

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 30 (1939)  
**Heft:** 22

**Artikel:** IV. Teil : Referate von Firmenvertretern : Der Druckluftschalter und die Bedeutung seiner kurzen Ausschaltzeit für den Netzschutz  
**Autor:** Thommen, H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1060889>

### **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:** 04.04.2026

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

## Schalterfragen.

Bericht über die Diskussionsversammlung des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) vom 26. November 1938, Kursaal Schänzli in Bern.

Fortsetzung und Schluss von *Schalterfragen* von Nr. 21, S. 680.

### IV. Teil. Referate von Firmenvertretern.

#### Der Druckluftschalter und die Bedeutung seiner kurzen Ausschaltzeit für den Netzschutz.

Von H. Thommen, Baden.

621.316.57.064.45

Nach einem Rückblick auf das Wesentliche der Entwicklung der modernen Schalter wird auseinandergesetzt, warum Brown Boveri sich für den Druckluftschnellschalter entschieden hat. Für den praktischen Netzbetrieb wird die Bedeutung einer kurzen Ausschaltzeit auf Grund von Versuchsergebnissen hervorgehoben. Das Wesen und die Ausbildung der Lichtbogenlöschung durch Druckluft werden erläutert. Insbesondere werden die Vorteile der doppelstufigen Löschung und der Mehrfachunterbrechung auseinandergesetzt. Auf die Forderungen, die an die Freiluftausführungen zu stellen sind, wird eingegangen. Es folgt eine ausführliche Behandlung des schnellen Wiedereinschaltens bei Kurzschlussstörungen in Freileitungsnetzen. Schliesslich werden an Hand ausgeführter Anlagen die starke bauliche Vereinfachung und die grosse Uebersichtlichkeit gezeigt, die der Druckluftschalter mit sich bringt.

Après avoir donné un aperçu des principales phases de l'évolution des interrupteurs modernes, l'auteur expose pourquoi Brown Boveri a opté pour l'interrupteur rapide à air comprimé. A l'aide de résultats d'essais il fait ressortir l'importance de la courte durée de coupure pour l'exploitation des réseaux. Il explique ensuite le phénomène de l'extinction de l'arc par l'air comprimé, en appuyant sur les avantages de l'extinction à deux gradins et de la coupure multiple. L'auteur énumère les exigences à poser aux types destinés au montage en plein air et traite à fond le problème du réenclenchement rapide lors de courts-circuits dans les réseaux aériens. Finalement, il cite quelques exemples d'installations pour montrer les simplifications qu'entraîne l'interrupteur à air comprimé dans la disposition générale de l'appareillage.

#### 1. Einleitung.

Die Schaltertechnik hat in den letzten 10 Jahren ausserordentlich weitgehende Umwandlungen durchgemacht. Der Anstoss hiezu wurde durch

«Weg vom Oel in Schaltern und Schaltanlagen» möglichst weitgehend zu erfüllen.

Die Entwicklung der modernen Schalter erfolgte schrittweise. Gleichzeitig mit den öllosen und öl-

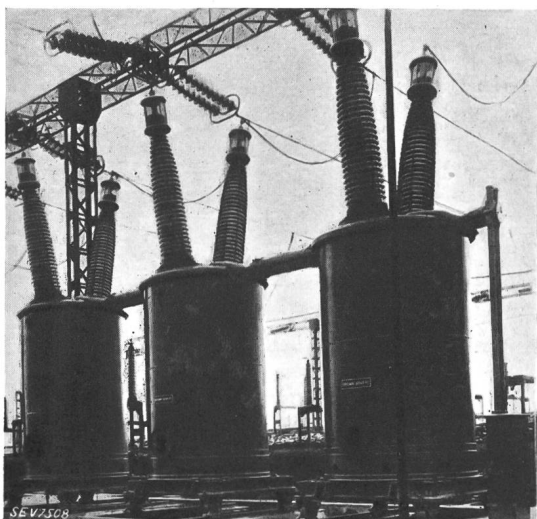


Fig. 1.  
220-kV-Kesselölschalter.

einige schwere Oelschalterexplosionen gegeben, die sehr umfangreiche Betriebsstörungen und zum Teil Todesfälle beim Betriebspersonal zur Folge hatten. Die vergangene Periode ist gekennzeichnet durch das Bestreben, die seinerzeit aufgestellte Forde-

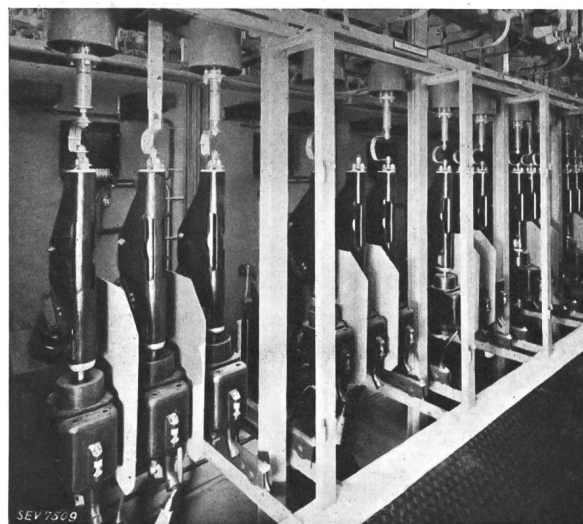


Fig. 2.  
Schaltanlage mit 11-kV-Wasserschaltern.

armen Typen wurde auch die Vervollkommnung der Kesselölschalter gründlich studiert (Fig. 1). Da das Oel in diesen nicht nur für die Lichtbogenlöschung, sondern auch für die Isolation der Kontakte gegen Erde verwendet wird, konnte der Öl-

inhalt besonders bei hohen Betriebsspannungen nicht wesentlich herabgesetzt werden.

Auf Grund von umfangreichen Versuchen wurde die Erkenntnis gewonnen, dass das Oel als Schaltflüssigkeit durch Wasser ersetzt werden kann (Fig. 2). Die mit Wasser gefüllten Schaltkammern sind durch Stützisolatoren gegen Erde isoliert. Man glaubte zuerst, dass das Prinzip des Wasserschal-

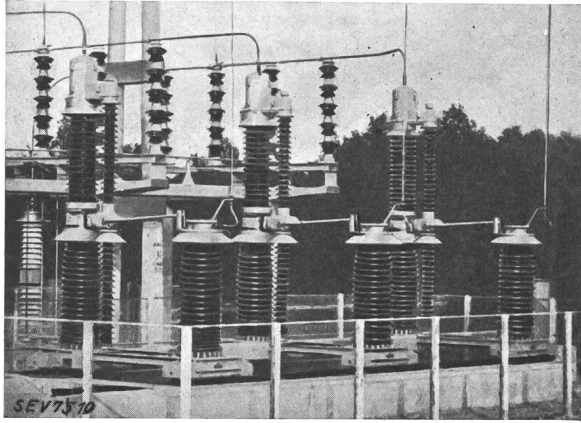


Fig. 3.  
220-kV-Konvektorschalter.

ters bis zu beliebigen Spannungen anwendbar sei. Die Versuche haben aber bald gezeigt, dass bei Spannungen über 30 kV wiederum zum Oel zurückgegriffen werden muss. Die dadurch entstandenen ölarmen Schalter stellen, was den Oelinhalt anbelangt, einen grossen Fortschritt dar. Im 220-kV-Konvektorschalter (Fig. 3) ist zum Beispiel die Oelmenge hundertmal kleiner als bei einem entsprechenden Kesselölschalter.

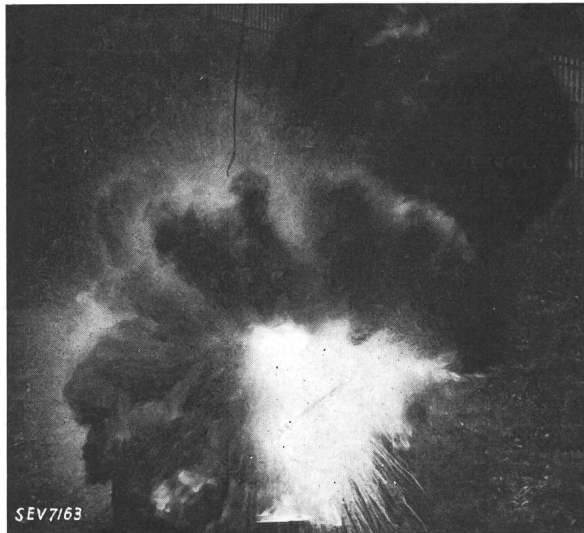


Fig. 4.  
Stichflammen und Qualm bei kurzzeitiger Berührung eines Lichtbogens mit einem Liter Oel.

Die grundsätzlichen Mängel des Oelschalters sind weder durch die Verwendung von Wasser noch durch die Verminderung der Oelmenge behoben. In jedem Flüssigkeitsschalter kann bei einem Versagen Dampf in solcher Menge erzeugt werden,

dass ein Explodieren von Schalterteilen möglich ist. Fig. 4 zeigt die Stichflammen und den Qualm, die bei der Berührung eines Lichtbogens mit einem einzigen Liter Oel in kurzer Zeit entstehen. Die Aufnahme beweist, dass auch kleine Oelmengen sich verhängnisvoll auswirken können, wenn ein Schalter infolge eines Fehlers oder durch Ueberbeanspruchung defekt geht.

Mit dem Druckluftschalter wird das Oel bis zu den höchsten Spannungen vollständig vermieden. Er arbeitet mit einem zum voraus gegebenen, nicht überschreitbaren Betriebsdruck und ist deshalb explosionsicher. Im weitern ist diese Schalterart für die Durchbildung als Schnellschalter mit kürzester Ausschaltzeit weitaus am besten geeignet.

Brown Boveri hat von Anfang an allen Bauarten grosse Aufmerksamkeit geschenkt. Wenn in den folgenden Ausführungen ausschliesslich vom Druckluftschnellschalter die Rede ist, liegt der Grund darin, dass diesem kompromisslosen Schalter nach den neuesten Forschungsversuchen eine immer mehr wachsende Bedeutung zukommt.

2. Die Bedeutung einer kurzen Ausschaltzeit.

Die Dauer eines Kurzschlusses im Netz setzt sich zusammen aus der Betätigungszeit  $t_1$  der Schutzrelais und der Ausschaltzeit  $t_2$  der Schalter. Unter  $t_2$  versteht man die Zeitdauer zwischen der Erteilung des Auslösebefehls bis zur Lichtbogenlöschung. (Siehe Oszillogramme Fig. 24, 27 und 40). Die

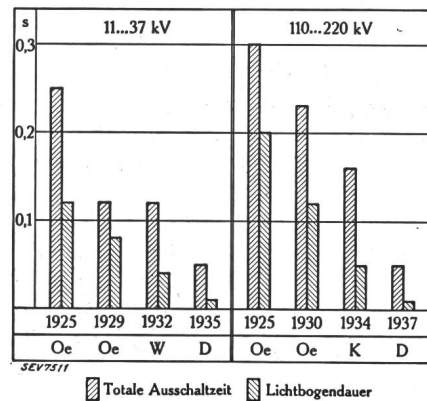


Fig. 5.  
Entwicklung der Ausschaltzeiten von Hochleistungsschaltern seit 1925.  
Oe Kesselölschalter.  
W Wasserschalter.  
K Konvektorschalter.  
D Druckluftschnellschalter.

Ausschaltzeit der eingebauten Schalter spielt für die Staffelung der Relaiszeiten eine ausschlaggebende Rolle. Mit modernen Schnellschaltern können die Einstellzeiten auch in der Nähe der Stromerzeuger auf ein Minimum herabgesetzt werden. Für industrielle Strombezüger werden seit jeher einfache Zeitrelais mit Momentauslösung bei Kurzschluss verwendet. Die Selektivrelais wurden in neuester Zeit so verbessert, dass sie ebenfalls nur wenige Hundertstelssekunden benötigen. Mit solchen schnellwirkenden Relais ist die Dauer der Netzkurzschlüsse praktisch nur noch von der Schalterzeit allein abhängig.

In Fig. 5 ist die Entwicklung der Schaltzeiten von Hochleistungshaltern seit dem Jahre 1925 zusammengestellt. Man erkennt daraus das Bestreben, sowohl die Lichtbogendauer, als auch die totale Ausschaltzeit der Schalter immer mehr herabzusetzen. Erst mit dem Druckluftschalter ist es möglich geworden, die kurze Ausschalt-

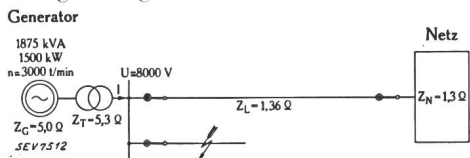


Fig. 6.

