**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens
**Band:** 22 (1931)
**Heft:** 11

**Artikel:** Die konstruktive Entwicklung des Expansionsschalters
**Autor:** Kesselring, Fritz
**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-1058584

**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:** 20.02.2026

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

für einatomige Gase $f = 2{,}5$
» zweiatomige Gase $f = 1{,}75$
» dreiatomige Gase $f = 1{,}4$

kann man die Viskosität eliminieren und an ihrer Stelle die dem Techniker besser vertraute spezifische Wärme einführen. Der Ausdruck (1) geht dann über in:

$$w_c = 0{,}66 \cdot f^{\frac{1}{2}} \cdot (a \cdot g)^{\frac{1}{4}} \cdot (\varrho \cdot c_v \cdot k)^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{(\triangle t)^{\frac{5}{4}}}{H^{\frac{1}{4}}} \qquad (3)$$

Um die Abhängigkeit vom Druck deutlicher sichtbar zu machen, setzen wir:

$$\varrho = \varrho_1 \cdot p$$

wo: $p$ = Druck des Gases in at abs.
$\varrho_1$ = Dichte des Gases bei der Temperatur $t^\circ$ C und Atmosphärendruck.

Gleichung (3) geht dann über in:

$$w_c = 0{,}66 \cdot f^{\frac{1}{2}} \cdot (a \cdot g)^{\frac{1}{4}} \cdot (\varrho_1 \cdot c_v \cdot k)^{\frac{1}{2}} \cdot p^{\frac{1}{2}} \cdot \frac{(\triangle t)^{\frac{5}{4}}}{H^{\frac{1}{4}}} \qquad (4)$$

Es lassen sich daraus folgende Folgerungen ziehen:

1. Die durch Konvektion übertragene Wärme wächst mit der $^5/_4$ten Potenz der Temperaturdifferenz;
2. mit der Quadratwurzel aus dem Druck;
3. mit der Quadratwurzel aus dem Produkt aus spezifischer Wärme bei konstantem Volumen, spezifischem Gewicht des Gases bei Atmosphärendruck und der Wärmeleitzahl.

Die unter 3. angeführten «Konstanten» sind mehr oder weniger von der Temperatur abhängig. Für unsere Zwecke kommt nur der relativ kleine Temperaturbereich von ca. 0 bis 60° C in Frage, und es ist daher zulässig, Mittelwerte, auf diesen Bereich bezogen, einzusetzen. Als solche verwenden wir die in Tabelle III angeführten:

Tabelle III.

| Grösse | Einheit | Gas | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Luft | Stickstoff | Kohlensäure | Helium | Wasserstoff |
| $c_v$ | Joule/g °C | 0,72 | 0,75 | 0,70 | 3,15 | 10,1 |
| $\varrho_1$ | g/cm³ bei 1 at | $1{,}29 \cdot 10^{-3}$ | $1{,}25 \cdot 10^{-3}$ | $1{,}98 \cdot 10^{-3}$ | $0{,}18 \cdot 10^{-3}$ | $0{,}09 \cdot 10^{-3}$ |
| $k$ | W/cm² °C | $2{,}3 \cdot 10^{-4}$ | $2{,}3 \cdot 10^{-4}$ | $1{,}4 \cdot 10^{-4}$ | $13{,}9 \cdot 10^{-4}$ | $16 \cdot 10^{-4}$ |
| $f$ | — | 1,75 | 1,75 | 1,4 | 2,5 | 1,75 |

Schreiben wir schliesslich Formel (4) in der vereinfachten Form:

$$w_c = C \cdot \frac{p^{\frac{1}{2}} \cdot (\triangle t)^{\frac{5}{4}}}{H^{\frac{1}{4}}} \qquad (5)$$

so kann man mit den obigen Werten die Konstante $C$ gemäss Tabelle IV errechnen:

Tabelle IV.

| | Luft | Stickstoff | Kohlensäure | Helium | Wasserstoff |
|---|---|---|---|---|---|
| $C \cdot 10^4$ | 5,5 | 5,5 | 4,7 | 12,5 | 14,5 |

# Die konstruktive Entwicklung des Expansionsschalters.

Von *Fritz Kesselring*, Berlin.

621.316.542

*Auf Grund des Expansions- und Wasserstoffeffektes, welche die Löschung eines in wasserstoffabspaltender Flüssigkeit brennenden Lichtbogens bewirken, stellt der Autor allgemeine Richtlinien für den Bau eines ölfreien Hochleistungsschalters auf. Es wird sodann der nach diesen Richtlinien entwickelte Expansionsschalter mit starrer oder elastischer Expansionskammer näher erläutert und auf einige besonders interessante konstruktive Einzelheiten hingewiesen. Zum Schlusse wird anhand eines Falles aus der Praxis das einwandfreie Funktionieren der beschriebenen Expansionsschalter gezeigt *).*

*Partant de l'effet d'expansion et de développement d'hydrogène provoquant l'extinction de l'arc électrique dans les liquides séparant par décomposition de l'hydrogène gazeux, l'auteur dresse des directives générales pour la construction d'un interrupteur sans huile à forte puissance de coupure. L'auteur décrit ensuite un interrupteur à expansion avec chambre d'expansion rigide ou élastique construit selon ses directives, en appuyant sur certains détails particulièrement intéressants. Pour terminer, l'auteur démontre par un exemple tiré de la pratique le fonctionnement irréprochable de l'interrupteur à expansion décrit.*

## I. Allgemeine Gesichtspunkte.

Der Schaltapparatebau ist bis vor kurzem als dasjenige Gebiet der Elektrotechnik angesehen worden, auf das die theoretische Elektrizitätslehre nur in ganz geringem Masse befruchtend eingewirkt hat. Die bisherigen Konstruktionen kamen auf Grund von Erfahrungstatsachen und meist sehr gewagten Ueberlegungen ihrer Konstrukteure zustande. Dieser sonst in keinem anderen Gebiete der Elektrotechnik bestehende Zustand ist darauf zurückzuführen, dass man es beim Schalterproblem immer mit Gasentladungsvorgängen zu tun hat, oder, wie in einer früheren Arbeit [1]) auseinandergesetzt wurde, mit sogenannten elektronentheoretischen Stromkreisen. Bei dieser Art von Stromkreisen versagt die Maxwellsche Theorie. Andererseits spielen insbesondere beim Flüssigkeitsschalter äusserst komplizierte chemische und hydrodynamische Probleme eine wesentliche Rolle.

