefasst, sind die *Gefahren der elektrodynamischen Kräfte* bei grossen Kurzschlussströmen folgende:

Verhinderung des Einschaltens, mit Bildung von Stehlichtbogen, besonders bei Handantrieb. Ueberbeanspruchung durch Lichtbogenbildung beim Einschalten. Stehlichtbogen beim Ausschalten wegen Verschweissen einzelner Kontakte. Alle drei Möglichkeiten können in schweren Fällen zur Explosion führen.

Dazu gesellen sich noch die Betriebsgefahren: Anbrennen der Hauptkontakte; Hängenbleiben in Einschaltstellung, wenn alle Kontakte geschweisst, wobei die sekundären folgen, Abschmelzen von Kontakten und Verbindungen, weil der Strom dauernd auf den Löschkontakten bleibt, ebenfalls sehr schwere sein können.

Die beschriebenen Wirkungen grosser Kurzschlussströme und ihre Folgen zeigen die Wichtigkeit dieser Frage. Sie erfordern deshalb ein eingehendes Studium. Besonders das Einschalten auf Kurzschluss, wobei der Sättigungsstoss mitwirkt, kann gefährlich werden und es geht daraus hervor, dass bei der Wahl der Schalter der Anfangskurzschlusstrom eine wesentliche Rolle spielen kann (siehe Richtlinien Seite 213/4 unten).

Die *Beseitigung der Kontaktabhebung* erfordert bei grossen Strömen besondere Massnahmen. Bis zu einer gewissen Stromgrenze, welche etwa bei 10000 A Spitzenwert liegen mag, ist es möglich, den Kontaktfederdruck so stark zu machen, dass

er die Abhebkraft aufnehmen kann, wobei der genügende Druck aber schon im ersten Moment der Berührung vorhanden sein muss, d. h. die Federn müssen Vorspannung haben. Wie das weiter oben gerechnete Beispiel zeigt, können bei grossen Strömen die Kräfte hunderte von kg pro Kontakt erreichen, dann ist es natürlich ausgeschlossen, die Federn genügend stark zu machen.

Man hat bisher den Sitz der Abhebkräfte in den Stromführungen zu den Kontakten gesucht und es sind verschiedene Vorschläge gemacht worden, welche die Form des Stromkreises im Schalter so ausbilden wollen, dass keine abhebenden, eventuell sogar anpressende Kräfte entstehen sollen. Ein Beispiel für eine solche Lösung mit Schleifkontakten zeigt schematisch Fig. 10.

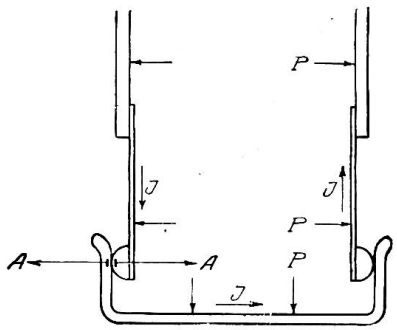

Fig. 10.
Anordnung der Stromzuführungen so, dass ihre Kräfte den Kontaktdruck verstärken.
A = Abhebekraft an der Kontaktstelle.
P = Stromkräfte.
J = Stromrichtung.

Die beiden Kontaktfedern führen umgekehrt gerichteten Strom und stossen sich deshalb ab, wodurch eine anpressende Wirkung auf die Kontakte entsteht. Nun ist aber die abhebende Kraft an der Kontaktstelle selbst, wie oben dargelegt, umso grösser, je kleiner der Stromdurchtrittsquerschnitt ist und bei dem kleinen praktisch vorhandenen Berührungspunkt überwiegt sie die auf die Verbindungen wirkenden Kräfte stark. Daraus geht hervor, dass durch die passende Form und Anordnung der Stromleiter im Schalter eine gewisse Verbesserung, aber keine Beseitigung der Kontaktabhebung erreicht werden kann. Versuche mit verschiedenen solchen Anordnungen haben dies bestätigt, sie haben auch gezeigt, dass Parallelschalten von zwei oder drei Kontakten ebenfalls nichts nützt, da dieselben, wenn sie ungleich abgebrannt sind, nicht gleichzeitig berühren, sodass einer nach dem andern abgeworfen wird.