Schema für Stabilitätsversuche mit verschiedener Kurzschlussdauer.  
Alle Kurzschlussimpedanzen beziehen sich auf eine Spannung von 8000 V.

zeit von 0,04 bis 0,05 s selbst bei höchsten Spannungen zu erreichen. Demgegenüber benötigen moderne ölarme Schalter eine ca. drei bis viermal grössere Zeitdauer für die Stromunterbrechung.

Von allen Massnahmen, die zur Aufrechterhaltung der Stabilität bei Kurzschlußstörungen ergriffen werden, ist die rasche Abschaltung der Kurzschlüsse die wirksamste. Um den Einfluss der Kurzschlussdauer kennen zu lernen, wurden Versuche durchgeführt, bei denen ein 1500-kW-Generator gemäss Schema (Fig. 6) mit voller Leistung auf ein ausgedehntes 8000-V-Netz arbeitete. Auf einer Verteilleitung leitete man Kurzschlüsse ein, die nach verschiedenen Zeiten vom betreffenden Speiseleitungs-Schalter unterbrochen wurden.

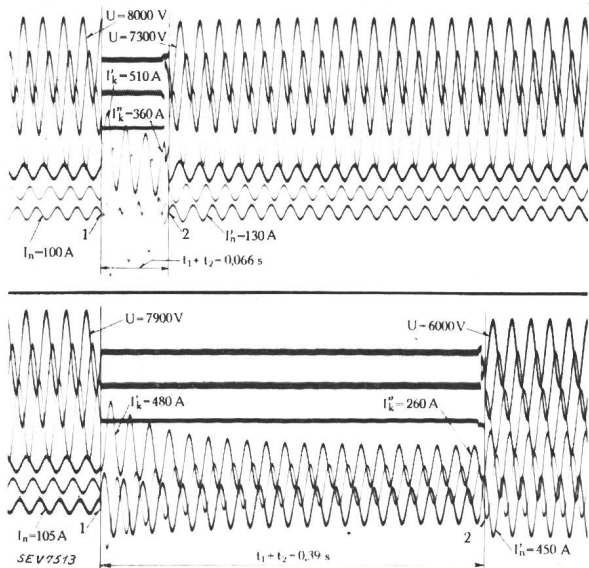


Fig. 7.

Strom- und Spannungsschwankungen des Generators bei kleiner und grosser Kurzschlussdauer.

- 1 Beginn des Kurzschlusses, 2 Abschaltung des Kurzschlusses.
  - $I_n$  Normalstrom des Generators vor der Störung.
  - $I_k$  Anfangskurzschlußstrom des Generators.
  - $I'_k$  Kurzschlußstrom vor der Kurzschlussunterbrechung.
  - $I_n$  Stromstösse des Generators nach der Kurzschlussunterbrechung.
- Die Ströme wurden auf der abgehenden Leitung gemessen.

In Fig. 7 sind Oszillogramme, die bei kleiner und grosser Kurzschlussdauer aufgenommen wurden, einander gegenübergestellt. Während der

Kurzschlüsse hat sich der Spannungsvektor des Generators gegenüber den Vektoren der übrigen Netzwerke verschoben, da die synchronisierenden Kräfte infolge der zusammengebrochenen Netzspannung fehlten. Nach der Abschaltung der kranken Leitung nahm der Generator den Normalbetrieb nicht sofort wieder auf, sondern es ent-

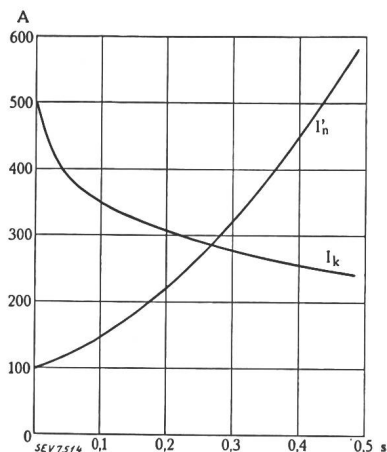


Fig. 8.

Synchronisierungsstromstoss  $I'_n$  nach verschiedener Kurzschlussdauer im Vergleich zum Abklingen des Kurzschlussstromes  $I_k$ .

standen Ausgleichströme, die weiter dauerten, bis alle Maschinen wieder im Tritt waren.

Kurve  $I'_n$  der Fig. 8 zeigt die nach der Kurzschlussunterbrechung gemessenen Stromstösse in Abhängigkeit der Kurzschlussdauer. Als Vergleich dazu ist das Abklingen des Kurzschlußstromes des verwendeten Generators ebenfalls aufgetragen (Kurve  $I_k$ ). Der Normalbetrieb stellte sich um so eher wieder ein, je schneller die Unterbrechung des Kurzschlusses erfolgte. Nach einer Kurzschlussdauer von mehr als 0,27 s hingegen, wurde der Synchronisierungsstromstoss grösser als der Kurzschlußstrom selbst, was weitere unnötige Schalterauslösungen zur Folge hatte.

Um bei Kurzschlüssen das Auseinanderlaufen der Generatoren zu verringern, ist die Verwendung von Schaltern mit kürzester Ausschaltzeit nötig. Stabilitätsstörungen und unnötige Strom- und Spannungsschwankungen können dadurch weitgehend vermieden werden. Theoretische Überlegungen zeigen, dass diese Schlussfolgerung für beliebig hohe Maschinenleistung Gültigkeit hat. Um hiezu den praktischen Beweis zu erbringen, ist vorgesehen, ähnliche Versuche wie die beschriebenen in nächster Zeit im Grossen durchzuführen.

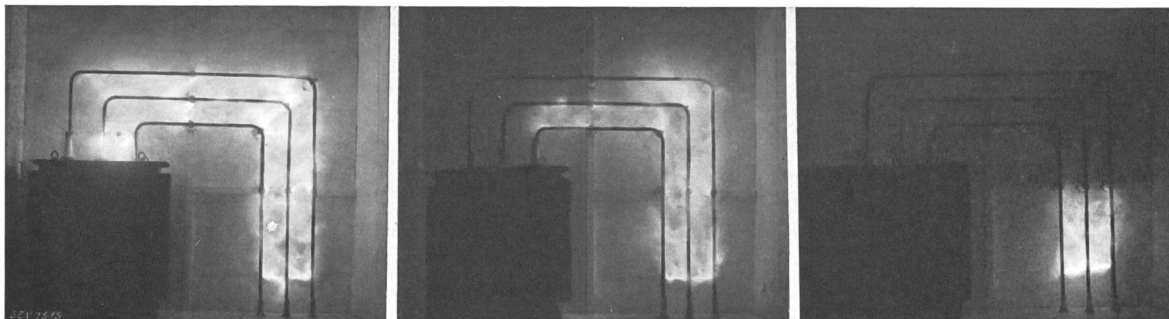
Kurzschlusslichtbogen wandern in Richtung der elektrodynamischen Kräfte den Leitungen entlang. In der aus Fig. 9 zu ersiehenden Transformatorzelle ist rechts unten ein Kurzschluss mit 5000 A Kurzschlußstrom entstanden, welcher nach verschiedenen Zeiten abgeschaltet wurde. Selbst bei Verminderung der Kurzschlussdauer auf 0,15 s wurde eine grosse Fläche der Zelle vom Lichtbogen bestrichen. Die Wandergeschwindigkeit des Bogens war im Durchschnitt 30 cm pro 0,01 s.

Nachdem für die Ausschaltung ein Schnellschalter verwendet wurde, konnte die Kurzschlussdauer einschliesslich Relaiszeit auf 0,05 s herabgesetzt werden. Der Lichtbogen hat sich dabei nur um eine unbedeutende Strecke weiterbewegt. Die Ver-

wendung von kurzen Ausschaltzeiten ist also ein äusserst wirksames Mittel, um die Lichtbogen auf den Fehlerort zu lokalisieren. Dadurch wird der verursachte Schaden und, was nicht weniger wichtig ist, die Dauer einer Störung auf ein Minimum herabgesetzt. Diese Schlussfolgerung gilt ohne jegliche

Dauer von einigen Zehntelsekunden der Bruch des Porzellans erfolgt.

Diese Beispiele dürften genügen, um zu zeigen, dass im Netzbetrieb nicht nur ein sicheres, sondern in jedem Fall auch ein rasches Abschalten der Kurzschlüsse von grosser Wichtigkeit und grossem Vor-



Kurzschlussdauer 0,3 s.

Kurzschlussdauer 0,15 s.

Kurzschlussdauer 0,05 s.

Fig. 9.

Ausbreitung des Kurzschlusslichtbogens in einer Transformatorenzelle.

Einschränkung sowohl für Grossanlagen wie auch für die kleinsten Industrieanlagen.

Auf Freileitungen bleiben die Lichtbogen infolge der grossen Leiterabstände meistens an den Isolatoren hängen. Fig. 10 zeigt Freileitungsisolatoren, die bei einem Strom von 10 000 A mit zunehmender Lichtbogendauer beansprucht waren. Bei der Abschaltung mit Schnellschaltern wird

teil ist. Dabei ist jede Hundertstelssekunde, um die die Ausschaltzeit der Schalter herabgesetzt werden kann, von massgebender Bedeutung.

**3. Die Lichtbogenlöschung mit Druckluft.**

Sicher und schnell heissen die beiden Hauptforderungen, die an den modernen Hochspannungsschalter gestellt werden. Um sie zu erfüllen, ist es nötig, dass alle Schalterteile sehr sorgfältig durchgebildet sind. Insbesondere müssen die Kontakte die Eigenschaft haben, den Strom in kürzester Zeit zu unterbrechen.

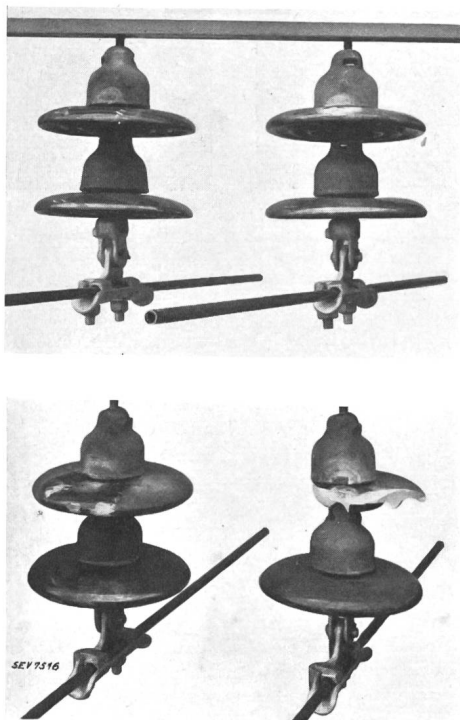


Fig. 10.

Freileitungsisolatoren nach Lichtbogenbeanspruchung mit verschiedener Dauer.

Lichtbogendauer: links oben: 0,06 s; rechts oben: 0,15 s  
links unten: 0,3 s; rechts unten: 0,7 s

lediglich die Oberfläche leicht angegriffen. Mit zunehmender Kurzschlusszeit hingegen werden die Beschädigungen grösser, bis schliesslich bei einer

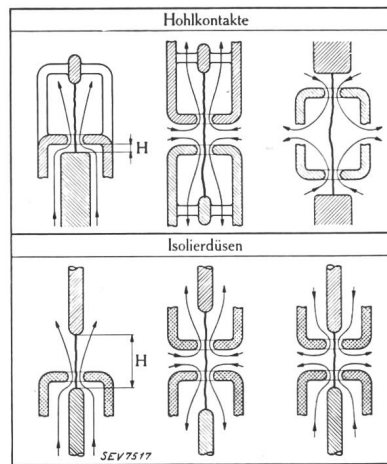


Fig. 11.

Verschiedene Anordnungen für die Lichtbogenlöschung mit Druckluftströmung. H Unterbrechungsdistanz der Kontakte.

Die Lichtbogenlöschung beruht bei fast allen Schalterarten darauf, dass der Lichtbogen von Gasen oder Dämpfen bespült und abgekühlt wird. In der Erzeugung und Zusammensetzung dieser Löschmittel bestehen jedoch grundsätzliche Unterschiede. In den meisten Schaltern werden diese aus festen oder flüssigen Stoffen durch den Lichtbogen selbst gebildet und in Bewegung gesetzt. Beim Druckluftschnellschalter hingegen fällt diese zeitraubende Vorbereitungsperiode dahin, da das Löschgas in fertigem Zustand in einem Behälter aufgespeichert ist.