Das erste Eingreifen der Theorie verdanken wir Bruno Bauer [2]). Er stellte sich zur Aufgabe, die in einem Oelschalter sich abspielenden energetischen Umsetzungen aufzudecken, insbesondere die Energiebilanz eines Abschaltvorganges aufzustellen. Diese Problemstellung charakterisiert die ganze Schalterfrage treffend, denn man versuchte nicht, einen Schalter auf neuem Prinzip zu finden, sondern den an sich zur Zufriedenheit funktionierenden Oelschalter überhaupt verstehen zu lernen. In der Zwischenzeit ist die Energiebilanz des Abschaltvorganges unter Oel mit allen Feinheiten aufgestellt worden [3]). Damit waren die in einem Oelschalter auftretenden mechanischen Beanspruchun-

*) Im Beisein schweizerischer Interessenten wurde dieser Schalter am 17. April d. J. auf dem Versuchsstand der Siemens-Schuckert-Werke in Berlin in erfolgreichen Versuchen vorgeführt.

[1]) E. T. Z. 1929, S. 1005.

[2]) Bull. SEV 1915, S. 141.

[3]) Kesselring, Elektrische Schaltgeräte, Anlasser und Regler, S. 97; v. Engel, Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern, IX. Bd., Heft 1, 1930, S. 1;
Bruce, The Distribution of Energy Liberated in an Oil Circuit-Braker, J. I. E. E., Mai 1931.

gen bekannt und es bestand die Möglichkeit, durch entsprechende konstruktive Massnahmen diesen Kräften Rechnung zu tragen. Ein äusseres Merkmal besteht darin, dass fast alle Firmen auf runde Oelkessel mit nach aussen gewölbtem Boden und Deckel übergegangen sind, um unter Verwendung von möglichst wenig Konstruktionsmaterial die auftretenden Drücke beherrschen zu können. Weitere Verbesserungen erstreckten sich auf die Durchbildung der Kontakte (Solenoidkontakt BBC, hydraulisch gedämpfte Tulpenkontakte SSW) sowie auf den mechanischen und elektrischen Aufbau der Schalter.

Die eine wesentlichste Frage, welche Bedingungen erfüllt sein müssten, damit ein Wechselstromlichtbogen zum Erlöschen gebracht werden kann, blieb aber noch immer unbeantwortet, und doch hängt von dieser Antwort einzig und allein der weitere Fortschritt auf dem Gebiete des Schalterbaues ab.

Die erste Aufklärung in dieser Hinsicht ergab die Entdeckung des Expansionsprinzips [4]). Es konnte nachgewiesen werden, dass ein in einer Flüssigkeit brennender Lichtbogen immer dann erloschen bleibt, wenn zwischen dem Druck- bzw. Temperaturgefälle $-\frac{\partial T}{\partial t}$ in der Dampfblase und dem ersten Spannungsanstieg der wiederkehrenden Spannung $\frac{\partial u}{\partial t}$ ein bestimmtes Gleichgewicht besteht. Mathematisch liess sich diese Erkenntnis folgendermassen darstellen:

$$-\frac{\partial T}{\partial t} - k\frac{\partial u}{\partial t} > 0.$$

wobei die Konstante $k$ einen Wert von etwa 0,3°C/kV aufweist. Dieses Grundgesetz für Flüssigkeitsschalter lässt sich vorläufig nicht theoretisch ableiten; seine Gültigkeit kann lediglich dadurch erwiesen werden, dass die aus ihm sich ergebenden Schlussfolgerungen mit den experimentellen Resultaten in Uebereinstimmung stehen. Der grösste Gewinn, den wir aus diesem Gesetz gezogen haben, bestand darin, dass es unser Denken und unsere Schlussfolgerungen systematisch geordnet hat. Wir haben verstehen gelernt, warum es nicht gleichgültig ist, ob der Versuchsgenerator in Stern oder in Dreieck geschaltet ist, ob parallel zum Schalter noch eine Belastung liegt, ob wir die Versuche im Druckintervall zwischen 0 ... 5 oder 50 ... 100 at ausführten usw. Weiterhin war es möglich, den Zusammenhang zwischen der Beanspruchung bei einem Ein- und einem Dreikesselschalter aufzuklären [5]). Das Grundgesetz erklärt aber die Löschung eines Lichtbogens nur in einem Teilgebiet. Insbesondere im Bereich kleiner Ströme ist die Dampfentwicklung und damit auch das Temperaturgefälle so klein, dass man rechnerisch zu sehr hohen Lichtbogenlängen kommt, welche nicht mehr mit der Erfahrung in Uebereinstimmung stehen. Es bestand schon immer die Vermutung, dass im Bereich kleiner Ströme ein neuer Effekt den Vorgang massgebend beeinflusst. Lange Zeit dachte man daran, dass die isolierende Eigenschaft des Schalteröles eine wesentliche Rolle spielt. Diese Anschauung musste jedoch fallen gelassen werden, nachdem man auch bei Unterbrechungen unter verhältnismässig gut leitendem Wasser ähnliche Kurven wie bei Oel erhielt. Erst vor kurzem konnte der Nachweis geführt werden, dass die Unterbrechung bei kleinen Strömen der Anwesenheit von Wasserstoff zu verdanken ist. Mit Hilfe der von Grotrian [6]) gefundenen Ergebnisse war es möglich, den Zusammenhang zwischen abzuschaltender Stromstärke und Lichtbogenlänge rechnerisch vorauszubestimmen [7]). Dass diese beiden Effekte, nämlich der Expansions- und der Wasserstoffeffekt, tatsächlich die Lichtbogenlöschung unter wasserstoffabspaltenden Flüssigkeiten voll und ganz erklären können, zeigt Fig. 1, welche einer demnächst erscheinenden