Brown Boveri löst neuerdings das Problem der Kontaktabhebung dadurch, dass sie ringförmige Klotzkontakte verwendet, von denen jeder mit einem Solenoid aus mehreren Windungen versehen ist. Die beiden Solenoide eines Kontaktpaares ziehen sich an mit einer Kraft, welche dem Quadrat des Stromes proportional ist, wodurch die Abhebkraft, welche ebenfalls mit dem Quadrat des Stromes geht, in jedem Moment kompensiert wird. Versuche haben gezeigt, dass solche Schalter tatsächlich Stromstösse von 100 000 A ertragen ohne jede Lichtbogenbildung und ohne Verschweissen der Kontakte. Ein Vorteil der Anordnung ist ferner, dass auch die auf die Schaltertraverse wirkende, die Einschaltbewegung hemmende Kraft kompensiert werden kann, so dass der gefährliche Fall, bei welchem das Drehmoment bei Fern- oder Handantrieb nicht genügt und Stehlichtbogen entstehen, nicht eintreten kann.

Aehnliche Wirkungen elektromagnetischer Kräfte wie in den Oelschaltern treten übrigens auch in den Trennmessern auf, sie können durch grosse Kurzschlussströme geöffnet oder sonst verbrannt werden (siehe z. B. Fig. 2 und 3 im Bulletin 1924, Heft 7, Seite 350). Man hat deshalb dieselben mit Klinken versehen, welche das Messer im Betrieb arretieren. Versuche von Brown Boveri haben aber in Uebereinstimmung mit amerikanischen Versuchen gezeigt, dass solche Anordnungen wegen der heftigen Erschütterungen die im Kurzschlussmoment auftreten, nicht zuverlässig funktionieren. Auch für das Trennmesser konnte durch Ausnützung vom Strom erzeugter Kräfte eine Lösung gefunden werden. Das Messer wird an seinem beweglichen Ende mit einem Schlitz versehen, der in geschlossener Stellung einen Bolzen des Gegenkontaktes umfasst, und die Isolatoren werden genügend beweglich gelagert, so dass sie durch die Stromkräfte auseinander gespreizt werden und damit das Messer sperren. Die Versuche mit dieser einfachen Anordnung haben überraschend gute Resultate ergeben. Mit einem Hochstrom-Transformator gelang es, die Versuche bis ca. 200 000 A Scheitelwert zu treiben, ohne dass das Messer geöffnet werden konnte oder sonst Schaden nahm, eine Stromstärke, welche in

der Praxis kaum je erreicht werden wird, sie entspricht etwa einer zusammengeschalteten Generatorenleistung von 200000 kVA bei 10000 Volt.

IV. Die Gefahren der Oelschalter.

Die wichtige Rolle, welche die Oelschalterfrage in der Elektrotechnik erlangt hat, ist wohl hauptsächlich deshalb entstanden, weil der Oelschalter im Gegensatz zu andern Apparaten und Maschinen, bei fehlerhaftem Funktionieren wegen Ueberbeanspruchung oder ungenügender Konstruktion nicht nur einfach seinen Dienst versagt und selbst zerstört werden kann, sondern unter Umständen die ganze Anlage in Mitleidenschaft ziehen und den ganzen Betrieb stillegen, ja sogar das Personal gefährden kann. Man vergleiche dem gegenüber die Harmlosigkeit des Luftschalters mit magnetischer Blasung. Er kann in solchen Fällen durch Stehlichtbogen defekt werden, die Isolierteile verbrennen, Metallteile schmelzen ab; der Schaden bleibt aber auf dem Schalter beschränkt und lässt sich durch Wiederinstandstellung desselben relativ leicht und rasch beheben.

Die Schalterfrage, so wie sie heute vor uns liegt, kann verglichen werden mit der Frage der Kesselexplosionen in den Anfangszeiten der Dampfmaschine. Die langjährige Entwicklung hat aber aus dem gefährlichen Dampfkessel einen Apparat von ganz hervorragender Betriebssicherheit gemacht. Auch im Oelschalterbau sind wir auf diesem Wege und haben schon sehr bedeutende Erfolge zu verzeichnen.