In Fig. 11 sind einige grundlegende Anordnungen zur Lichtbogenlöschung zusammengestellt, mit

denen mit Druckluftströmung brauchbare Resultate erzielt werden können. Die Bebläsung ist immer eine allseitige, so dass der Lichtbogen der Luftströmung nicht ausweichen kann. Die hohlen Kontakte haben gegenüber den Isolierdüsen den Vorteil einer kleinen Unterbrechungsdistanz. Es ist aus diesem Grunde mit ihnen möglich, die Abschaltung schon im ersten Nulldurchgang des Stromes nach der Kontakttrennung zu vollziehen. Ferner kommt bei Hohlkontakten der Lichtbogen nur mit Metallteilen in direkte Berührung.

Bei den hohlen Kontakten unterscheidet man solche mit Einfachbebläsung und solche mit Doppelbebläsung des Lichtbogens. Umfangreiche Forschungsversuche haben ergeben, dass bei kleinen und mittleren Betriebsspannungen mit der gewöhnlichen Einfachbebläsung eine ebenso gute Löschwirkung erreicht werden kann wie mit der Doppelbebläsung. Für die höchsten Betriebsspannungen werden mehrere Unterbrechungsstellen mit einfacher oder doppelter Bebläsung des Lichtbogens in Serie verwendet. Nach der Entstehung des Lichtbogens wird derselbe durch den Luftstrom so-

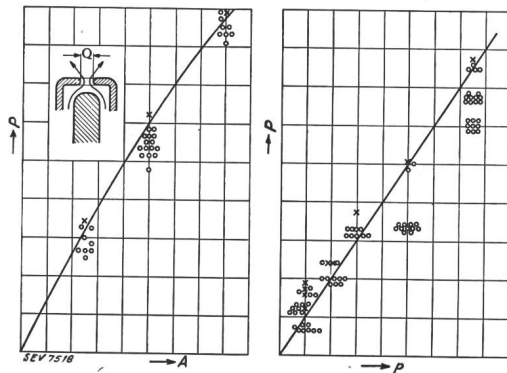


Fig. 12.

Einfluss des Strömungsquerschnittes  $A$  und des Betriebsdruckes  $p$  auf die Abschaltfähigkeit  $P$  von hohlen Kontakten.

fort in die Mittelaxe geblasen. Wenn sich der Strom dem natürlichen Nulldurchgang nähert, wird die Temperatur in der Lichtbogenzone durch die Wirkung der Luftströmung stark herabgesetzt, so dass die ionisierte Gastrecke an Ausdehnung verliert. Für die endgültige Löschung schiebt sich an der bestbespülten Stelle des Lichtbogenfadens eine isolierende Luftschicht ein.

In theoretischen Arbeiten ist versucht worden, die physikalischen Vorgänge, die sich bei der Lichtbogenlöschung abspielen, einer Berechnung zu unterziehen. Unsere Erfahrungen zeigen, dass solche Berechnungen nur selten mit den praktischen Versuchsergebnissen in Übereinstimmung gebracht werden können. Die thermodynamischen Vorgänge in der Lichtbogenzone sind derart verwickelt, dass nur systematisch durchgeführte Versuche in der Hochleistungsversuchsanlage einen Einblick in die Eigenschaften der verschiedenen Löscheinrichtungen gewähren.

Durch Vergrößerung der Bohrungen und besonders auch des Betriebsdruckes kann die Abschaltfähigkeit von Hohlkontakten erheblich gesteigert werden (Fig. 12). Um möglichst wirtschaft-

liche Schalter zu erhalten, ist es vorteilhaft, mit einem hohen Druck zu arbeiten (Fig. 13). Eine grosse Zahl von ausgeführten Schaltanlagen liefern den Beweis, dass durch die Verwendung von

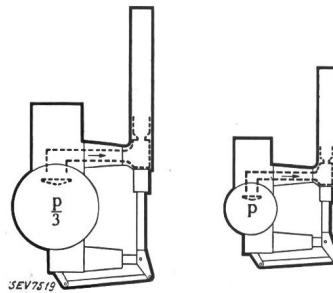


Fig. 13.  
Einfluss des Betriebsdruckes auf die Aussenabmessungen von Druckluftschaltern.  
Verhältnis der Drücke 1 : 3.

Schalterdrücken bis max. 15 kg/cm<sup>2</sup> keinerlei Schwierigkeiten in der Druckluftversorgung auftreten.

Wie das Strömungsbild Fig. 14 links zeigt, entsteht bei zu grossem Kontaktabstand hinter den Kontakten ein Wirbelgebiet, in welchem sich bildende Metalldämpfe zurückgehalten und dadurch die Abschaltungen erschwert werden. Zur Erreichung höchster Abschaltleistung ist es nötig, dass ein günstigster Löschhub unter keinen Umständen

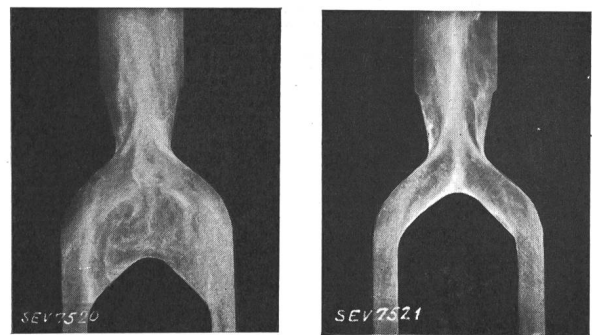


Fig. 14.

Strömungsbilder bei grosser und kleiner Unterbrechungsdistanz der Kontakte.

überschritten wird. Diese Forderung kann am einfachsten durch die Unterteilung der Kontakte in Lös- und Trennkontakte erfüllt werden.

Beim Öffnen des Hauptventils strömt die Druckluft durch die hohlen Isolatoren zu den Löschkammern (Fig. 15 mittlere Schalterstellung). Unter dem Einfluss der grossen pneumatischen Kräfte er-

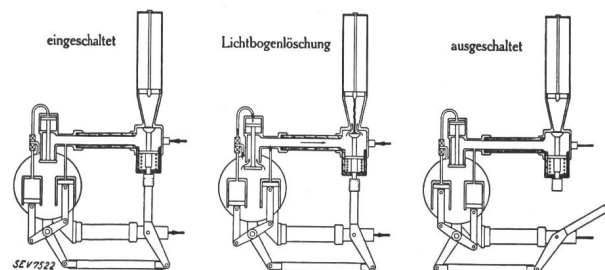


Fig. 15.

Grundprinzip des Druckluftschalters.

folgt die Löschkontaktbewegung mit grosser Geschwindigkeit. Infolge der kleinen bewegten Massen bei gleichzeitig kleinstem Hub unterbricht der Schalter mit kürzester Ausschaltzeit. Massenwirkun-

gen wie bei andern Schaltern mit grossem Kontakt-hub sind beim Druckluftschneckschalter trotz der kleinen Ausschaltzeit nicht zu befürchten.

Die Serietrennkontakte öffnen anschliessend mit Zeitverzögerung stromlos und stellen eine weithin sichtbare Trennstrecke her, die jede Kriechwegbildung verhindert. Dieser Grundsatz der offenen

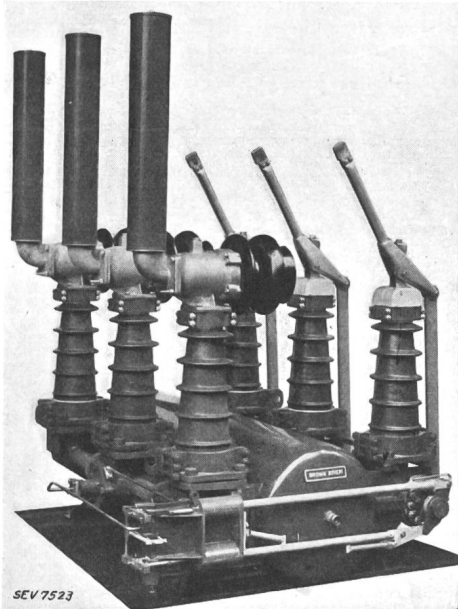


Fig. 16.

64-kV-Druckluftschneckschalter für Innenraum in Offenstellung. Abschaltleistung 800 MVA.

Trennstrecke wird von den tiefsten bis zu den höchsten Betriebsspannungen angewendet. Fig. 16 zeigt den 64-kV-Schalter für Innenraum in ausgeschaltetem Zustand. Er ist in seinem Aufbau ausserordentlich einfach und übersichtlich. Der Antrieb ist natürlich ein Druckluftantrieb und übertrifft als solcher hinsichtlich Einfachheit jede andere Bauart.

Man hat eingewendet, dass beim Unterbrechen von kleinen Strömen mit Druckluftschneckschaltern unzulässige Schaltspannungen entstehen könnten. Dabei war in erster Linie an das Abschalten von leerlaufenden Transformatoren sowie von unbe-

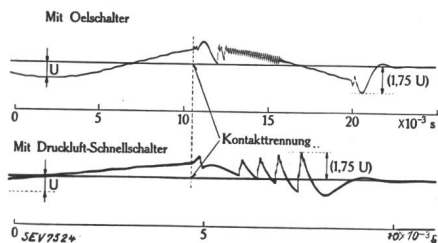


Fig. 17.

Spannungsverlauf über einem Transformator beim Unterbrechen des Leerlaufstromes.

Versuchsspannung: 5,8 kV. Leerlaufstrom: 10 A.  
Oberes Oszillogramm: Abschaltung mit einem 250-MVA-Oelschalter mit offener Unterbrechung.  
Unteres Oszillogramm: Abschaltung mit einem 250-MVA-Druckluftschneckschalter.

lasteten Kabeln und Freileitungen gedacht. In Fig. 17 ist der Spannungsverlauf über einem Transformator beim Abschalten des Leerlaufstromes dargestellt. Das obere Kathodenstrahl-

oszillogramm wurde mit einem Oelschalter, das untere mit einem Druckluftschneckschalter aufgenommen. Die Spannung hat in beiden Fällen versucht, in regelmässigen Zeitabständen hochzuschwingen. Es traten jedoch Schutzzündungen im Lichtbogenfaden auf, welche die Schaltspannungen auf ein zulässiges Mass begrenzen.

Um die Erfahrungen zu vertiefen, wurden solche Vergleichsversuche auf Transformatoren verschiedener Grösse ausgedehnt. Die Schaltspannungen erreichten mit beiden Schalterarten Werte von gleicher Grössenordnung. Die Kurven in Fig. 18 zeigen als Beispiel die Resultate, die mit einem 37-kV-Transformator von 5000 kVA Leistung bei verschiedener Sättigung erhalten wurden. Kurve 2 ist mit einem Oelschalter, Kurve 3 mit einem

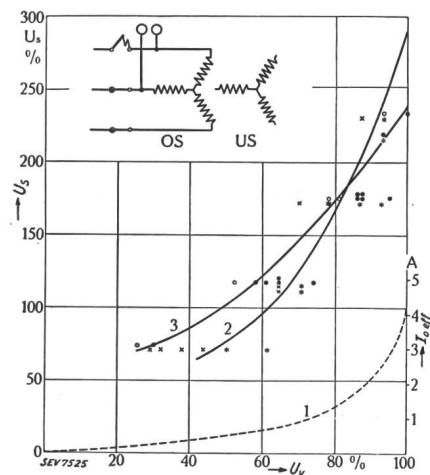


Fig. 18.

Maximale Schaltspannungen beim Ausschalten eines 5000-kVA-Transformators.

- 1 Leerlaufstrom des Transformators.
- 2 Maximale Schaltspannungen beim Unterbrechen mit einem 350-MVA-Oelschalter mit offener Unterbrechung.
- 3 Maximale Schaltspannungen beim Unterbrechen mit einem 500-MVA-Druckluftschneckschalter.

$U_v$  angelegte Spannung am Transformator; 100 % = volle Betriebsspannung = 34,5 kV.  
 $U_s$  Schaltspannungen in % von  $U_v$ .  
Den Kurven liegen 300 durchgeführte Abschaltungen zu Grunde.

Druckluftschneckschalter aufgenommen. Die Schaltspannungen waren bei voller Sättigung des Transformators grösser, wenn mit dem Oelschalter geschaltet wurde.

Im praktischen Betrieb mit Oelschaltern wurden im allgemeinen beim Abschalten von leerlaufenden Transformatoren keine Schwierigkeiten festgestellt. Unter Berücksichtigung der durchgeführten Vergleichsversuche ist nicht einzusehen, warum sich die Druckluftschneckschalter anders verhalten sollten. Die sehr umfangreichen Betriebserfahrungen, die mit diesen Schaltern bereits vorliegen, bestätigen diese Auffassung.