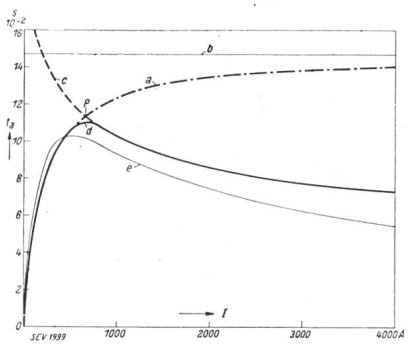



Fig. 1.
Lichtbogenlöschung; Wasserstoff- und Expansionseffekt.

Arbeit entnommen ist. Kurve *a* zeigt den berechneten Zusammenhang zwischen Lichtbogendauer und Abschaltstromstärke im Gebiete der Wasserstofflöschung, Kurve *c* den entsprechenden Zusammenhang im Gebiete der Expansionslöschung. Die Superposition ergibt Kurve *d*, welche, wie die eingezeichnete experimentell bestimmte Kurve *e* erläutert, in sehr guter Uebereinstimmung mit dem Experiment ist. Dem Beispiel ist ein Hochleistungsölschalter für 30 000 V mit zwei Unterbrechungsstellen pro Pol zugrundegelegt.

Wählt man als Unterbrechungsflüssigkeit im Gegensatz zu dem hochisolierenden Oel eine mehr oder weniger leitende Flüssigkeit (z. B. Wasser mit entsprechenden Zusätzen), so lässt sich das Gebiet, in dem der Wasserstoff die Lichtbogenlöschung bewirkt, vollständig unterdrücken. Im Bereich kleinerer Ströme tritt bei entsprechender Wahl der Elektroden und der Schaltflüssigkeit überhaupt kein Lichtbogen mehr auf, wie das Oszillogramm Fig. 2 deutlich erkennen lässt.

Die Zusammenfassung der bisherigen Darlegungen führt nun zu folgenden klaren Richtlinien für den Bau eines ölfreien Hochleistungsschalters.

[4]) Kesselring, E. T. Z. 1930, S. 499; Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern, IX. Bd., 1. Heft, 1930, S. 200.

[5]) E. T. Z. 1930, S. 499.

[6]) Annalen der Physik, Bd. 1915, S. 141.

[7]) Erscheint demnächst.

1. Die Isoliereigenschaften des Schalteröles spielen für die Lichtbogenlöschung keine Rolle; das Oel kann daher durch eine mehr oder weniger leitende Flüssigkeit, z. B. Wasser, ersetzt werden.

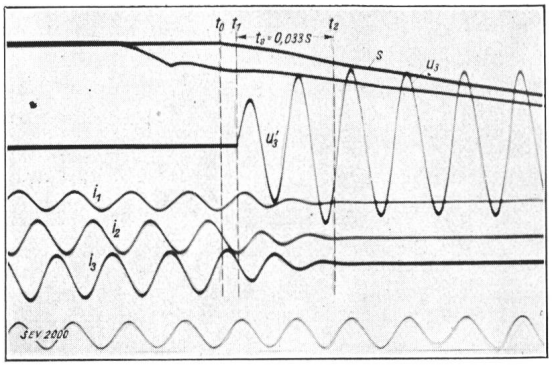



Fig. 2.
Oszillogramm einer lichtbogenfreien Abschaltung.

| | | | |
|---|---|---|---|
| $s$ | Schaltbewegung. | $t_0$ | Anfang der Schaltbewegung. |
| $i_1$ $i_2$ $i_3$ | Ströme. | $t_1$ | Trennung der Schaltstücke. |
| $u_3$ | wiederkehrende Spannung. | $t_2$ | Ende des Schaltvorgangs. |
| $u'_3$ | Spannungsabfall in der Flüssigkeit. | | |

2. Die maximale Lichtbogenlänge bei einer Wasserstoff abspaltenden Flüssigkeit ist bestimmt durch die Brennspannung eines Wechselstromlichtbogens in Wasserstoff. Dies führt insbesondere bei höheren Spannungen zu sehr grossen Lichtbogenlängen. Im Bereich kleinerer Spannungen kann das Schalten in Wasserstoff durch ein lichtbogenfreies Unterbrechen in einer leitenden Flüssigkeit ersetzt werden; im Bereich hoher Spannungen lässt sich die Brennspannung in Wasserstoff durch konstruktive Massnahmen (Einengung, bessere Kühlung) erhöhen.

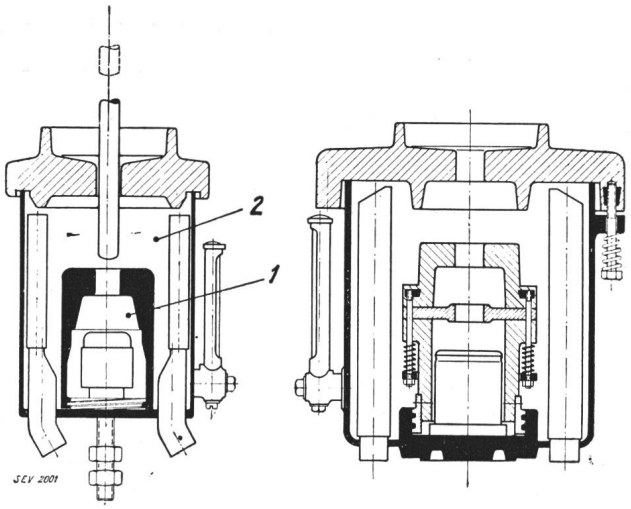
3. Durch zusätzliche Expansion, z. B. dadurch, dass man den durch den Lichtbogen erzeugten Dampf sich in einem geschlossenen Gefäss sammeln lässt, das plötzlich über grossen Querschnitt geöffnet wird, lässt sich das Druck- bzw. Temperaturgefälle sehr stark erhöhen, was eine entsprechende Verkürzung der Lichtbogendauer bedingt.

