Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 53 (1962)
Heft: 10

Artikel: Druckluftschalter und Magnetschalter für Innenraum-Anlagen
Autor: Schneider, J.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916938

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: 21.11.2025

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

Diese Praxis hat sich bei unsern Betriebsspannungen von 150 kV und darüber recht gut bewährt. Insbesondere hat sich gezeigt, dass die auf das CEI-Schutzniveau eingestellten Schutzfunkenstrecken ganz ausserordentlich selten ansprechen.

Zum Schluss kommend möchte ich allen meinen Mitarbeitern bei der FKH und an der ETH bei dieser Gelegenheit für ihre Mitarbeit bei den Versuchen und deren Auswertung recht herzlich danken.

Adresse des Autors:
Dr. sc. techn. *K. Berger*, Prof. ETH, Versuchsleiter der FKH, Seefeldstrasse 301, Zürich 8.

Druckluftschalter und Magnetschalter für Innenraum-Anlagen

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 30. und 31. Januar 1962 in Zürich,
von *J. Schneider*, Zürich

621.316.57.064.45-744

In der Bauart der Hochspannungsschalter haben sich bis heute noch keine einheitlichen Ansichten herausgebildet, wie z. B. im Elektromaschinenbau. Das steht damit im Zusammenhang, dass Schaltvorgänge zu den schwierigsten Problemen der Elektrotechnik gehören. Die Verschiedenartigkeit und die grosse Zahl der zu beachtenden Vorgänge bringt es mit sich, dass man mit Verallgemeinerungen und der Überwertung einzelner Eigenschaften sehr vorsichtig sein muss.

1. Druckluftschalter für Innenraum-Anlagen

1.1 Entwicklungsstufen

Anlässlich der Schaltertagung von 1938 sind die einzelnen geschichtlichen Entwicklungsstufen eingehend behandelt worden. Ergänzend seien hier nur noch einige interessante Ausführungsformen erwähnt. Ein rasches und sicheres Löschen des Lichtbogens wird durch eine Relativbewegung von Lichtbogen und Löschmedium zueinander erreicht. Auf dieser Erkenntnis basieren bereits die ersten Schalter, die Luft als Löschmittel verwendeten.

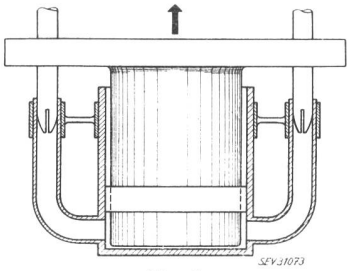


Fig. 1
Schalterkonstruktion aus dem Jahre 1900 mit axialer Lichtbogenbeblasung und konzentrischer Luftströmung

Fig. 1 zeigt eine Schalterkonstruktion von Brown Boveri aus dem Jahre 1900. Durch Herausziehen der Traverse mit dem Luftkolben entsteht an den beiden Unterbrechungsstellen eine starke Luftströmung. Diese Konstruktion dürfte einer der ersten Schalter mit axialer Lichtbogenbeblasung und konzentrischer Luftströmung gewesen sein. Bei der Schalteranordnung nach Fig. 2 wurde vor allem Wert darauf gelegt, dass das zum Löschen erforderliche Druckgas in einer unmittelbar die Kontakte umgebenden Druckkammer gespeichert war und ohne Druckverlust den Lichtbogen beblasen konnte. Dieser Schalter wurde 1923 gebaut.

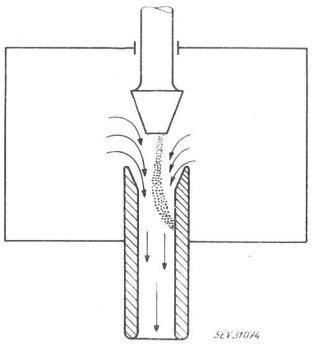


Fig. 2
Löschkammer-Konstruktion aus dem Jahre 1923 mit der Unterbrechungsstelle im Druckluftbehälter

Die Erkenntnis, dass der Druckluftschalter mit fremd erzeugtem Druck kürzeste Unterbrechungszeiten gestattet, führte dann in Verbindung mit dem Bau grosser Kurzschlussanlagen zu sehr leistungsfähigen Schaltern. Die wichtigste konstruktive Forderung bestand in einer symmetrischen Anordnung des Festkontaktes und der Düse mit axialem Lichtbogen, so dass diesem ein Ausweichen in irgend einer Richtung unmöglich gemacht wird und zugleich die Fusspunkte intensiv beblasen werden. Fig. 3 zeigt die Abhängigkeit der Ausschaltleistung von der Unterbrechungsdistanz. Bei zu geringen Öffnungen ist die Durchschlagfestigkeit zu klein, bei zu grossen Unterbrechungsdistanzen geht der Effekt der Luftzusammendrängung vor der Düse und dem Festkontakt verloren, so dass die Durchschlagfestigkeit wieder sinkt. Daraus ergibt sich eine günstigste Löschdistanz. Düsendurchmesser, das Verhältnis der Zuströmquerschnitte, der Druckverlauf wäh-