Beim Abschalten von leerlaufenden Freileitungen und Kabeln können nur dann gefährliche Ueber-spannungen auftreten, wenn Schalter verwendet werden, bei denen die Entionisierung der Lichtbogenstrecke nicht genügend rasch erfolgt. Obschon im Löschmoment die wiederkehrende Spannung gering ist und die Unterbrechung bei sehr kleiner Distanz erfolgen kann, nimmt die beanspruchende Spannung eine Halbperiode später hohe Werte an.

Erfolgt nun in diesem Moment eine Rückzündung, so können grosse Ueberspannungen auftreten. Der Druckluftschneckschalter ist der geeignetste Schalter für die überspannungsfreie Unterbrechung von kapazitiven Belastungen, da bei ihm die Schaltstrecke nach der Lichtbogenlöschung sehr rasch gereinigt wird.

**4. Die Entwicklung der Druckluftschneckschalter für höchste Abschaltleistungen und für Freiluftaufstellung.**

Ausser von Strom und Spannung wird jeder Ausschaltvorgang von der Art des Einschwingens der Spannung beeinflusst. Ausgedehnte Forschungsarbeiten ermöglichen, die im Betrieb auftretenden Eigenfrequenzen vorzuberechnen. Die Rechnungen zeigen, dass die Eigenfrequenzen bei höchsten Spannungen weit unterhalb von 10 000 Per./s liegen, hingegen bei kleinen Betriebsspannungen sehr hohe Werte annehmen (Fig. 19).

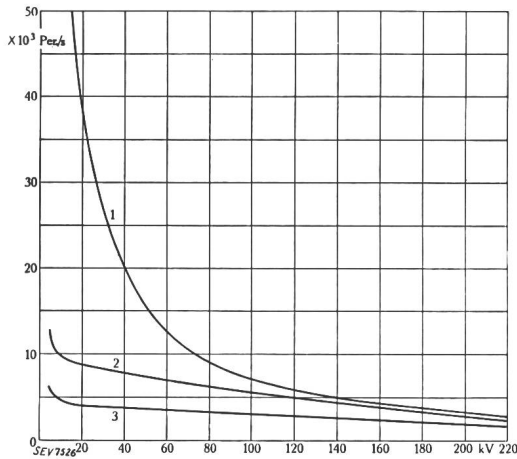


Fig. 19.

Eigenfrequenzen von Transformatoren und Kraftwerken mit Einheitsleistungen von 20 MVA bei verschiedenen Betriebsspannungen.

- 1 Eigenfrequenz der Transformatoren allein; diese tritt im praktischen Betrieb nie mit voller Amplitude auf.
- 2 Eigenfrequenz von Kraftwerken mit Turbomaschinen.
- 3 Eigenfrequenz von Kraftwerken mit langsam laufenden Maschinen.

Unter Eigenfrequenzempfindlichkeit eines Schalters versteht man die Abhängigkeit seiner zulässigen Abschaltleistung von der Eigenfrequenz des verwendeten Stromkreises. Beim Druckluftschalter ist die Empfindlichkeit grösser als bei anderen Schalterarten. Es konnte jedoch auch mit Oel- und Wasserschaltern eine sehr starke Beeinflussung des Verhaltens bei verschiedenem Ansteigen der wiederkehrenden Spannung festgestellt werden. Man hat versucht, die Eigenfrequenzempfindlichkeit der Schalter als Nachteil zu bezeichnen. Diese Behauptung hat jedoch nur beschränkt Gültigkeit, nämlich für unrichtig dimensionierte Schalter. Wenn die Schalter für den höchsten in einem Betrieb auftretenden Spannungsanstieg bemessen werden, haben die gemachten Einwände ihre Bedeutung vollständig verloren.

Für die Erreichung dieses Zieles stehen dem Konstrukteur verschiedene Mittel zur Verfügung. In den weitaus meisten Fällen genügt es, den Durchmesser der hohlen Kontakte, d. h. die Blaswirkung und damit den Luftverbrauch genügend

gross zu wählen. Wenn einerseits für die sehr hohen Abschaltströme bei kleinen Betriebsspannungen und andererseits für die Höchstspannungsschalter andere Wege eingeschlagen wurden, waren hierzu vorwiegend wirtschaftliche Gründe ausschlaggebend.

Der Vorschlag, eine Abschaltung in zwei getrennten Stufen durchzuführen, wobei der Strom in der zweiten Stufe durch einen Widerstand begrenzt wird, ist schon sehr alt. Die mechanische Betätigung der beiden Stufenkontakte hat den schwerwiegenden Nachteil, dass der Widerstand bei Klemmungen im Mechanismus überlastet wird und sogar durchbrennen kann. Eine der schwersten bekannt gewordenen Oelschalterexplosionen ist auf ein solches Versagen der Schutzwiderstände zurückzuführen. Eine Verbesserung wurde dadurch erreicht, dass der Lichtbogen selbst auf die Wider-

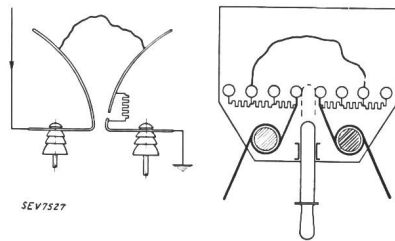


Fig. 20.

Ueberblasen des Lichtbogens auf Widerstandsstufen. Abbildungen aus Patentakten.

standsstufen übergeblasen wird. In einer Patentanmeldung aus dem Jahre 1913 wird bereits das Ueberblasen mit Druckluft an Stelle der in Fig. 20 eingezeichneten magnetischen Blaswirkung erwähnt.

Die in Fig. 21 dargestellte neueste Anordnung stellt die ideale Lösung des Problems dar. Der Widerstand wird nicht mehr bei jeder gewöhnlichen Betriebsschaltung eingeschaltet, sondern nur, wenn

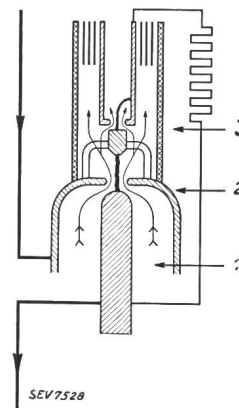


Fig. 21.

Doppelstufige Lichtbogenlöschung mit hohlen Kontakten. 1 Luftzufuhr, 2 Löschkontakt, 3 Funkenstrecke.

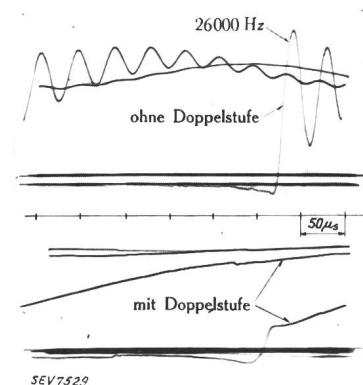


Fig. 22.

Spannungsanstieg über den Löschkontakten mit und ohne Doppelstufe.

besonders schwere Abschaltbedingungen vorliegen. Die Einschaltung erfolgt nach Trennung der Hauptkontakte durch die nach oben geblasenen Metalldämpfe mit einer Hilfsfunkenstrecke. Das Prinzip der hohlen Kontakte mit seinen Vorteilen gegen-

über den Isolierdüsen wird dabei in vollem Umfange beibehalten.

Durch das Ueberbrücken der Funkenstrecke wird der Spannungsanstieg über den Löschkontakten

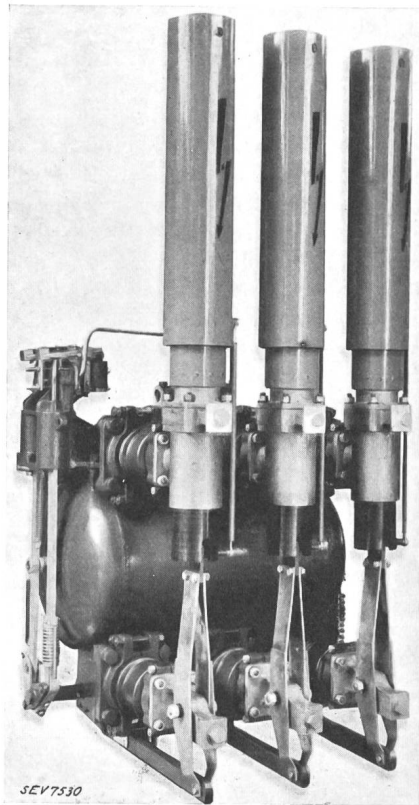


Fig. 23.

11-kV-Druckluftschalter mit doppelstufiger Löschung. Abschaltleistung 750 MVA.

stark verlangsamt, was besonders deutlich aus dem Vergleich der beiden Kathodenstrahloszillogramme in Fig. 22 hervorgeht. Der Lichtbogen an der Fun-

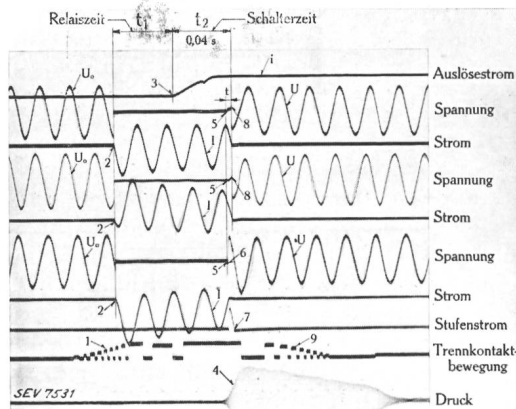


Fig. 24.

Oszillogramm der Ein-Aus-Schaltung mit dem 750-MVA-Druckluftschalter.

- I Symmetrischer Abschaltstrom (Eff.-Wert): 43 000 A.
- U Wiederkehrende Spannung: 8100 V.
- Dreiphasige Abschaltleistung: 600 MVA.
- 1 Einschaltung der Trennkontakte.
- 2 Beginn des Kurzschlusses.
- 3 Auslösespule an Spannung.
- 4 Anstieg des Druckes in den Löschkammern.
- 5 Kontakttrennung.
- 6 Unterbrechung des Hauptstromes in erstlöschender Phase.
- 7 Unterbrechung des Stufenstromes in erstlöschender Phase.
- 8 Unterbrechung in den zweitlöschenden Phasen.
- 9 Ausschaltung der Trennkontakte.

kenstrecke löscht unmittelbar nach der Unterbrechung des Hauptstromes durch den Staudruck im Auspuffkühler.

Die Anwendung der doppelstufigen Löschung ermöglicht, Schalter für grösste Abschaltströme bei kleinem Platzbedarf zu bauen. Fig. 23 zeigt eine Ausführung für 750 MVA Abschaltleistung und 11 kV Betriebsspannung. Gleichzeitig mit einer höchsten Eigenfrequenzsicherheit hat der Schalter die Eigenschaft, dass er beim Unterbrechen von kleinen Strömen nur unbedeutende Schaltspannungen erzeugt, da die Funkenstrecke eine innere Schutzwirkung ausübt.

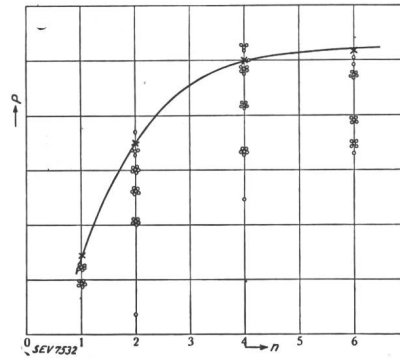


Fig. 25.

Abschaltleistung in Abhängigkeit der Unterbrechungsstellenzahl bei Höchstspannungen.

- o gute Abschaltungen.
  - × Schaltungen mit Stehlichtbogen.
- Die entsprechenden Versuche wurden bei gleichbleibendem Totluftverbrauch durchgeführt.

Mit dem 750-MVA-Schalter wurden bei Versuchen symmetrische Abschaltströme vom Effektivwert 43 000 A einwandfrei abgeschaltet (entsprechendes Oszillogramm siehe Fig. 24). Die Eigenfrequenz des Stromkreises war dabei über 40 000 Per./s. Die Ausschaltzeit des Schalters betrug nur 0,04 s. Der Strom in der zweiten Stufe ist im Zusammenhang mit den Betrachtungen über die Ausschaltzeit ohne Bedeutung, da er gegenüber dem vollen Kurzschlußstrom vollständig verschwindet.