Um einen gefahrlosen Betrieb sicherstellen zu können, müssen zwei Hauptbedingungen erfüllt sein. Zunächst muss der Konstrukteur in der Lage sein, die Konstruktion und Dimensionierung eines Schalters so zu bestimmen, dass er unter gegebenen Betriebsbedingungen mit Sicherheit störungsfrei arbeitet. Ebenso notwendig ist es aber, bei Neuerstellung, Vergrösserung oder Aenderung von Anlagen die schwersten Betriebsbedingungen zuverlässig zu ermitteln, unter welchen ein bestimmter Schalter im Laufe seiner Verwendung, wenn auch nur ausnahmsweise, zu arbeiten haben wird. Genau so wie der beste Dampfkessel gefährlich wird, wenn man ihn mit dem doppelten des zulässigen Druckes betreibt, wird auch der Oelschalter gefährlich, wenn er für die auftretenden Betriebsbedingungen zu schwach gewählt wird.

Das Gesagte illustriert, wie wichtig die richtige Wahl der Schalter ist, aus diesen Ueberlegungen heraus hat der S. E. V. die „Richtlinien für die Wahl der Schalter in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen“ 1924 aufgestellt. Siehe dazu auch die „Erläuterungen“ im vorliegenden Heft. Die richtige Anwendung derselben ist der beste Schutz gegen Störungen und Unfälle durch überbeanspruchte Schalter.

Die *Ursachen der Gefahren,* soweit sie nicht auf falsche Wahl zurückzuführen sind, sind bei der Besprechung der Vorgänge im Schalter (Abschnitt III) dargelegt worden, sie seien im folgenden nochmals zusammengefasst und ergänzt:

Die Lichtbogen zersetzen Oel und bilden brennbare Gase, welche zum grössten Teil (ca. 80 %) aus Wasserstoff, im übrigen aus schweren Kohlenwasserstoffen und Methan bestehen[6]). Im Luftraum des Schalters kann ein Gasluftgemisch in jedem beliebigen Verhältnis bestehen. Die stärkste explosible Mischung ergibt sich bei ca. 25 % Gasgehalt und der grösste Enddruck bei der Explosion von atmosphärischem Druck ausgehend zu ca. 10 kg/cm². Eine Zündung kann in Frage kommen durch Kaminbildung, eventuell bei einer Abschaltleistung, welche kleiner ist als die maximal zulässige, durch richtige Konstruktion kann erreicht werden, dass dies nicht eintritt, sondern ein „Oelkolben“ entsteht. Die Oelhöhe über den Kontakten spielt dabei eine wesentliche, aber nicht die einzige Rolle. Bei Schaltern mit hoher Spannung ist auch Zündung durch Gleitfunken denkbar, sie kann aber durch passende Konstruktion vermieden werden.

[6]) Weitere Angaben siehe Bulletin S. E. V. 1917, Seite 232—236.

Die Gase sind im Entstehungszustand sehr hoch erhitzt und enthalten auch Oeldämpfe. Durch ihren grossen Raumbedarf verursachen sie Drucke im Schalter, und zwar bei der Entstehung der Gasblase Drucke nur im Oelkessel infolge der Oelbeschleunigung; beim Aufprall des Oeles an den Deckel schlagartige Wirkung auf den Deckel; bei weiterer Gasentwicklung Drucke im ganzen Schalter, welchen Kessel, Deckel und Verschraubung zwischen denselben standhalten müssen.

Ferner kann ein Schalter gefährdet werden durch die Kraftwirkungen grosser Ströme, welche das Einschalten verhindern und dabei Stehlichtbogen erzeugen, beim Einschalten Abhebungslichtbogen bilden, die Kontakte verschweissen und dadurch beim Abschalten Stehlichtbogen verursachen können.

Die *Folgen einer Explosion* sind zunächst Gefährdung des Personals und Zerstörungen durch die Schlagwirkung, z. B. Ausbrechen der Wände der Schalterzellen. Sodann ist mit der Explosion im allgemeinen auch ein Stehlichtbogen verbunden, durch dessen intensive Wärme-Entwicklung eine grosse Oelmenge augenblicklich in Brand gesetzt werden kann. Die durch Verbrennung der Abschaltgase entstehende kurzdauernde Flamme ist allein nicht imstande, das Oel in dauernden Brand zu bringen, wozu die Erhitzung einer Oberflächenschicht auf Siedetemperatur notwendig ist. Der entstehende Oelbrand hat gewöhnliche für die Anlage sehr schwere Folgen, die ausser der Zerstörung der umliegenden Anlageteile durch die Hitze vor allem auch in einer enormen Rauchentwicklung bestehen, welche den ganzen Innenraum mit einer Russschicht belegt.