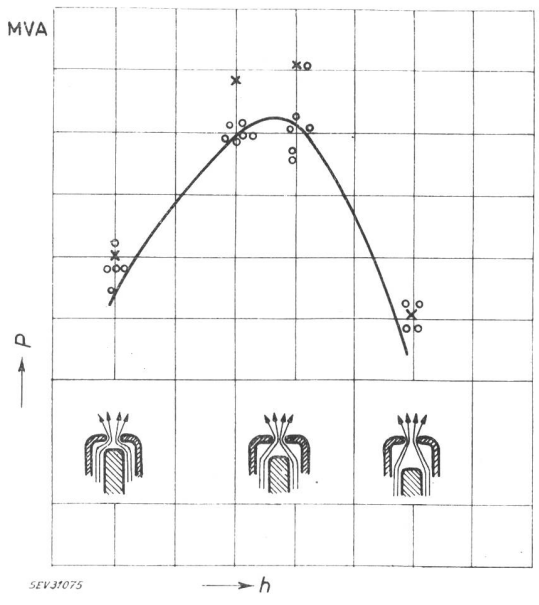


Fig. 3
Abhängigkeit der Ausschaltleistung von der Unterbrechungsdistanz eines Druckluftschalter-Leistungskontaktes
P Ausschaltleistung; *h* Hub

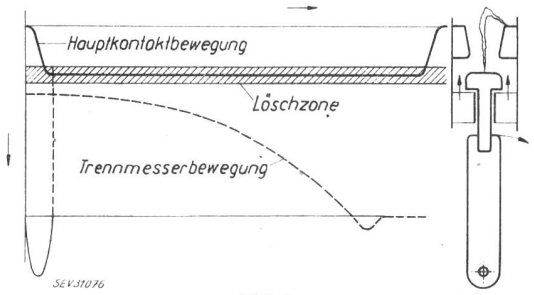


Fig. 4

Funktioneller Ablauf der Ausschaltung eines Druckluftschalters mit Serie-Trenner

rend der Ausschaltung und die aerodynamische Form spielen eine massgebende Rolle.

Zur Erzielung genügender Spannungsfestigkeit nach erfolgter Ausschaltung stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Entweder wird der Löschhub durch eine nachfolgende Kontaktbewegung auf den Isolierhub vergrössert und die ganze Anordnung unter Druck behalten oder es werden die zwei Funktionen — Ausschalten und Isolieren — konstruktiv und örtlich ebenfalls getrennt. Die zweite Lösung gestattet, sowohl den Löschkontakt wie den Isoliertrenner funktionell und konstruktiv optimal auszulegen, ohne dass man Kompromisse zugungsten des einen oder anderen eingehen muss. Auf diesem Prinzip basieren die in den dreissiger Jahren für Innenraum entwickelten Druckluftschalter. Fig. 4 zeigt den funktionellen Ablauf einer Ausschaltung. Der Kontaktweg der Löschkontakte ist einwandfrei begrenzt, so dass die günstigste Löschzone eindeutig eingehalten werden kann. Nach erfolgter Öffnung des Trennmessers schliessen die Löschkontakte wieder. Die geöffnete Trennstrecke stellt eine sichere, sichtbare und kriechwegfreie Isolationsstrecke dar. Diese Anordnung weist auch den Vorteil auf, dass die bewegte Masse der Löschkontakte sehr klein ist und daher die Löschzone in kürzester Zeit erreicht wird, was mit sehr kurzer Lichtbogendauer gleichbedeutend ist.

1.2 Aufbau und Funktionsweise

Die folgenden Ausführungen werden auf die meist verbreitete, heute in über 40 000 Exemplaren in Betrieb stehende Schalterbauart beschränkt.