Für das Gebiet der höchsten Betriebsspannungen hat es sich als vorteilhaft erwiesen, mehrere einstu-

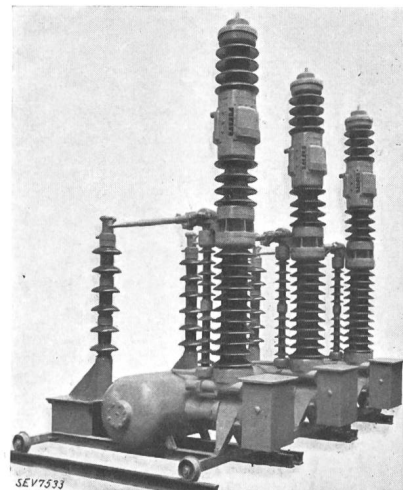


Fig. 26.

150-kV-Druckluftschalter für Freiluft. Abschaltleistung: 1800 MVA.

fige Unterbrechungsstellen in Serie zu verwenden. Fig. 25 zeigt das Anwachsen der Abschaltleistung mit zunehmender Zahl der Unterbrechungsstellen. Die entsprechenden Versuche wurden so durchgeführt,

dass der totale Luftverbrauch konstant geblieben ist.

Der 150-kV-Freiluftschalter (Fig. 26) arbeitet mit 2 Unterbrechungsstellen pro Pol, die in den oberen Hohlisolatoren untergebracht sind. Der grundsätzliche Aufbau hat gegenüber den Innenraumschaltern nicht geändert. Die Aufteilung der

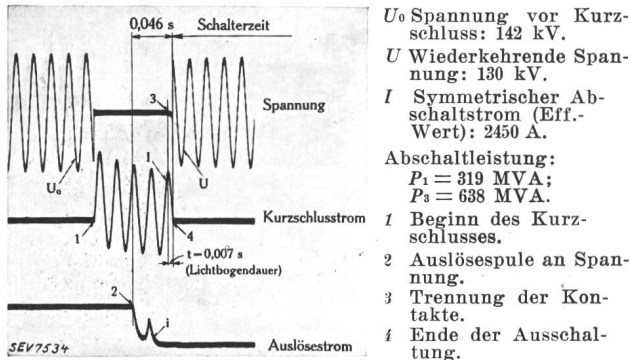


Fig. 27.

Oszillogramm der Ein-Aus-Schaltung mit dem 150-kV-Druckluftschalter.

Kontaktbewegungen ist besonders bei Höchstspannungsschaltern von grosser Wichtigkeit, da nur mit kleinster Masse der Löschkontakte zusammen mit einem kleinen Kontaktweg und grossen Antriebskräften die kürzeste Ausschaltzeit erreicht werden kann. Das Einschalten wird bis zu den höchsten Spannungen mit dem Trennkontakt allein vollzogen. Damit wird eine sofort nachfolgende Ausschaltung durch den Einschaltfunken nicht beeinflusst. Das Oszillogramm in Fig. 27 zeigt, dass die kleine Ausschaltzeit auch nach einer Einschaltung auf Kurzschluss einwandfrei eingehalten wird.

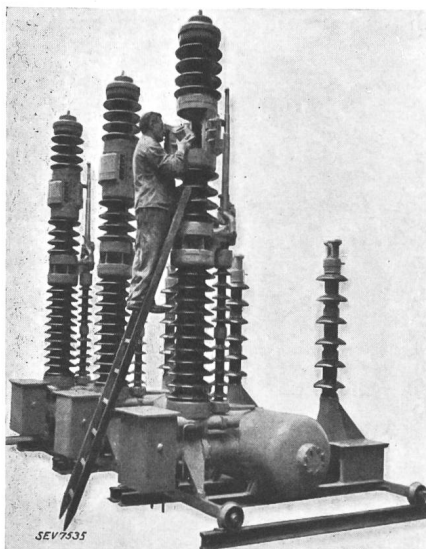


Fig. 28.

Revision der Kontakte an einem 150-kV-Druckluftschalter.

Der Kontaktabbund in den Druckluftschaltern ist infolge der kleinen Lichtbogendauer gering. Die Kontakte müssen deshalb nur äusserst selten ausgewechselt werden. Die Revisionen be-

nötigen zudem eine sehr kurze Zeit, da hierzu, wie aus Fig. 28 zu ersehen ist, nur wenige Schrauben zu lösen sind. Die bei anderr. Schalterarten nicht zu umgehende Panscherei mit einer Schaltflüssigkeit ist beim Druckluftschalter vollständig vermieden.

Bei der Entwicklung von Freiluftschaltern mussten alle Fragen abgeklärt werden, die im Zusammenhang mit den Witterungseinflüssen stehen. Die Verwendung der Druckluft im Freien hat zwar beim Bahnbetrieb einen grossen Sicherheitsgrad erreicht. Die dort gemachten Erfahrungen können jedoch nur zum Teil verwertet werden. Es wurden deshalb in den letzten Jahren sehr eingehende Untersuchungen über den Freiluftbetrieb von Druckluftschaltern durchgeführt. Dabei wurde sowohl das häufige Schalten wie auch ein lang andauernder Stillstand berücksichtigt.

Die Kondenswasserbildung in der Schaltsäule, hervorgerufen durch wechselnde klimatische Verhältnisse, wird durch eine wirksame Durchlüftung der inneren Hohlräume praktisch vollständig vermie-

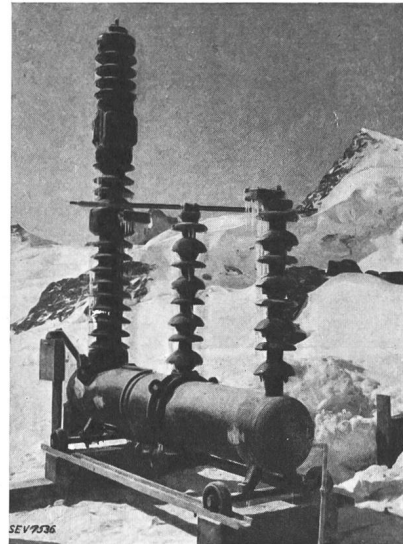


Fig. 29.

150-kV-Druckluftschalter auf dem Jungfraujoch.

den. Aber auch beim Abschalten wird keine Feuchtigkeit ausgeschieden, da die expandierende Druckluft im Gegenteil Feuchtigkeit aus der Umgebung aufnimmt. Viele Tausende von Abschaltungen im Freien bei allen Temperaturverhältnissen bestätigen diese Annahme.

Trotz den günstigen Verhältnissen wurde versuchsweise ein 150-kV-Schalterpol mit Dampf durchblasen, so dass an allen Innenwandungen eine starke Kondensation aufgetreten ist. Die darauffolgenden Abschaltungen mit voller Betriebsspannung verliefen vollständig einwandfrei. Dieses gute Resultat bei extremen Verhältnissen ist auf den Umstand zurückzuführen, dass die beschriebenen Schalter ausschliesslich nur feuchtigkeitsssicheres Isoliermaterial enthalten.

Eine besondere Aufmerksamkeit wurde den Untersuchungen über das Verhalten bei tiefen Temperaturen geschenkt. Der Druckluftschalter arbeitet

mit grossen Kräften bei einem kleinen Hub der bewegten Teile. Ein komplizierter Antriebsmechanismus mit vielen kälteempfindlichen Gelenken ist bei ihm vollständig vermieden. Unter Beachtung dieser Tatsachen und auf Grund von umfassenden Versuchen waren keinerlei Schwierigkeiten bei der grossen Kälte zu erwarten.

Um grösste Sicherheit in dieser Beziehung zu erhalten, wurde im Februar und März des Jahres 1938 ein 150-kV-Schalter mit Kompressoranlage auf dem Jungfrauoch<sup>1)</sup> in 3460 m Höhe aufgestellt (Fig. 29). Dank der gründlich durchgebildeten Konstruktion des Schalters haben die dort durchgeführten Versuche folgendes ergeben:

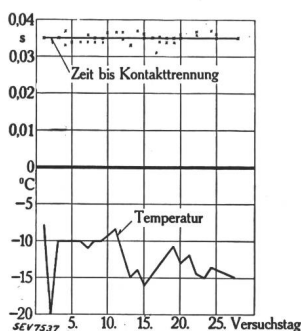


Fig. 30.

Gemessene Schaltzeiten auf Jungfrauoch.

- a) Auch bei lang andauernder grosser Kälte wurden keine Klemmungen an den bewegten Teilen festgestellt.
- b) Der Schalter arbeitete auch während und nach Schneestürmen mit grösster Windgeschwindigkeit einwandfrei. Der Staubschnee drang nicht in das Innere der aktiven Teile ein.
- c) Die Ausschaltzeit wurde bei den Versuchen oszillographisch nachkontrolliert und hat sich bei den verschiedenen Witterungsverhältnissen nicht verändert (Fig. 30).

- d) Der unter einer leichten Holzverschalung aufgestellte Kompressor lief immer mit grösster Sicherheit an.
- e) Bei richtiger Verlegung der Verbindungsleitungen traten in diesen keine Eisbildungen auf.

Gleichzeitig mit dem ganzen Schalterpol wurden verschiedene Trennkontakte ausprobiert. Es wurde eine Konstruktion gefunden, die sowohl beim Aus- als auch beim Einschalten mit stark vereisten Kontakten vollständig zuverlässig arbeitet. Dieser

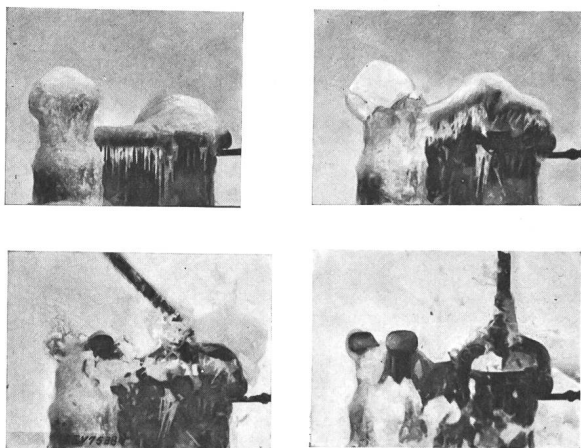


Fig. 31.

Öffnung eines vereisten Trennkontaktes. Ausschnitte aus einer Filmaufnahme.

Trennkontakt ist so durchgebildet, dass beim Ausschalten ein Losbrechen des Eises stattfindet (Fig. 31).

<sup>1)</sup> Diese Versuche wurden durch weitgehendes Entgegenkommen der Direktion der Jungfrauobahn und der Säntis-schwebebahn ermöglicht, was hier dankend hervorgehoben sei.

Zusammengefasst haben die Versuche auf dem Jungfrauoch gezeigt, dass der Druckluftschalter bei richtiger Durchbildung aller Teile und bei zweckmässigem Zusammenbau mit der Druckluftversorgungsanlage weniger kälteempfindlich ist als jede andere Schalterart.

Die Versuche werden im Winter 1938/39 fortgesetzt. Als Aufstellungsort wurde dieses Mal der Säntisgipfel<sup>1)</sup> gewählt, auf welchem nach den Erfahrungen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt ein sehr hoher Feuchtigkeitsgehalt der Luft gleichzeitig mit der grossen Kälte auftritt. Damit sind die Grundbedingungen für stärkste Rauhreifbildung an den Schalterteilen gegeben.

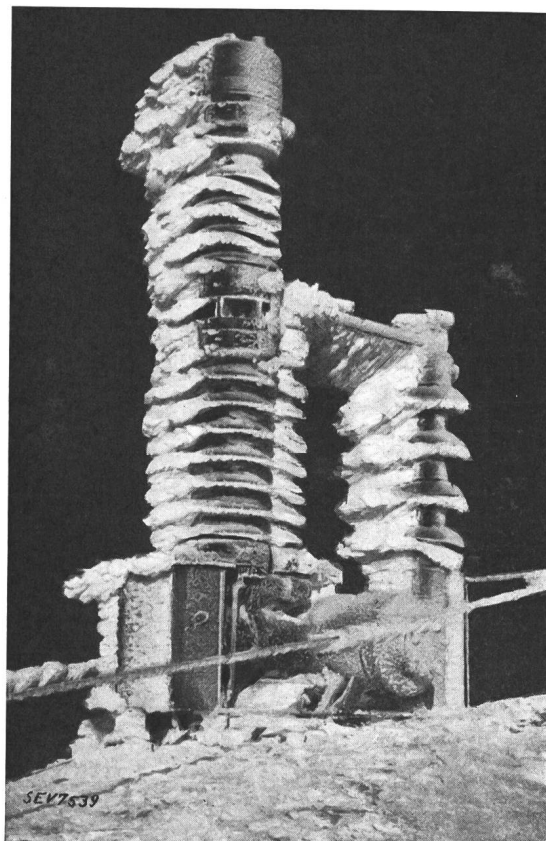


Fig. 32.