Wie kann den Gefahren der Oelschalter begegnet werden? Wie bereits betont, ist dazu in erster Linie die *richtige Wahl der Schalter* notwendig.

Die *konstruktiven Massnahmen,* welche eine Erhöhung der Sicherheit ermöglichen, gehen aus Abschnitt III über die Vorgänge im Schalter und obiger Zusammenstellung über die Ursachen der Gefahren hervor. Sie können in folgende Gruppen geteilt werden:

1. Mittel zur Verkleinerung der Schalterarbeit und damit der Gasmenge, z. B. Vielfachunterbrechung.
2. Massnahmen zur Verhinderung von Gasexplosionen.
3. Massnahmen gegen die Gefahren der grossen Ströme.
4. Grosse Festigkeit des ganzen Schalters gegen die inneren Drücke.
5. Genügende Dimensionierung des ganzen Schalters.

Ferner kämen hinzu die Massnahmen zur Milderung der Folgen von Schalterexplosionen, wie der Einbau in Zellen, wir wollen dieselben aber nicht unter die Mittel zur Bekämpfung der Gefahren einreihen, sondern betrachten sie als einen Ausweg, der das Uebel nicht an der Wurzel packt und nur so lange Berechtigung hat, als die Gefahren des Schalters nicht vollständig behoben sind.

Die unter 1 – 5 genannten Massnahmen können in verschiedenem Masse miteinander kombiniert werden, dem Konstrukteur steht darin ein weites Spielfeld offen. In der Praxis haben sich besonders zwei hauptsächliche Typen herausgebildet: Der sogenannte *Kastenschalter* und der *Topfschalter.*

Beide Ausführungsarten scheinen den Anforderungen des Betriebes genügen zu können. Beim Vergleich der Vor- und Nachteile beider Lösungen spielen Platz- und Konstruktionsfragen eine wesentliche Rolle. In Europa hat der Kastenschalter weitaus die grösste Verbreitung gefunden.

V. Bedienung und Wartung.

Es ist wichtig, dass bei der *Betätigung* der Schalter im Betriebe stets die *normale Schaltgeschwindigkeit* eingehalten wird, und zwar nicht nur beim Ausschalten, sondern auch beim Einschalten, letzteres besonders bei Schaltern, welche im Falle vorhandenen Kurzschlusses sehr grosse Stromstärken erhalten. Bei Betätigung durch Fernantrieb ist diese Bedingung stets erfüllt. Das *Einlegen von Hand* soll immer

rasch und *vollständig* erfolgen, andernfalls kann bei Kurzschluss der Schalter wieder ausgelöst werden, bevor die Ausschaltfeder gespannt ist, was für die Abschaltung gefährlich werden kann. Sehr grosse Schalter mit entsprechend starkem Drehmoment können überhaupt nicht mehr befriedigend von Hand eingeschaltet werden; es ist besser, wenn über den Zustand der abgehenden Leitung Zweifel bestehen und auf die Einschaltung nicht verzichtet werden kann, die Relaisauslösung abzuhängen. *In Anlagen, welche sehr grosse Kurzschlussströme ergeben* und wenn die Schalter *nicht* von den Stromkräften *entlastete Traversen* besitzen, *darf bei unkontrolliertem Leitungszustand keinesfalls von Hand eingeschaltet werden. Ganz gefährlich* ist bei hochbeanspruchten Schaltern das sogenannte „*Touschieren*", d. h. Einschalten nur bis zur Berührung der Kontakte, wie es gerade bei zweifelhaftem Leitungszustand oft geübt wird, weil dabei die Abschaltung stets mit zu kleiner Geschwindigkeit erfolgt.