Auf diesen Grundsätzen ist der von den Siemens-Schuckert-Werken entwickelte Expansionsschalter aufgebaut, dessen konstruktive Durchbildung im folgenden noch etwas näher erläutert werden soll.

## II. Die apparatetechnischen Gesichtspunkte.

Da der Expansionsschalter, ebenso wie der Oelschalter, ein Flüssigkeitsschalter ist, wurde zu Beginn der Entwicklung die Richtlinie aufgestellt, möglichst viele durch jahrelange Erprobung als brauchbar befundene Konstruktionselemente vom Oelschalter zu übernehmen. Die nähere Prüfung ergab, dass die hydraulisch gedämpften Tulpenkontakte, die Freilaufkupplung mit Meldeschalter und Spannungsauslöser, sowie die Hohlwelle mit elektrisch aufgeschweissten Kurbeln zum wahlweisen Antrieb des Schalters von beiden Seiten einschliesslich der Kinematik praktisch ohne Aenderung übernommen werden konnten. Neu durchzubilden waren vor allen Dingen die Expansionskammern sowie der allgemeine konstruktive Aufbau des Schalters. Infolge der Wahl einer relativ zum Oel gut leitenden Schaltflüssigkeit war es nicht mehr möglich, die drei Pole in einem einzigen, mit Flüssigkeit gefüllten Gefäss anzuordnen, sondern es mussten die drei Pole voneinander und gegen Erde isoliert werden. Aehnliche Massnahmen hat man jedoch auch schon beim Bau der sogenannten Nadelölschalter getroffen.

Eine grundlegende Aenderung im Gesamtaufbau und auch im Aussehen der Schalter wurde jedoch dadurch bedingt, dass durchweg nur noch eine Unterbrechungsstelle pro Pol angewendet wird, und zwar für den ganzen Spannungsbereich von 3 bis 220 kV. Das erwähnte Grundgesetz für den Flüssigkeitsschalter hat auch mit der lange Zeit bestehenden Auffassung, dass man zur Bewältigung höherer Leistungen und Spannungen eine Vielfachunterbrechung benötige, endgültig aufgeräumt. Die Schaffung eines Expansionsschalters für 220 kV mit nur einer einzigen Unterbrechungsstelle pro Pol, der bei rein induktivem Stromkreis die Abschaltung nach drei Halbwellen bewirkt, zeigt mit einer durch nichts zu überbietenden Deutlichkeit die Unhaltbarkeit der bisherigen Anschauungen.




*a* *b*

Fig. 3.
Expansionskammer.
*a)* starre Kammer, 1 Dampfkammer, 2 Kondensationskammer.
*b)* elastische Kammer.

In Fig. 3 sind schematisch die beiden heute zur Anwendung gelangenden Formen der Expansionskammer dargestellt, und zwar links die sogenannte starre Expansionskammer, rechts die elastische Expansionskammer. Wird der bewegliche Schaltstift nach oben gezogen, so entsteht zwischen den sich trennenden Kontakten ein Lichtbogen, der einen Teil der Schaltflüssigkeit verdampft. Im Moment, in dem der Schaltstift die Dampfkammer 1 verlässt, kann der Dampf durch die Durchtrittsöffnung des Stiftes plötzlich in die Kondensationskammer 2 entweichen. Die dabei auftretende Expansion bewirkt die sofortige Löschung oder, richtiger gesagt, verhindert die Neuzündung des Licht-

bogens. Der Schaltstift bewegt sich weiter bis in die punktiert angedeutete Lage, woraus hervorgeht, dass nach vollzogener Abschaltung eine vollständige Trennung zwischen Expansionskammer und Schaltstift besteht, die durch keinen direkten Kriechweg überbrückt ist. Wie aus Fig. 3 *a* zu ersehen ist, gleicht bei oberflächlicher Betrachtung die Dampfkammer der bisher bei Oelschaltern verwendeten Löschkammer. In Wirklichkeit ist aber der Aufbau dieser Kammer massgebend durch das Grundgesetz beeinflusst worden. Insbesondere wurde der Zwischenraum zwischen Durchtrittsöffnung und Stift so gewählt, dass bei der Nennausschaltleistung keine höheren Drücke als etwa 30 at auftreten können, damit der Schalter noch in dem Dampfgebiet arbeitet, in dem eine Druckänderung eine grosse Temperaturänderung bedingt [8]). Ferner sind Oeffnung und Stiftende so geformt, dass ein plötzliches Druckgefälle zustande kommt, ganz im Gegensatz zu älteren Löschkammerkonstruktionen mit konisch oder unsymmetrisch zur Achse sich erweiterndem Mund. Der untere Teil der Kammer besteht aus nicht durch Isolationsmaterial abgeschirmtem Metall, um im Gebiet kleiner Ströme, in dem der Schalter lichtbogenfrei arbeitet, eine möglichst günstige Feldverteilung zu erzielen. Eine Membrane sorgt schliesslich dafür, dass auch bei Stehfeuer, verursacht z. B. durch Defekte am Gestänge, keine gefährlichen Drücke in der Dampfkammer entstehen können.

Die klarste Verwirklichung des Expansionsprinzips ist durch die elastische Expansionskammer (Fig. 3 *b*) gegeben. Sobald der für die Expansionslöschung günstigste Druck erreicht wird, öffnet sich zwischen der unteren oder oberen Kammerhälfte und dem dazwischen gelegenen Teller ein Ringspalt, durch den der Dampf allseitig mit geringem hydrodynamischem Widerstand entweichen kann, wodurch ein ausserordentlich starkes Temperaturgefälle erzeugt wird.