87-kV-Schalter mit Rauhreif auf dem Säntisgipfel.

Fig. 32 zeigt den mit Rauhreif bedeckten 87-kV-Verschalterschalterpol auf dem Säntis (Aufnahme vom 25. November 1938). Der Rauhreif am oberen Teil des Schalters wurde bei der ersten durchgeführten Abschaltung vollständig weggeblasen. Mit Rücksicht auf die Möglichkeit der Eisbildung an den Auspufföffnungen weisen diese einen sehr grossen Querschnitt auf.

### 5. Das schnelle Wiedereinschalten bei Kurzschluss-Störungen in Freileitungsnetzen.

Die für einen Betriebsleiter weit aussergewöhnlichsten Betriebsvorfälle sind Unterbrüche in der Energielieferung auf wichtigen Uebertragungsleitungen. Solche Störungen können in wenigen Minuten grosse Kosten verursachen. Man war deshalb von jeher bestrebt, Mittel und Wege zu finden, die eine Verminderung der Stromausfälle bewirken.

Versuche und Ueberlegungen haben gezeigt, dass ein erheblicher Fortschritt in dieser Richtung durch schnelles Wiedereinschalten erzielt werden kann. Die praktische Anwendung dieser Art der Störungsbehebung setzt kleine Ausschaltzeiten voraus und ist deshalb erst möglich geworden, nachdem moderne Schnellschalter gebaut wurden.

Ueber die Verteilung der Störungen in schweizerischen 50- und 80-kV-Netzen wurden seinerzeit eingehende statistische Untersuchungen gemacht<sup>2)</sup>, die mit Feststellungen in amerikanischen und südafrikanischen 132-kV-Netzen in gute Uebereinstimmung gebracht werden können. Nach diesen Untersuchungen sind nur ca. 7% aller Störungen von bleibendem Charakter. Der Rest teilt sich auf in 21% zwei- und dreipolige Lichtbogenkurzschlüsse und in 72% Erdschlüsse (Fig. 33).

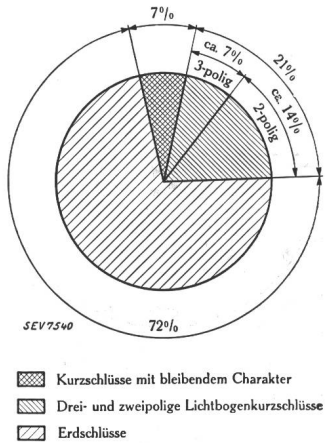


Fig. 33. Verteilung der Störungen in Freileitungsnetzen.

In Amerika ist es üblich, den Nullpunkt der Netze fest zu erden, so dass jeder Erdschluss gleichzeitig einen Kurzschluss und damit eine Schalterauslösung bedeutet. Es ist deshalb nicht zu verwundern, dass die Möglichkeit des schnellen Wiedereinschaltens zuerst in Amerika aufgegriffen wurde<sup>3)</sup>. Das Problem wurde dort mit Oelschaltern gelöst, wobei jedoch, besonders für die Antriebe, ausserordentlich teure und umfangreiche Spezial-

konstruktionen nötig waren. In Europa wird zur Bekämpfung von Erdschlüssen mit Erfolg die Löschspule verwendet. Das Störungsgebiet, für welches die schnelle Wiedereinschaltung in Frage kommt, ist deshalb entsprechend kleiner. Die neue Methode zur Verminderung der Betriebsausfälle verdient jedoch auch für Netze mit Löschspulen Beachtung, da auch in diesen noch ca. 75% aller Kurzschlüsse vorübergehend sind.

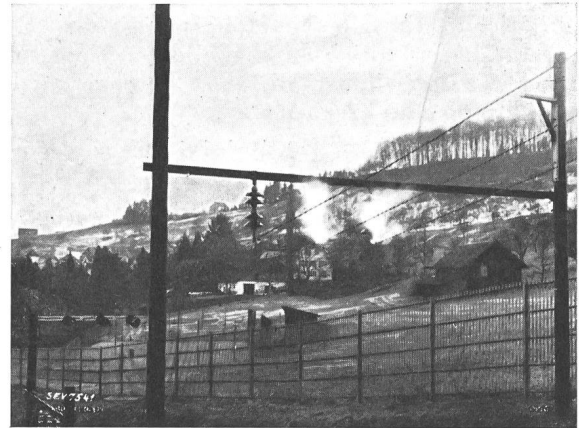
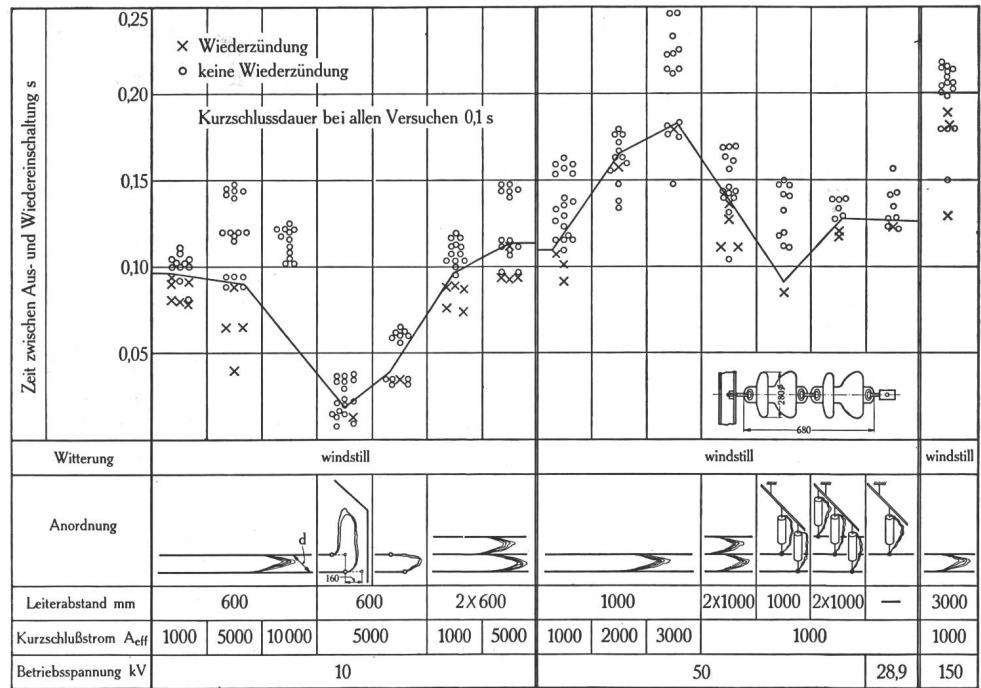


Fig. 34. Versuchsanordnung zur Bestimmung der Entionisierungszeiten von Kurzschlusslichtbogen auf Freileitungen.

Bei der Entwicklung von Schaltern mit sofortiger Wiedereinschaltung müssen zwei Hauptfragen abgeklärt werden. Erstens ist festzustellen, wie rasch wieder eingeschaltet werden darf, ohne dass ein zweiter Kurzschluss entsteht. Zweitens muss untersucht werden, ob durch den Unterbruch und die Wiedereinschaltung der Uebertragungsleitung keine Stabilitätsstörungen eintreten. Die erste Frage

Fig. 35. Messresultate über die Entionisierung von Kurzschlusslichtbogen auf Freileitungen.



<sup>2)</sup> M. Dutoit und S. Rump, CIGRE 1925, Bd. II, S. 840.  
<sup>3)</sup> Ph. Sporn und D. C. Prince, CIGRE 1937, Bericht Nr. 339, und Electr. Eng. 1937, S. 81.

steht im Zusammenhang mit der Entionisierungszeit von Kurzschlusslichtbogen auf Freileitungen. Diese ist von ganz anderer Grössenordnung als die

Entionisierungszeit in Schaltern, da das stark strömende Löschmittel fehlt. Um Unterlagen zu erhalten, wurden Versuche durchgeführt, die sich auf Kurzschlüsse zwischen den Leitern und auf Kurzschlüsse über die Isolatoren erstreckten (Fig. 34).

Die Resultate von solchen Versuchen sind in Fig. 35 zusammengestellt. Sie hängen in starkem Masse von der Art des Lichtbogens auf der Freileitung ab. Bei einer Betriebsspannung von 10 kV

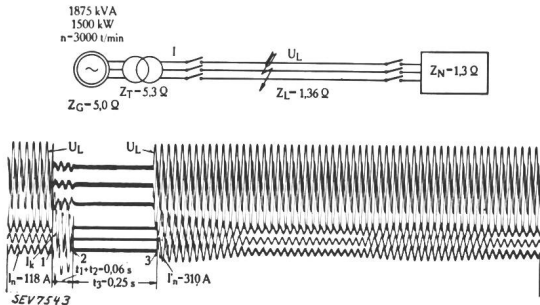


Fig. 36.

Oszillogramm der dreipoligen Aus- und Wiedereinschaltung bei Lichtbogenkurzschluss auf einer Uebertragungsleitung.

- 1 Beginn des Kurzschlusses.
- 2 Unterbrechung des Kurzschlusses.
- 3 Wiedereinschaltung.

Spannung auf der Uebertragungsleitung: ca. 8800 V.

beträgt die Entionisierungszeit im ungünstigsten Fall ca. 0,1 s. Sie nimmt mit zunehmender Spannung zu und erreicht bei 150 kV die Grössenordnung von 0,2...0,25 s. Der Kurzschlußstrom hat bei kleinen Betriebsspannungen fast keinen Einfluss auf die Entionisierungszeit. Bei höheren Span-

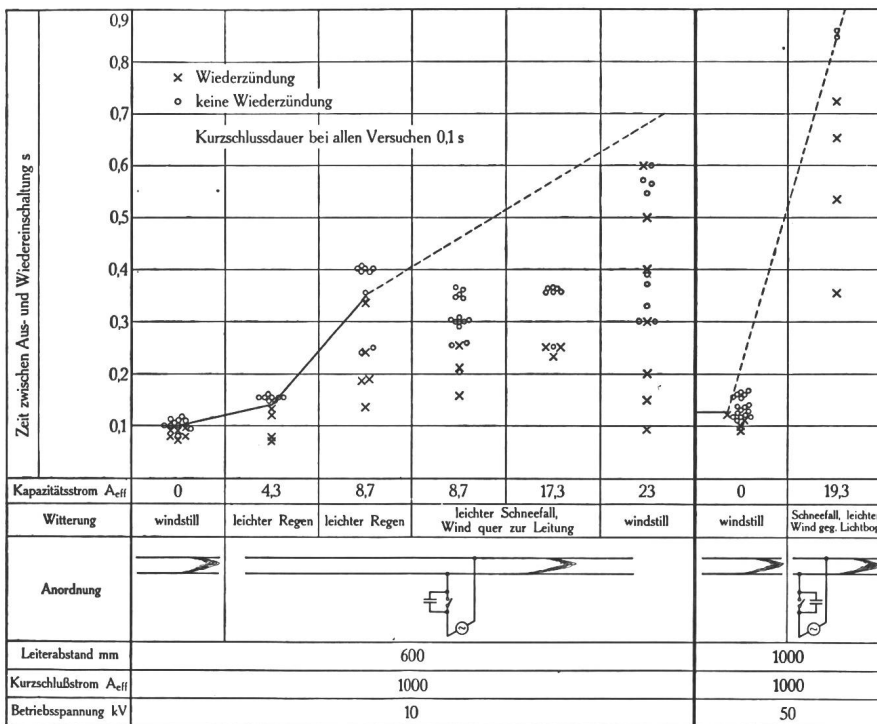


Fig. 37.

Verschlechterung der Entionisierung von Kurzschlusslichtbogen durch kapazitive Restströme.

nungen hingegen wächst diese mit zunehmendem Strom ziemlich stark an.

Um auch die Stabilitätsfrage abzuklären, wurden die Versuche mit dem früher erwähnten 1500-kW-

Turbogenerator fortgesetzt. Dieser arbeitete nach Fig. 36 wiederum auf ein ausgedehntes Ueberlandnetz. Auf beiden Seiten der Uebertragungsleitung waren Schalter mit Einrichtungen für das sofortige Wiedereinschalten eingebaut. Die eingeleiteten Lichtbogenkurzschlüsse wurden nach 0,06 s (Schalter- plus Relaiszeit) unterbrochen. Die Zeit zwischen dem Aus- und Wiedereinschalten der Leitung war 0,25 s, entsprechend den Verhältnissen auf Höchstspannungsleitungen.