Schalter mit verzögerter automatischer *Auslösung* durch Zeitrelais sollen bei Kurzschluss nur durch das Relais und *nicht von Hand ausgelöst* werden, weil zu frühe Auslösung eine Ueberbeanspruchung des Schalters (Anfangskurzschlusstrom statt Dauerkurzschlusstrom) und eine Störung des selektiven Zusammenarbeitens verschiedener Schalter zur Folge haben kann.

Die *Wartung* erfordert im Betrieb laufende Kontrolle der Temperatur und des Oelstandes, ferner in Pausen, welche von der Schalthäufigkeit abhängen, Kontrolle der Löschkontakte auf Abbrand, richtiges Spielen und Kontaktdruck, der Hauptkontakte auf Sauberkeit und richtiges Aufliegen, des Oeles auf Verschlammung und Feuchtigkeit, der Isolierteile auf Schmutzbelag, der mechanischen Teile inklusive Antriebsmechanismus und Auslösung auf richtiges Funktionieren.

Nach schweren Kurzschlussabschaltungen soll womöglich immer, mindestens aber nach dreimaliger Schaltung eine Revision vorgenommen werden.

VI. Uebersicht über den heutigen Stand der Schalterfrage.

Es ist heute möglich, mit genügender Genauigkeit die grössten Beanspruchungen zu bestimmen, welche ein an bestimmter Stelle eines Kraftnetzes eingebauter Schalter erfahren kann. Dafür dienen die Richtlinien für die Wahl der Schalter des S. E. V.

Für die kleinen Oelschalter, welche in sehr grosser Zahl hauptsächlich in kleinen Transformatorenstationen an den Zweigleitungen der Mittelspannungsnetze verwendet werden und welche im allgemeinen nur schwache Kurzschlüsse zu ertragen haben, kann die Schalterfrage als gelöst betrachtet werden. Die Dimensionierung dieser Schalter ist meistens durch die Isolation und konstruktive Rücksichten und nicht durch die Schaltbeanspruchungen bedingt. Ihre Weiterentwicklung beschränkt sich deshalb auf die rein konstruktive Durchbildung; aber auch darin ist ein gewisser Abschluss zu konstatieren, und es sind bedeutende technische Verbesserungen kaum mehr zu erwarten. Sie erfüllen auch ihren Zweck und geben trotz der grossen im Betrieb stehenden Stückzahl sehr selten zu ernsthaften Störungen Anlass. Dagegen spielt bei kleinen Schaltern der Preis eine grosse Rolle, und die weitere Entwicklung wird sich deshalb in der Richtung nach Verbilligung bewegen müssen.

Auch bei Höchstspannungsschaltern tritt häufig der Fall ein, dass die Dimensionierung durch die erforderlichen Isolierabstände allein bestimmt ist.

Die Gebiete, für welche hauptsächlich noch Verbesserungen erstrebt werden, sind die Zentralenschalter und diejenigen in den Transformatoren- und Schaltstationen der Hauptverteilungsnetze, wozu besonders auch grosse städtische Anlagen gehören.

Die Konstrukteure sind heute in der Lage, mit einiger Sicherheit Schalter zu bauen, welche bestimmten gegebenen Beanspruchungen gewachsen sind. Sie stützen sich dabei unter Verwendung der grundlegenden Kenntnisse, welche besonders durch die Bauerschen Arbeiten bekannt wurden, hauptsächlich auf Erfahrungen und

einige Versuche mit grossen Leistungen. Es ist erreicht worden, dass Störungen grössern Umfanges durch Oelschalter selten geworden sind. Die Betriebsicherheit anderer elektrischer Apparate ist aber noch nicht erreicht, und deshalb wird auch im allgemeinen der Zelleneinbau der Schalter noch als notwendig erachtet. Die Vervollkommnung auf den Stand, den andere Apparate erreicht haben, muss aber als Ziel des Schalterbaues betrachtet werden.

Anderseits verlangt die Wirtschaftlichkeit immer mehr eine Verkleinerung der Schalter nach Grösse und Preis; sie strebt nach äusserster Ausnützung des Materials. Die beiden Forderungen stehen sich gegenüber; sie zu vereinigen wird nur durch äusserste technische Vervollkommnung des Apparates möglich sein.