Nachdem nun die Expansionskammer in ihren wesentlichen Abmessungen fest lag und der Entschluss gefasst worden war, nur eine Unterbrechungsstelle pro Pol anzuwenden, entstand die konstruktive Aufgabe, Kammer und Schaltstiftantrieb in möglichst zweckmässiger Weise zu verbinden. Von den zahlreichen Vorschlägen haben sich die beiden in Fig. 4 dargestellten Konstruktionen als die für Innenraumschalter zweckmässigsten erwiesen. Da die Kammer infolge des Flüssigkeitsinhaltes senkrecht stehen und ihre Oeffnung oben liegen muss, ergibt sich eine einfache Lösung dadurch, dass man auf einer senkrecht hängenden Platte je einen Stützer anordnet, der Kammer- bzw. Schaltstiftantrieb trägt (Fig. 4 *a*). Bei grösseren Leistungen bzw. Spannungen ist es infolge der erheblichen Gewichte nicht mehr zweckmässig, den Schalter an die Wand oder an ein Eisengerüst zu hängen. Aus dieser Forderung entstand dann der auf einem winkelförmigen Eisengestell montierte fahrbare Schalter gemäss Fig. 4 *b*.

[8]) Vergl. E. T. Z. 1930, S. 499, Fig. 10.

Die Wahl dieser beiden Grundformen war massgebend beeinflusst durch die Arbeiten der Schaltanlagenabteilung. Die Verwendung nur einer Unterbrechungsstelle pro Pol ergab gegenüber dem Oelschalter grundsätzlich neue Möglichkeiten zum Aufbau der Schaltanlage. Aus zahlreichen Entwürfen von Schaltanlagen verschiedenster Art wurden schliesslich diejenigen Hauptabmessungen und Anschlussmöglichkeiten der Schalter herausgeschält, welche Schaltanlagen höchster Betriebssicherheit bei geringstem umbautem Raum ergeben.

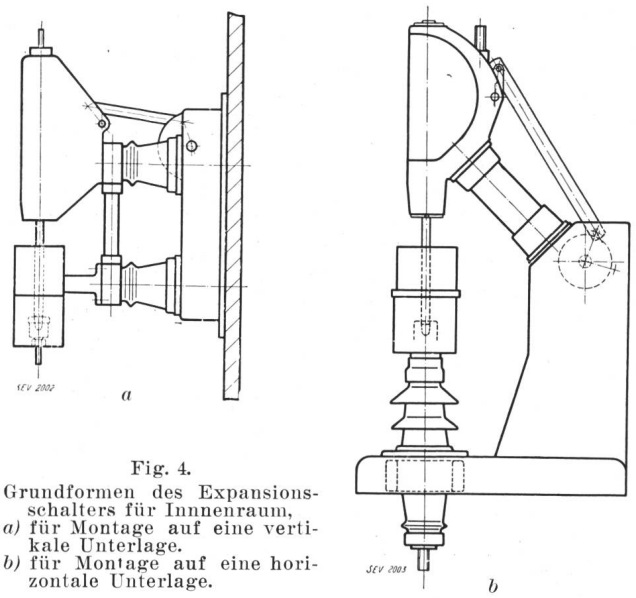



Fig. 4.
Grundformen des Expansionsschalters für Innnenraum,
*a)* für Montage auf eine vertikale Unterlage.
*b)* für Montage auf eine horizontale Unterlage.

In diesem Zeitpunkte der Entwicklung setzte die Arbeit unseres künstlerischen Beraters ein, dessen Aufgabe darin bestand, eine möglichst befriedigende ästhetische Form der Schalter zu finden, ohne dabei gegen die gewählten konstruktiven und wirtschaftlichen Gesichtspunkte zu verstossen. Als überaus wichtig hat sich gezeigt, jeden Apparat in natürlicher Grösse aufzuzeichnen.

Von den zahlreichen Detailuntersuchungen können in diesem Zusammenhang nur einige wenige kurz erwähnt werden. Die bisher für Oelschalter gebräuchlichen Bakelitfabrikate sind in Berührung mit Wasser nicht verwendbar, da sich ihr Isolationsvermögen und ihre Struktur sehr bald ändern. Es bestand daher die Aufgabe, ein neues Isoliermaterial zu schaffen, welches hohe elektrische und mechanische Festigkeit in sich vereinigt und auch im angeschnittenen Zustand vollkommen wasserfest ist. Nach langjährigen Versuchen gelang es, das sogenannte *Repelitpressmaterial* in immer gleichbleibender Qualität herzustellen. Dieses Material hat zudem noch den grossen Vorteil, dass es in Berührung mit Wasser als praktisch lichtbogenfest anzusehen ist.

Weiter erwies es sich als notwendig, ein korrosionsfestes Metall für den Aufbau von Dampf- und Kondensationskammer zu entwickeln, welches weder mit Kupfer, Messing, noch mit dem Spezialstahl der Kontaktfedern ein elektrisches Element

bildet. Ferner musste dieses Metall hohe mechanische Festigkeit und leichte Giessbarkeit aufweisen. Ausserdem wird zur Bewältigung der hohen Abschaltströme neuerdings das sogenannte SS-Kontaktmaterial verwendet (SS = schwer schmelzbar), welches nur etwa $^1/_{12}$ des Abbrandes von normalem Elektrolytkupfer aufweist.