Es hat sich ergeben, dass auch bei ungünstigsten Uebertragungsverhältnissen, d. h. bei stark untererregtem Generator und gleichzeitig vollbeaufschlagter Turbine, der Parallelbetrieb ohne weitere Störung immer wieder aufgenommen wurde. Mit Rücksicht auf die Verkleinerung der Ausgleichströme beim Wiedereinschalten muss die Totalzeit zwischen Kurzschlussbeginn und Wiedereinschaltung möglichst klein gehalten werden. Da die Zeit für die Entionisierung der Kurzschlusslichtbogen nicht beeinflusst werden kann, ist es um so wichtiger, dass die Relais- und Schalterzeit auf ein Minimum herabgesetzt wird.

In Netzen mit geerdetem Nullpunkt ist die Zahl der einphasigen Kurzschlüsse gegenüber den zwei- und dreiphasigen sehr gross. Zur Behebung von einphasigen Störungen genügt es aber, wenn nur ein einziger Pol seine Schaltmanöver ausführt. Die Netze bleiben dadurch über 2 Leitungen miteinander gekuppelt, wobei das Auseinanderlaufen der Generatoren verzögert und der Ausgleichstrom beim Wiedereinschalten bedeutend verkleinert wird.

Beim einpoligen Schalten wird die Entionisierungszeit auf der kranken Leitung durch kapazitive Beeinflussung der nicht abgetrennten Phasen vergrössert, was besonders bei grossen Uebertragungsdistanzen zu berücksichtigen ist. Die Verschlechterung der Entionisierung an der Kurzschlußstelle mit zunehmendem kapazitivem Reststrom geht aus Fig. 37 hervor. Die durchgeführten

Stabilitätsversuche haben aber anderseits ergeben, dass das Wiedereinschalten selbst nach 0,7 s Unterbruch der einen Leitung noch ohne Bedenken vollzogen werden kann (Fig. 38). Unter Beachtung dieser Tatsachen muss von Fall zu Fall ermittelt werden, ob einpoliges Unterbrechen vorteilhaft ist oder

ob für alle Störungsfälle das dreipolige Schalten vorgesehen werden muss.

Die Möglichkeit des schnellen Wiedereinschaltens gewinnt vor allem dann an Bedeutung, wenn,

wie beim Druckluftschalter, die hiezu nötigen Zusatzeinrichtungen verhältnismässig einfach sind. Mit dem beschriebenen Druckluftschnellschalter erfolgt die Wiedereinschaltung durch die Löschkontakte allein. Diese stehen dabei gegenseitig unter Druck, so dass der Einschaltfunke sehr klein ist. Die Trennkontakte werden erst geöffnet, wenn bei

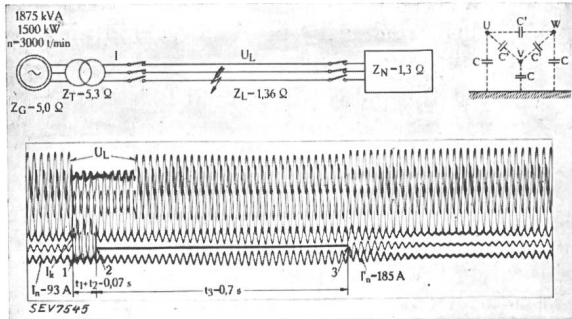


Fig. 38.

Oszillogramm der einpoligen Aus- und Wiedereinschaltung bei einphasigem Lichtbogenkurzschluss auf einer Uebertragungsleitung.

- 1 Beginn des Kurzschlusses.
  - 2 Einpolige Abschaltung des Kurzschlusses.
  - 3 Wiederaufnahme des dreiphasigen Betriebes.
- Spannung auf der Uebertragungsleitung ca. 8400 V.

einem zweiten Kurzschluss die endgültige Unterbrechung des Schalters erfolgen muss. Das Wiedereinschalten kann auch mehr als einmal durchgeführt werden, sofern dies in einem Betrieb als vorteilhaft erachtet wird. Die Steuerung der Löschkontakte erfolgt auf einfachste Weise pneumatisch über ein an die Schaltsäule angebautes Isolierrohr. Eine solche Schnellschaltergruppe für 150 kV Betriebsspannung ist in Fig. 39 wiedergegeben.

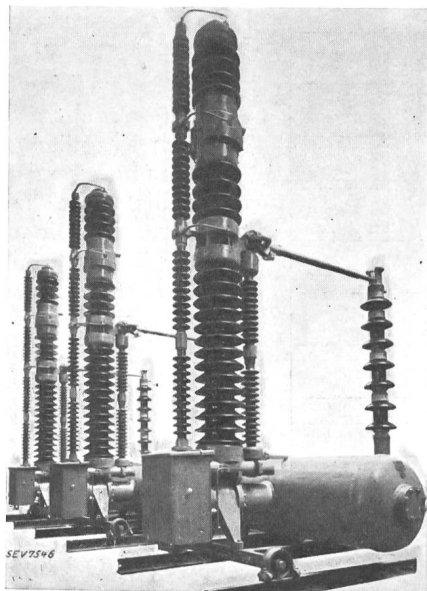


Fig. 39.

150-kV-Druckluftschnellschaltergruppe für Freiluft mit Einrichtung für rasches Wiedereinschalten.

Fig. 40 zeigt Oszillogramme, die bei Versuchen mit dem 150-kV-Druckluftschnellschalter aufgenommen wurden. Beim oberen Oszillogramm war der Kurzschluss von vorübergehender Natur, d. h. die Leitung hat die Spannung bei der Wiederein-

schaltung nach 0,19 s ausgehalten. Bei der Aufnahme des unteren Oszillogramms hingegen musste der Kurzschluss zweimal nacheinander unterbrochen werden. Da beim Druckluftschalter die Lichtbogengase zwischen den Kontakten sofort weggespült werden, erfolgt das Wiedereinschalten unter idealen Bedingungen ohne schädliche Beeinflussung durch die vorangegangene Abschaltung.

Für den praktischen Erfolg des schnellen Wiedereinschaltens ist die kurze Ausschaltzeit der Schalter von ausschlaggebender Bedeutung. Es ist ferner nötig, dass beide Schalter einer Uebertragungsleitung gleichzeitig und schnell ausgelöst werden. Dies wird durch die Verwendung von Relais erreicht, die bei allen Kurzschlüssen mit der gleich kurzen Auslösezeit von nur wenigen Hundertstelssekunden arbeiten.

Auf Grund der durchgeführten umfangreichen Studien ist schon heute eine grosse Zahl von Druck-

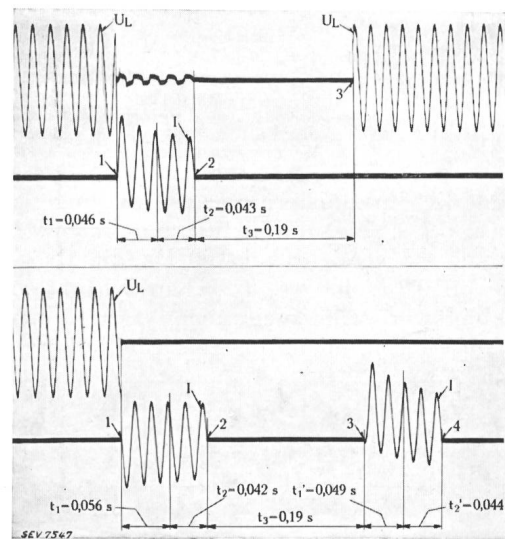


Fig. 40.

Oszillogramm des Aus- und Wiedereinschaltens mit dem 150-kV-Druckluftschnellschalter.

- Oberes Oszillogramm: Bei Lichtbogenkurzschluss.
- Unteres Oszillogramm: Bei metallischem Kurzschluss.
- U Spannung auf der Freileitung: ca. 150 kV (Eff.-Wert).
- I Abschaltstrom: ca. 2200 A (Eff.-Wert).
- 1 Beginn des Kurzschlusses.
- 2 Ende der Abschaltung.
- 3 Moment des Wiedereinschaltens.
- 4 Endgültige Unterbrechung bei metallischem Kurzschluss.

luftschaltern mit schneller Wiedereinschaltung in Ausführung begriffen. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Lieferungen für Höchstspannungsnetze. Die neue Methode zur Vermeidung von Betriebsunterbrüchen hat jedoch auch für kleinere Betriebsspannungen Bedeutung. In einem 150-kV-Netz in Frankreich werden nächstens Schalter für schnelles Wiedereinschalten in Betrieb gesetzt. Dabei bietet sich Gelegenheit, die bis jetzt vorliegenden Erfahrungen durch weitere Versuche zu vertiefen.

## 6. Schaltanlagen mit Druckluftschnellschaltern.

Der Aufbau von Schaltanlagen ist in erster Linie abhängig von den Eigenschaften und Aufstellungsmöglichkeiten der gewählten Schalter. Aus Fig. 41 sind die vielseitigen Einbauförmungen des Druckluft-

schnellschalters zu ersehen. Je nach der Anordnung der Zu- und Ableitungen werden die Schalter mit geradem oder mit abgelenktem Auspuff verwendet. Durch die Montage einer Einbauplatte kann der Bedienungsgang vom Hochspannungsteil abgetrennt

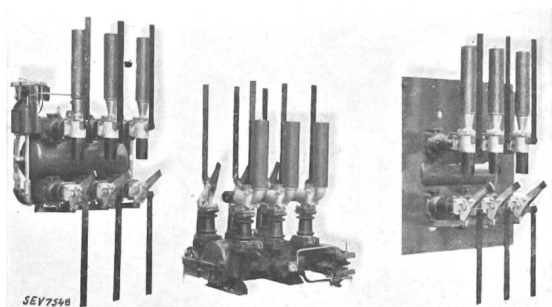


Fig. 41.  
Einbaumöglichkeiten der Druckluftschalter.

werden, so dass Kontrollen am mechanischen Teil auch bei unter Spannung stehendem Schalter vorgenommen werden können.

Für den Ersatz von älteren Oelschaltern kommt meistens die Variante mit den Ableitungen nach oben in Betracht, weil die Leitungsführung in der Anlage schon gegeben ist. Die Druckluftschalter haben grosse Leistungsfähigkeit bei kleinem Raumbedarf. Durch ihre Verwendung lassen sich deshalb bestehende Schaltanlagen sehr leicht und ohne Aenderungen des Gebäudes modernisieren (Fig. 42 und 43).

Bei der Erstellung von Neuanlagen können die Druckluftschalter ohne Bedenken in einem offenen Raum aufgestellt werden, da mit ihnen weder Brand- noch Explosionsgefahr besteht. Zellenwände sowie besondere Gebäudekonstruktionen für den versenkten Einbau fallen vollständig dahin.

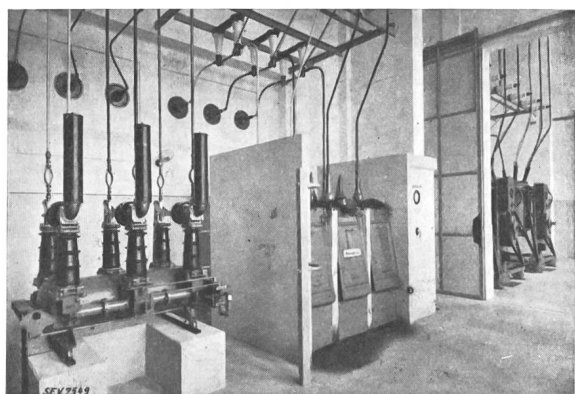


Fig. 42.  
Ersatz von 50-kV-Oelschaltern durch Druckluftschalter.

Die Schaltanlagen werden dadurch sehr einfach und betriebssicher (Fig. 44). Durch die Montage der Schalter an die Wand oder mit Einbauplatten wird zudem die Uebersichtlichkeit infolge der geradlinigen Stromführung von unten nach oben weitgehend erhöht.