Die Wirtschaftlichkeit wird noch besonders deshalb durch die Vervollkommnung gewinnen, weil der gefahrlose Schalter des Zelleneinbaues nicht mehr bedarf, wodurch gleichzeitig wesentliche betriebstechnische Vorteile entstehen.

Die erstrebte Vervollkommnung kann aber nur erreicht werden, wenn dem Konstrukteur die Unterlagen dazu gegeben werden. Die theoretischen Unterlagen sind heute fast vollständig vorhanden, die praktischen fehlen aber grossenteils.

Was wir heute wissen, kann etwa folgendermassen zusammengefasst werden: Die elektrischen Vorgänge beim Abschalten, Existenzbedingungen und Löschvorgang des Lichtbogens. Die elektrischen und konstruktiven Daten, welche auf dessen Verlauf Einfluss haben, auch die Wirkung von Löschwiderständen. Die chemischen und thermodynamischen Vorgänge als Wirkung des Lichtbogens. Die Wirkungen sehr grosser Kurzschlussströme. Die Gefahren, welche einen Schalter bedrohen, ihre Ursachen und die Wege zu ihrer Behebung.

Was wir nicht wissen: Wie lang bei grossen Leistungen oder bei grossen Spannungen die Lichtbogen werden. Bestimmte Angaben über den Einfluss der Frequenz. Die Wirkung grosser Drucke bei grossen Leistungen. Die zahlenmässigen Umstände, welche die Kaminbildung bedingen. Die Temperaturen in der Gasblase und ihr Dampfgehalt. Die Zeit, welche der Oelkolben zum Zerfallen braucht. Ausserdem fehlt die Kontrolle der Bauerschen Konstanten für die Schalterarbeit und für die Gasproduktion bei grossen Leistungen.

Die noch fehlenden Unterlagen lassen sich nur beschaffen durch systematisch durchgeführte und ausgewertete Versuche, zu welchen aber grosse Kurzschlussleistungen notwendig sind. Die Schwierigkeit der Beschaffung solcher Leistungen erklärt die Hindernisse, welche der restlosen Lösung der Schalterfrage bisher entgegenstanden. Die Amerikaner haben vor drei Jahren, wohl von ähnlichen Ueberlegungen ausgehend, wenn auch weniger systematisch durchgeführt, sondern mehr der Erprobung einzelnener Typen dienend, Kurzschlussversuche grossen Stils durchgeführt.[7]) Jene Versuche sind besonders auch deshalb interessant, weil sie zeigten, dass es möglich ist, ohne wesentliche Störungen und ohne Gefahr für die Generatoren Kurzschlussversuche in grossen Kraftnetzen während des Betriebes vorzunehmen. Die Versuchsschalter wurden an einem Netzknotenpunkt aufgestellt, welcher von mehreren grossen Zentralen über längere Leitungen gespiesen wird. An solchen Punkten wird grosse Kurzschlussleistung erreicht, welche sich aber auf die verschiedenen Zentralen verteilt, so dass die Generatoren nur wenig beansprucht werden. Die Schalter wurden so betätigt, dass jeder Kurzschluss schon nach einem Bruchteil einer Sekunde wieder abgeschaltet wurde. Dieser kurze Unterbruch hatte ausser etwa dem Herausfallen eines Synchronmotors keine Folgen. Beim Versagen des Versuchsschalters übernahmen besondere Sicherheitsschalter die Abschaltung.

Man ist in Amerika sogar bereits zu einer Art Normalisierung solcher Versuche übergegangen, welche den Zweck hat, die Resultate verschiedener Versuche direkt miteinander vergleichbar zu machen.[8])

---

[7]) Kurzschlussversuche in Baltimore, veröffentlicht im Journal of the American Institute of Electrical Ingineers 1922, Seiten 399, 530, 537 und 990, sowie in El. World 1922, Vol. 80, Seite 21, auszugsweise wiedergegeben in E. T. Z. 1923, Seite 614.

[8]) Siehe Journal A. J. E. E. Oktober 1924, Seite 972.

Ein ähnliches Vorgehen bei uns wie in Amerika wäre erwünscht und müsste im gegenwärtigen Zeitpunkt sehr fruchtbringend wirken. Es ist nur möglich durch Zusammenarbeit der Kraftwerke mit den Konstruktionsfirmen, wobei übrigens das Interesse am Zustandekommen viel mehr auf Seite der erstern liegt, denn sie sind es, welche die vorhandenen Mängel verspüren und welche die wirtschaftlichen und betriebstechnischen Vorteile der erreichten Verbesserungen geniessen.