In Fig. 5 sind im Schnitt die wichtigsten Teile, wie Luftbehälter, Stützisolator, die im Steuerblock zusammengefassten Steuerorgane, Hauptventil, Löschkammern, Hilfsfunkenstrecke, niederohmige Widerstände, Auspuffkühler, Trennerantrieb und Trennmesser, ersichtlich. Die Forderungen, die der Betrieb an Leistungsschalter in elektrischer und mechanischer Beziehung stellt, sind extrem hoch. In einem Fall werden bis zu 100 Schaltungen pro Tag oder 30 000 im Jahr verlangt, im anderen Fall bleibt der Schalter monatelang im eingeschalteten Zustand stehen, um dann plötzlich mit dem vollen Kurzschluss-Strom beansprucht zu werden. Die Druckluft bietet dem Konstrukteur das willkommene Mittel, mit kleinen Antriebsflächen, grossem Kraftüberschuss und idealen Dämpfungen der bewegten Massen arbeiten zu können.

Da die Funktionsweise des Druckluftschalters heute allgemein bekannt ist, sei hier nur kurz darauf eingegangen.

Die Ausschaltung wird in zwei Stufen vorgenommen. Druckluft strömt in die Löschkammern, öffnet die Kontaktdüsen und bebläst den sich bildenden Lichtbogen

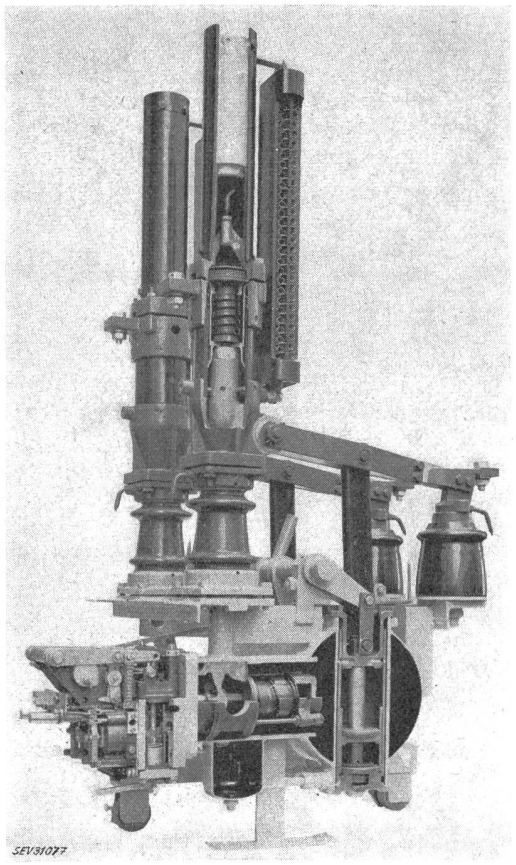


Fig. 5

Schnitt eines Druckluft-Schnellschalters für Innenraum

intensiv. Er erlischt beim nächsten Stromnulldurchgang. Die hierauf wachsende wiederkehrende Spannung führt zum Zünden der Hilfsfunkenstrecke, worauf ein praktisch rein Ohmscher Strom durch den Schalterpol fliesst. Strom und Spannung sind jetzt in Phase. Etwa 1/4 Periode später hat dieser Strom seinen natürlichen Nulldurchgang und wird durch die Hilfsfunkenstrecke ohne weiteres unterbrochen. Damit ist die Leistungsabschaltung vollzogen. Die weiter nachströmende Druckluft verfestigt die Lichtbogenstrecke soweit, dass durch die einschwingende, wiederkehrende Spannung kein Rückzünden erfolgen kann.