In gekapselten Schaltanlagen mit Oelschaltern werden vielfach auch die Sammelschienen mit Oel

oder Masse isoliert. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass durch die grosse Konzentration von brennbaren Bestandteilen, auch beim Auftreten von verhältnismässig kleinen Fehlern, ausgedehnte Brände entstehen können. Es ist dies ein Haupt-

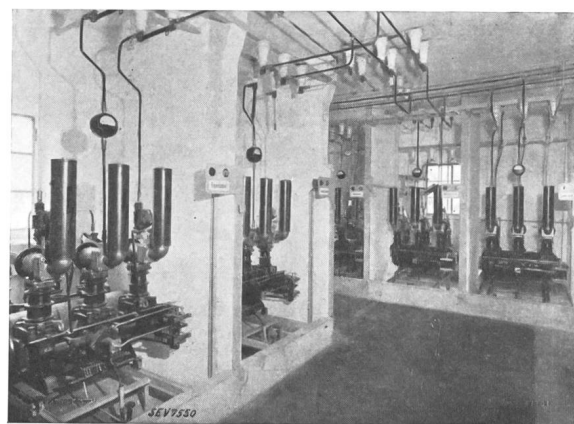


Fig. 43.  
Modernisierung einer Schaltanlage mit 24-kV-Druckluftschaltern.

grund dafür, dass die gekapselte Bauart auf dem europäischen Kontinent nur selten angewandt wurde. Nachdem nun öllöse Druckluftschalter zur Verfügung stehen, können feuersichere Anlagen mit luftisolierter Kapselung aufgebaut werden. Fig. 45 zeigt eine Ausführung für 33 kV, die in England in Betrieb ist. Jedes einzelne Schaltfeld kann bei unter Spannung stehender Sammelschiene herausgezogen und revidiert werden.

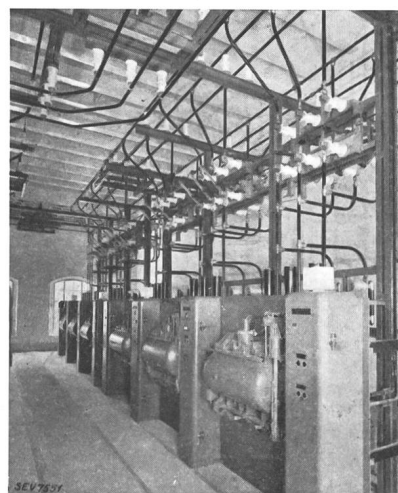


Fig. 44.  
24-kV-Schaltanlage in Hallenbauweise mit Druckluftschaltern.

Für Lokomotiven und für den Bahnbetrieb im allgemeinen wurden besondere einpolige Schaltertypen entwickelt. Eingehende Versuche, die im Netz der Schweizerischen Bundesbahnen durchgeführt wurden und die sowohl das Abschalten von Kurzschlüssen, als auch das Abschalten des leerlaufenden Lokomotivtransformators betrafen, haben die Ueberlegenheit des Druckluftschal-

ters gegenüber den Oelschaltern auch auf diesem Gebiete eindeutig bewiesen.

Die Druckluft in den Schaltanlagen wird gewöhnlich mit separat aufgestellten Kompressoren erzeugt. Die Betriebssicherheit dieser Aggregate



Fig. 45.

Gekapselte 33-kV-Schaltanlage mit Luftisolation und Druckluft-schnellschaltern.

ist ebenso gross wie diejenige anderer Energiequellen zur Betätigung von Schaltern. Ausserdem ist die Kontrolle der Druckluft sehr zuverlässig. Der geringste Druckmangel wird sofort durch Signale angezeigt, so dass das Betriebspersonal

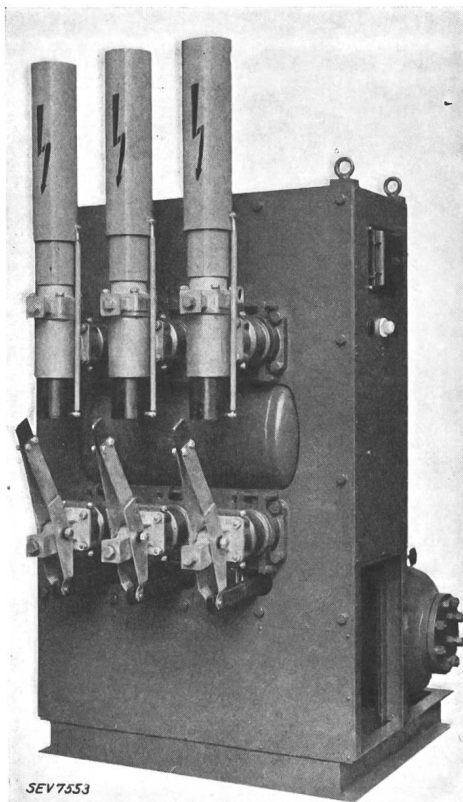


Fig. 46.

750-MVA-Druckluftschalter für Einzelaufstellung mit angebauter Kompressoranlage.

schnellstens eingreifen kann. Demgegenüber ist es bei Oelschaltern vorgekommen, dass das Öl ausgelaufen ist, ohne dass es vom Betriebspersonal sofort beobachtet worden wäre.

Es kommt hie und da vor, dass in einem Netz einzelne Schalter installiert werden. Die Vorteile einer kurzen Ausschaltzeit sind so gross, dass man in den meisten Fällen auch bei Aufstellung von Einzelschaltern nicht gerne auf sie verzichtet. Ein-

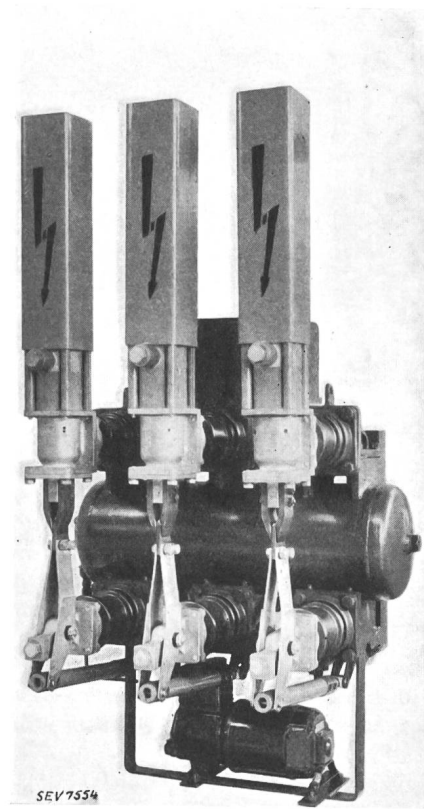


Fig. 47.

Druckluftschalter für kleinere Ausschaltleistung mit angebaute Klein-Kompressor.

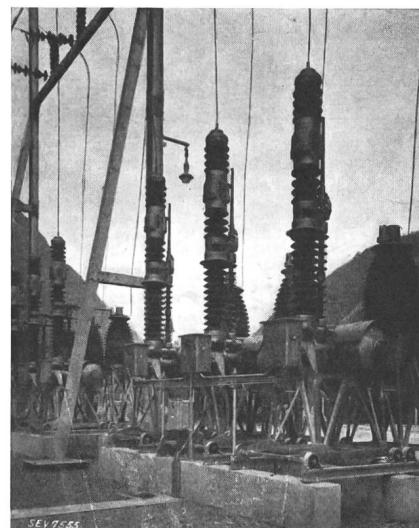


Fig. 48.

Freiluftschaltanlage des Kraftwerkes Piottino mit 150-kV-Druckluftschaltern.

zelschalter mit einer grossen Ausschaltzeit können andererseits den Zeitstafelungsplan der Relais eines ganzen Netzes ungünstig gestalten. Durch Zusammenbau eines 750-MVA-Schalters mit einer Kom-

pressoranlage (Fig. 46) wurde seine Verwendung auch in einem solchen Einzelfall ermöglicht.

Eine kurze Ausschaltzeit ist auch in Industrieanlagen mit kleiner Kurzschlussleistung von grosser Wichtigkeit. Um auf diesen Vorteil nicht zu verzichten, werden die Schalter mit einem Kleinkompressor zu einem geschlossenen Ganzen vereinigt (Fig. 47). Solche Kleinkompressoren finden in Autogaragen, Eisschränken usw. zu tausenden Verwendung. Sie sind absolut betriebssicher und brauchen zudem keine besondere Wartung. Der Kompressor benötigt eine Leistung von wenigen hundert Watt und kann an jeder Lichtleitung angeschlossen werden.

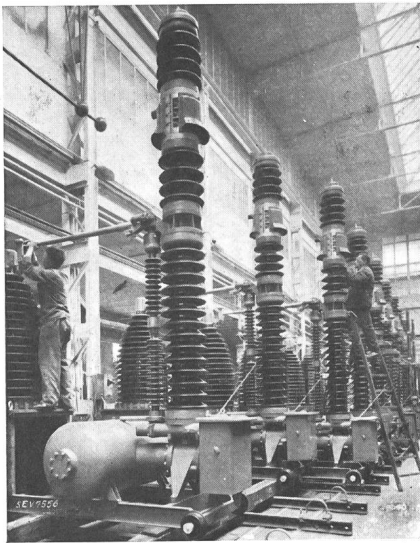


Fig. 49.

Montage von 150-kV-Druckluftschneidern für Freiluft.

Fig. 48 zeigt die 150-kV-Freiluftanlage des Kraftwerkes Piottino der Aare-Tessin A.-G. für Elektrizität in Olten. Die Druckluftschneidern sind zusammen mit den Stromwandlern auf besonderen Gerüsten aufgestellt. Diese Gruppen werden demnächst mit dem Schnelldistanzschutz ausgerüstet, so dass der Vorteil einer kurzen Ausschaltzeit für eine der wichtigsten Übertragungsleitungen der Schweiz, nämlich für die Gotthardleitung, voll zur Auswirkung kommt.

Die Fabrikation der Druckluftschneidern in unseren Fabriken ist heute sehr bedeutungsvoll, und zwar von den niedersten bis zu den grössten Spannungen. Es ist dies sicher ein Beweis dafür, dass die neue Schaltertechnik auch von den Elektrizitätswerken befürwortet wird. Es ist nicht anzu-

nehmen, dass nur eine gute Verkaufstätigkeit zu diesen Aufträgen verholfen hat, da andererseits die Betriebsingenieure heute genau wissen, was sie wollen und brauchen. Fig. 49 zeigt die Montage von Freiluftschaltern für 150 kV Nennspannung.

### 7. Zusammenfassung.

Versuche und Ueberlegungen haben gezeigt, dass es für den praktischen Netzbetrieb von grösster Wichtigkeit ist, wenn die Kurzschlüsse innert kürzester Zeit unterbrochen werden. Es ist aus diesem Grunde nötig, die Ausschaltzeit der Schalter auf ein Minimum herabzusetzen.

Die Druckluft ist für schnellste Ausschaltung der Stromkreise weitaus am besten geeignet. Durch ihre Verwendung für die Lichtbogenlöschung wird ferner jede Brand- und Explosionsgefahr vermieden. Auf Grund von ausgedehnten Forschungsversuchen können die Druckluftschalter für alle Abschaltleistungen und für beliebige Eigenfrequenz gebaut werden. Brown Boveri gelangte durch umfangreiche eigene Erfahrungen mit den verschiedenen Schalterarten zur Ueberzeugung, dass der Druckluftschneidern sowohl für Innenraum- als auch für Freiluftanlagen der Schalter der Zukunft ist.

Durch sofortiges Wiedereinschalten nach Kurzschlussunterbrechungen können die kostspieligen Betriebsausfälle auf wichtigen Uebertragungsleitungen weitgehend vermindert werden. Der Druckluftschneidern ist der gegebene Schalter für einen solchen Betrieb, da er die kürzeste Ausschaltzeit besitzt und weil bei ihm die Einrichtungen für das Wiedereinschalten besonders einfach sind.

Beim Aufbau von Schaltanlagen mussten früher die Gebäude den Schaltern angepasst werden. Heute besteht in der Wahl des Gebäudes vollständige Freiheit. Die Anlagen werden dabei äusserst übersichtlich und betriebssicher.

Die Entwicklung der Druckluftschneidern wurde mit grosser Sorgfalt und auf breiter Basis durchgeführt. Wenn trotzdem, wie es bei jeder neuen Sache vorkommen kann, Ueberraschungen auftreten sollten, wird hiezu sicher die richtige Abhilfe zu finden sein. Mit Bedenken und Befürchtungen löst man keine Probleme. Der Entscheid über die beste Schalterart wird nicht durch die heutigen Meinungen gefällt, sondern durch die späteren Betriebserfahrungen.

Der Vorsitzende verdankt Herrn Thommen das sehr interessante Referat. Herr Thommen hat eigentlich als Erster zum Schalter an sich klar Stellung genommen und uns sehr viel Interessantes geboten.