Konstruktive Grundlagen für Oelschalter nach den heutigen Erfahrungen.

Von Dir. *E. Heusser,* Aarau.

Der Autor gibt nachstehend den ersten Teil eines Referates, das er an der Diskussionsversammlung des S. E. V. vom 3. April 1925 in Zürich[1]*) halten wird, bekannt. Dieser Teil befasst sich mit den allgemeinen, konstruktiven Grundlagen des Oelschalterbaues. Im zweiten Teil des Vortrages werden Konstruktionen anhand von Lichtbildern verschiedener Firmen des In- und Auslandes gezeigt werden.*

Voici la première partie d'une conférence qui sera donnée à l'assemblée de discussion de l'A. S. E., le 3 avril 1925, à Zurich[1]*). L'auteur y expose les principes fondamentaux de la construction des interrupteurs à huile. La seconde partie de sa conférence, consacrée aux types de construction en usage dans les maisons suisses et étrangères, sera illustrée par des projections lumineuses.*

[1]) *Einladung siehe Seite 111 der vorliegenden Nummer des Bulletin.*

[1]) *Invitation voir page 111 du présent numéro du Bulletin.*

Die Kommission des S. E. V. und V. S. E. für Ueberstromschutz hat es für wünschenswert gehalten, als Abschluss ihrer letztjährigen Arbeiten Ihnen über den gegenwärtigen Stand der den Praktiker interessierenden Oelschalterfragen einmal in mehr wissenschaftlicher Weise, anderseits aber auch über die konstruktiv praktischen Punkte zu referieren und Sie zur Diskussion einzuladen.

Richtlinien über die Konstruktion von Oelschaltern sind seit einer Reihe von Jahren bekannt, ich erwähne nur diejenigen des Verbandes Deutscher Elektrotechniker (V. D. E.), die neueren des American Institute of Electrical Engineers (A. I. E. E.) und diejenigen der British Engineering Standards Association, die erst im August 1923 herausgegeben wurden und zwischen den ursprünglichen deutschen Richtlinien und den amerikanischen Standards etwa die Mitte einhalten. Es wurde s. Zt., als der Bau von Oelschaltern noch wenig von den praktischen Erfahrungen mit grossen Abschaltleistungen profitieren konnte, mit wesentlich zu kleinen Dimensionen der Oelschalter und ungeeigneten konstruktiven Mitteln zur Bewältigung der Erscheinungen beim Abschalten gearbeitet, so dass es als ein Fortschritt betrachtet werden musste, als der V. D. E. Konstruktionsserien festlegte mit gegebenen Isolationsabständen in Luft und in Oel, unter gleichzeitiger Berücksichtigung einer Reihe von Grundsätzen, welche die Abschaltfähigkeit eines Oelschalters beeinflussen. Seit dieser Zeit sind eine Reihe von konstruktiven Verbesserungen bekannt geworden, welche gezeigt haben, dass die Einhaltung der damals festgelegten Richtlinien des V. D. E. nicht massgebend ist, um darnach Oelschalter grosser Abschaltleistungen zu bauen. Sie erinnern sich an die Versuche wissenschaftlicher Natur, die der S. E. V. vor einigen Jahren durchzuführen unternahm unter der Leitung des Herrn Dr. Bruno Bauer. Diesen Versuchen sind in ähnlich gründlicher Bearbeitung meines Wissens keine andern gefolgt, dagegen haben seither grosszügig angelegte Abschaltversuche mit Leistungen von hunderttausenden von kW wertvolle Aufklärungen gebracht und einzelne Grossfirmen haben mit speziell gebauten Generatoren, denen grosse initiale Kurzschlussströme zu entnehmen waren, die Abschalterscheinungen weiter verfolgt. Ich nenne von den ersteren besonders die Versuche in Baltimore, die in Fachzeitschriften, vor allem dem Journal A. I. E. E., eingehend beschrieben wurden und ferner diejenigen, welche die Alabama Power Co. letztes Jahr durchführte in ihrer Unterstation