Als Schaltflüssigkeit für den Expansionsschalter dient das sogenannte *Expansin*, welches als Verdunstungsschutz mit einer etwa 0,2 mm dicken Schicht eines Spezialöles überdeckt ist. Das *Expansin B* vereinigt folgende Eigenschaften in sich: Der Gefrierpunkt liegt bei etwa —25°, die Leitfähigkeit hält sich ziemlich unverändert bei 200 Mikro-Siemens. Es hat die Neigung, etwa entstehende elektrische Elemente innerhalb weniger Sekunden zu polarisieren, so dass der Stromfluss aufhört. Zusammen mit dem Spezialöl neigt es weder zu Emulgierung, noch zur Verseifung. Gegen die Verwendung des Expansins wurde vielfach Einspruch erhoben mit der Begründung, dass die Expansionswirkung doch in weitem Umfange unabhängig sei von der Art der Löschflüssigkeit. Dass dies zutrifft, geht klar aus Fig. 5 hervor, welche den Einfluss der Leitfähigkeit auf die Lichtbogen-

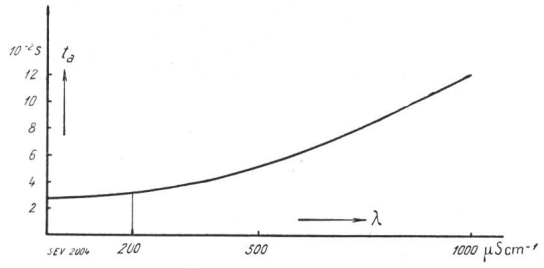



Fig. 5.
Lichtbogenlöschung in Abhängigkeit von der Leitfähigkeit des Löschmittels.

dauer veranschaulicht. Die Verwendung des Expansins ist daher nicht deshalb erforderlich, weil es besonders günstige Verhältnisse für die Lichtbogenlöschung gibt, sondern weil es die Gewähr für einen ungestörten Dauerbetrieb in sich vereinigt, und zwar hinsichtlich Korrosion, Erstarren bei tiefen Temperaturen und Emulgieren.

Beim Aufbau der Freiluftapparate waren einige weitere wesentliche Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Der eigentliche Leistungsschalter musste vollständig nach aussen abgeschlossen werden, damit weder Wasser noch Schnee eindringen können. Als Schaltflüssigkeit musste eine Flüssigkeit gewählt werden, deren Erstarrungspunkt bei mindestens —40° liegt. Ferner war anzustreben, für die Isolation nach Erde die erprobten Schirmisolatorentypen aus Porzellan zu verwenden. Diese Forderungen wurden von dem Konstrukteur Paul Duffing in vorbildlicher Weise konstruktiv verwirklicht. Der prinzipielle Aufbau der Freiluftschalter geht aus Fig. 6 hervor. Es bedeutet darin 1 einen normalen Freiluftstützer, auf den der Leistungsschalter 2 aufgebaut ist, 3 ist der feststehende, 4 der bewegliche Kontakt, 5 die mehrstufige elastische Expansionskammer nach dem Vorschlage von Werner Kaufmann. Die Kondensationskammer besteht aus einem Repelitrohr 6, das an seinem oberen Ende die Geradführung 7 sowie das aus Leichtmetall bestehende Gehäuse 8 trägt, welches gleichzeitig als Muffler dient. Auf einem geerdeten Sockel 9, welcher den Fernantrieb umgibt, befindet sich ein weiterer drehbar angeordneter Stützer 10, welcher einen Kontaktarm 11 trägt. Beim Einschalten wird dieser Kontaktarm um 60° gedreht und kuppelt sich dann mit der Schaltwelle des Leistungsschalters. Wird der Isolator 10 weiter gedreht, so verwandelt sich der Schwenkarm mit Hilfe des im Stützer eingebauten Kegelradantriebes in eine Drehachse und bewirkt als solche die Einschaltung des Leistungsschalters. Beim Aus-

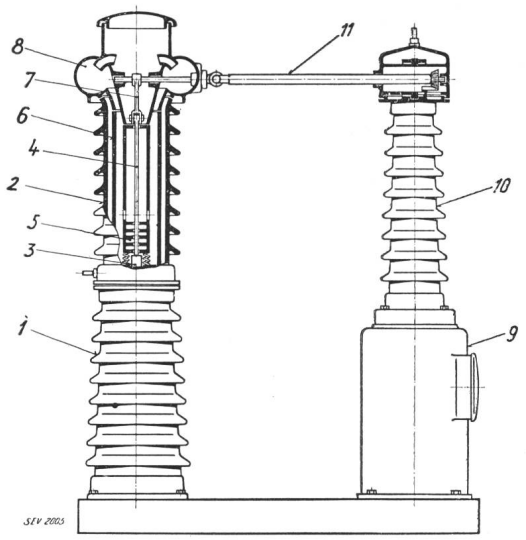



Fig. 6.
Grundform des Freiluftexpansionsschalters.

schalten wird der Leistungsschalter, nachdem seine Achse um wenige Grad zurückgedreht ist, entkuppelt und schaltet aus, worauf dann der Trennschalter sich öffnet, so dass auch bei dieser Schaltertype zwischen den beiden Anschlüssen kein direkter Kriechweg besteht. Die Schaltflüssigkeit dient nicht mehr zur Isolation, sondern ausschliesslich noch zur Lichtbogenlöschung. Deshalb ist es möglich, mit etwa 1 % der Flüssigkeitsmenge auszukommen, welche man heute für Oelschalter hoher Spannungen benötigt.