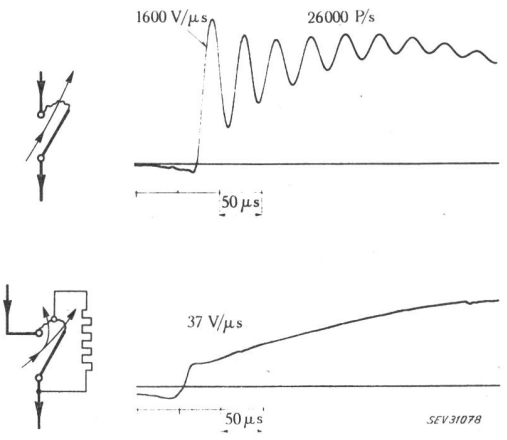


Fig. 6

Oszillogramm der wiederkehrenden Spannung ohne und mit doppelstufiger Löschung

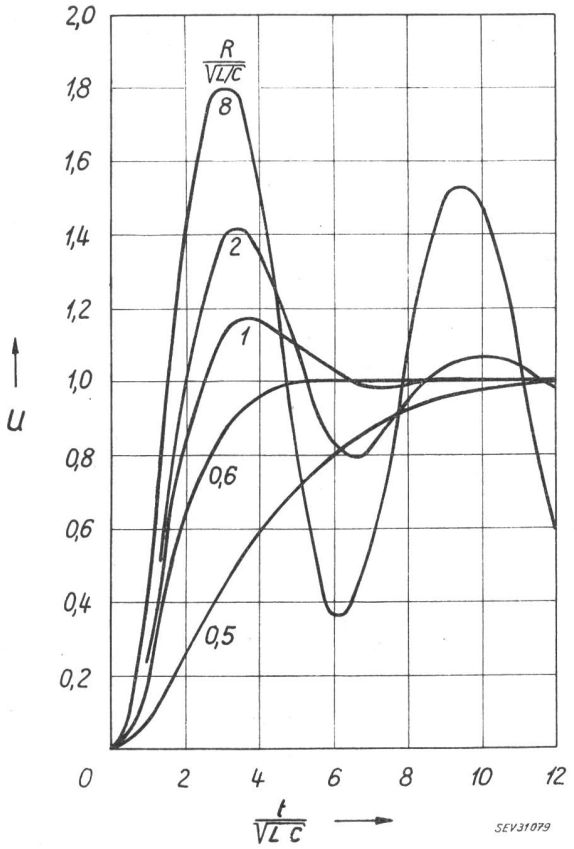


Fig. 7
Einfluss der niederohmigen Widerstände auf das Einschwingen der wiederkehrenden Spannung

u Einschwingspannung; $\frac{t}{\sqrt{LC}}$ Schwingungsdauer

Fig. 6 zeigt das Oszillogramm der wiederkehrenden Spannung beim Ausschalten eines Kurzschlusses mit hoher Eigenfrequenz-Beanspruchung. Im oberen Teil ohne doppelstufige Löschung schwingt die wiederkehrende Spannung mit ihrer natürlichen Eigenfrequenz und mit sehr grossem Spannungsanstieg von 1600 V/µs ein. Der untere Teil zeigt die gleiche Ausschaltung mit doppelstufiger Löschung und dem auf 37 V/µs abgeflachten Spannungsanstieg. Der niederohmige Widerstand parallel zur Schaltstrecke verringert weniger die Frequenz, wohl aber die Amplitude und damit die Anfangssteilheit der Einschwingspannung und verschafft auf diesem Wege dem Schalter ein wesentlich grösseres Ausschaltvermögen.

Fig. 7 zeigt diese Verhältnisse für verschiedene Widerstandswerte. Je kleiner der Widerstand R ist, über den der Strom zweistufig unterbrochen wird, umso geringer werden Steilheit und Amplitude; ab

$$R = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{L}{C}}$$

steigt die Spannung aperiodisch auf den Scheitelwert der betriebsfrequenten Netzspannung.

1.3 Elektrische Anforderungen

1.3.1 Ausschalten von Kurzschlüssen

Die schärfste, aber nicht häufigste Beanspruchung eines Schalters stellt die Ausschaltung von Kurzschlüssen dar, wobei es sich praktisch um rein induktive Ströme handelt. Die grosse Entwicklung und Verbreitung des Druckluftschalters beruht wesentlich auf der Eigenschaft, die Schaltarbeit durch kurze Lichtbogendauer bei geringer Lichtbogenspannung möglichst klein zu halten. Alle modernen Schalter nützen zur Lösung dieses Problems eine intensive Gasströmung, die der Druckluftschalter dem im Kessel gespeicherten und stets vorhandenen Luftvolumen entnimmt.

Die Realisierung der Schnellwiedereinschaltung bietet beim Druckluftschalter weder in mechanischer noch elektrischer Beziehung ein Problem. Deren Nützlichkeit hat sich im Betrieb schon vielfach erwiesen. So wurden z. B. zwei Druckluftschalter für 16 kV in einer schweizerischen Unterstation während der vergangenen Schneeperiode Anfangs 1962 in einer Nacht bei je etwa 20 erfolgreichen Schnellwiedereinschaltungen mit Netzkurzschlüssen belastet. Die Schalter konnten ohne irgendwelche Revisionen weiter in Betrieb bleiben.

Beim Druckluftschalter erfolgen alle Schaltungen unter den gleichen günstigen Bedingungen. Sein Verhalten ist sehr regelmässig, was für die Bemessung zu einer grossen Sicherheit führt.