### III. Die Typenreihe.

Die zurzeit lieferbaren, bzw. unmittelbar vor dem Abschluss stehenden Schaltertypen sind in Tabelle I zusammengestellt, und zwar geordnet nach Betriebsspannung und maximal zulässiger Unterbrechungsstromstärke. Fig. 7 zeigt die Hauptabmessungen des kleinsten und grössten zurzeit lieferbaren Expansionsschalters. Der allgemeine Aufbau einiger weiterer Typen geht aus Fig. 8 und 9 hervor, die auf Grund des bisher Gesagten wohl ohne weiteres verständlich sind. Fig. 10 zeigt schliesslich noch einen Pol eines Freiluft-100-kV-Expansions-

Tabelle I.

| Nennspannung kV | Unterbrechungsstromstärke bei Type R 600 kA | R 602 kA | R 604 kA | R 620 kA | Verwendungsart |
|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 10 | 20 | 40 | — | für Innenraum |
| 10 | 7,5 | 15 | 30 | — | |
| 20 | — | 7,5 | 15 | — | |
| 30 | — | — | 10 | — | |
| 45 | — | — | — | 10 | für Freiluft |
| 60 | — | — | — | 10 | |
| 100 | — | — | — | 10 | |
| 150 | — | — | — | 10 | |
| 200 | — | — | — | 10 | |

schalters. Bei einer verketteten Betriebsspannung von 100 kV erfolgt die Abschaltung in zwei Halbwellen; wird der gleiche Schalter an 200 kV angeschlossen, so ergibt sich, wie Fig. 11 zeigt, eine Lichtbogendauer von drei Halbwellen, ein Beweis für die ausserordentlich intensive Löschwirkung mittels der mehrstufigen elastischen Expansionskammer.

Die Betriebserfahrungen mit Innenraumschaltern können als sehr günstig betrachtet werden; insbesondere hat sich gezeigt, dass der Flüssigkeitsverlust bei betriebsmässigen und auch bei Kurzschluss-Abschaltungen im Netz weit geringer war, als ursprünglich angenommen wurde. Ein Nachfüllen von Flüssigkeit, das ohne Schwierigkeiten auch während des Betriebes vorgenommen werden kann, ist im allgemeinen erst nach 4 bis 6 Monaten erforderlich. Von grossem Interesse ist noch ein Vorfall, der sich in einem grossen Industriebetrieb ereignet hat.

Infolge ungenügender Sicherung einer Schraube, welche zur Fixierung des Kupplungsstückes zwischen Schalter und Antrieb dient, löste sich diese Kupplung, was ein Ausschalten des Expansionsschalters verursachte, das ohne die geringsten Schwierigkeiten vor sich ging. Beim Einsetzen der Kupplung muss nun ein Versehen unterlaufen sein,

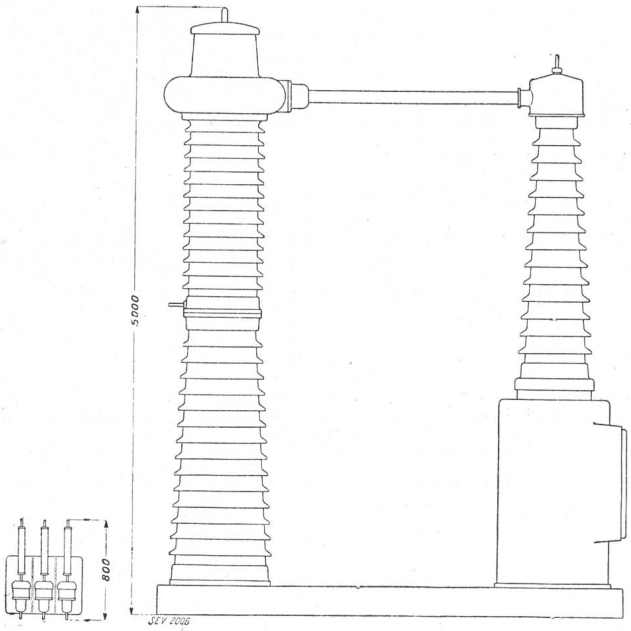



Fig. 7.
Grössenverhältnis des kleinsten und grössten Expansionsschalters.

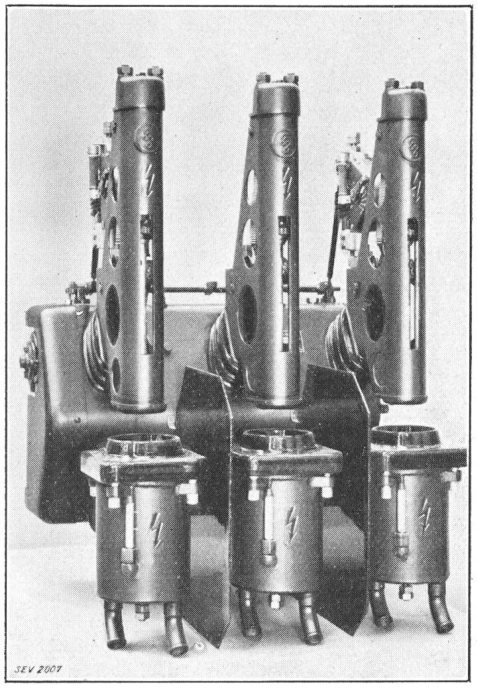



Fig. 8.
Expansionsschalter 10 kV, 350 A, Abschaltstromstärke 15 kA.

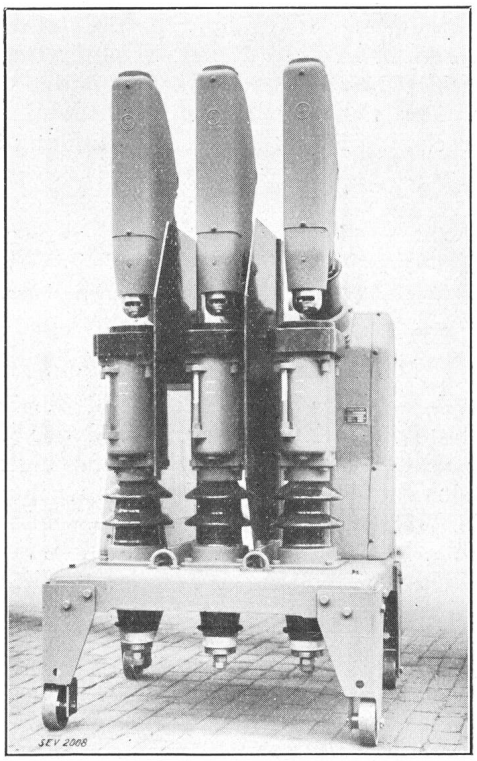



Fig. 9.
Expansionsschalter 10 kV, 600 A, Abschaltstromstärke 30 kA.

das zur Folge hatte, dass der Schaltweg um etwa 12° geringer war, so dass die Stiftkontakte unmittelbar vor den feststehenden Tulpenkontakten stehen blieben. Da mit diesem Schalter ein Motor von

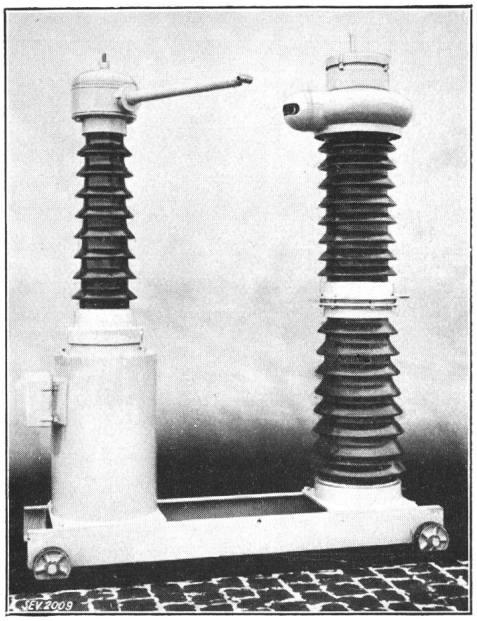



Fig. 10.
Freiluftexpansionsschalter 100 kV, 600 A, Abschaltstrom 10 kA.

2500 kVA eingeschaltet wird, entstand in der Dampfkammer ein Stehfeuer, welches zu starker Dampfentwicklung führte. Es wurde eine erhebliche Menge Flüssigkeit durch die Auspuffrohre ausgeschleudert. Sobald der Schaltwärter den Vorfall bemerkte, brachte er den Schalter durch Betätigung des entsprechenden Druckknopfes zur Auslösung. Der Schalter hat noch ordnungsgemäss unterbrochen. Die nähere Besichtigung zeigte einen starken Abbrand am Schaltstift, mässigen Abbrand am feststehenden Kontakt und geringe Beschädigung an der Isolation der Dampfkammer (Fig. 3 *a*). Nach Auswechslung der genannten Teile und richtiger Einstellung der Kupplung konnte der

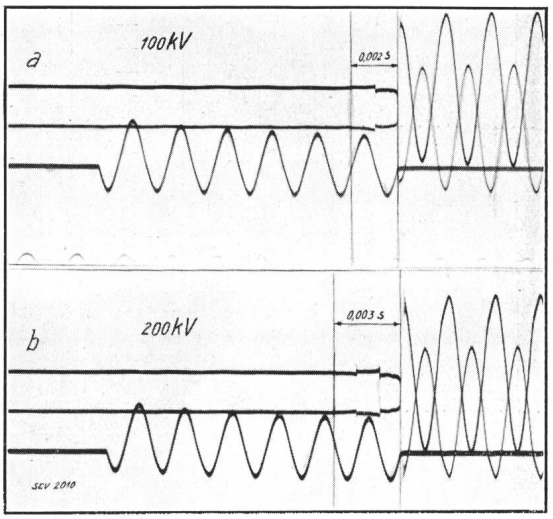



Fig. 11.
Oszillogramm des Abschaltvorganges bei *a* einem 100 kV- und bei *b* einem 200 kV-Expansionsschalter.
(Die beiden gleichen Spannungen sind über Widerstände zu beiden Seiten eines geerdeten Nullpunktes gemessen und müssen bei der Auswertung addiert werden.)

Schalter unverändert wieder in Betrieb genommen werden. Aus diesem Vorfall geht mit aller Deutlichkeit der grosse Vorzug des ölfreien Schalters hervor, denn wäre der gleiche mechanische Defekt bei einem Oelschalter aufgetreten, so hätte dies sicherlich zu einer Zerstörung und damit zu einem schweren Oelbrande geführt, der im vorliegenden Fall, in dem es sich um eine Schaltanlage in einem Keller handelt, die verheerendsten Folgen gehabt hätte.

# Zur Frage der Prüfung der elektrischen Kochgeräte.

Von *Paul Seehaus*, Ingenieur, Therma A.-G., Schwanden.

(Fortsetzung von Seite 239 und Schluss.)

## III. Temperaturspannungen.

Von besonderer Wichtigkeit sind die in einer Kochplatte beim Beheizen und bei der Wärmeabgabe auftretenden Temperaturspannungen, weil durch sie eventuell Deformationen entstehen, somit die die Wärmeübertragung beeinflussenden Kontaktstellen herausgebildet werden. Diese Spannungen sind den auftretenden Temperaturdifferenzen proportional und hängen zudem sehr wesentlich von der Art der Temperaturverteilung in der Platte ab. Ueber ihre Grösse können uns nur auf der Temperaturverteilung fussende, mathematische Untersuchungen Aufschluss geben. Für diese lassen sich die Entwicklungen von Lorenz [4]) benützen, wobei wir der Einfachheit wegen wieder annehmen, dass unsere Platte ein Hohlzylinder mit dem inneren Radius $r = \varrho$ und dem äusseren Radius $r = R$ sei, die Plattendicke ist gleich der Hohlzylinderlänge.

Mit $\sigma_t$ = Spannung in der Richtung der Tangente
$\sigma_r$ = Spannung in der Richtung des Radius
$\sigma_z$ = Spannung in der Richtung der Axe
$E$ = Elastizitätsmodul } des Materials
$\alpha$ = Ausdehnungskoeffizient } des Materials
$m$ = Koeffizient der Querkontraktion = 10/3 für Metalle (Bach)

$$G = \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{m+1} \cdot E = \text{Schubmodul}$$

[5]) Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 1907, S. 743.