1.3.2 Spezielle Anforderungen

Die Unterbrechung kapazitiver und kleiner induktiver Ströme stellt zum Teil gegensätzliche Anforderungen. Da der Ladestrom beim Schalten von Kondensatoren, leerlaufenden Leitungen oder Kabeln der Spannung um 90 elektrische Grad voreilt und beim Nulldurchgang unterbrochen wird, wird die Kapazität in dem Moment vom Netz getrennt, in welchem sie auf den Scheitelwert der Netzspannung geladen ist. Für den Schalter bedeutet dies, dass er imstande sein muss, nach Ablauf einer Halbperiode der Betriebsfrequenz eine Spannung vom doppelten Scheitelwert der Netzspannung zu halten. Im geerdeten Netz ist dies die doppelte Phasenspannung, im isolierten Netz dagegen kann bei gleichzeitigem Erdschluss die doppelte verkettete Spannung auftreten. Auf diese Art verlaufen die Vorgänge jedoch nur, wenn zwischen den Schaltkontakten keine Rückzündungen auftreten, da sich sonst das Leitungspotential auf sehr hohe Werte aufschaukeln kann. Es handelt sich in erster Linie um ein Spannungsproblem, bei dem Rückzündungen vermieden werden sollten. Dank seiner raschen Arbeitsweise, kurzen Lichtbogendauer und nicht vom Strom abhängigen Beblasung des Lichtbogens ist der Druckluftschalter der ideale Schalter, der dieses Problem einwandfrei beherrscht.

Fig. 8 zeigt das Oszillogramm der Ausschaltung eines kapazitiven Stromes. Die Ausschaltung ist ohne Rückzündungen und Überspannungen vollzogen worden.

Bei der Projektierung von Anlagen mit Kondensatorbatterien ist es empfehlenswert, Schalterspezialisten beizuziehen, da die Nichtbeachtung scheinbarer Details, wie z. B. die Sternpunkterdung der Batterie, die Grösse der Induktivität der Verbindungsleitungen von Teilbatterien, die Schaltung von Wirkwiderständen und Drosselspulen und die Schaltung von Spannungswandlern, zu Schwingkreisen führen können, die das rückzündungsfreie Ausschalten wesentlich erschweren, zu grösseren Schalterbeanspruchungen und damit zu stärkeren Schaltertypen führen.

Von ganz anderer Natur ist das Ausschalten kleiner induktiver Ströme. Hier kann sich ein rückzündungsfreies Ausschalten u. U. schädlich auswirken. Die maximalen Überspannungen sind umso höher, je grösser die beim Abreissen des Lichtbogens vor dem Stromnulldurchgang im Stromkreis vorhandene magnetische

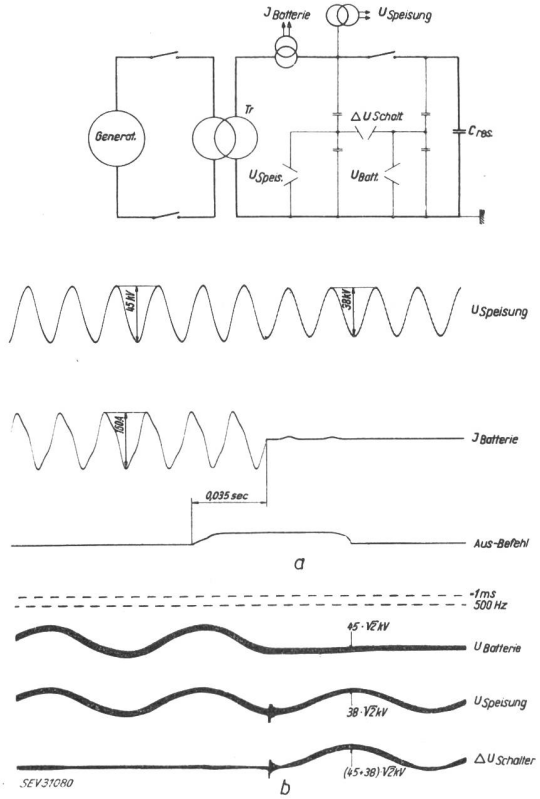


Fig. 8
Ausschaltung einer 45-kV-Kondensator-Batterie
(*oben* Schaltschema)
a Schleifenoszillogramme; *b* Kathodenstrahloszillogramme

Energie ist, und es sind umso mehr Rückzündungen notwendig, um diese Energie abzuführen. Da die Abreiss-Ströme bei allen Schalterarten vorhanden sind, hängen die von ihnen erzeugten Überspannungen nur noch davon ab, wie rasch die Festigkeit der Schaltstrecke ansteigt, denn je rascher dieser Anstieg, desto höhere Werte erreichen die Rückzündungsspitzen. Der Anstieg der Schaltstreckenfestigkeit ist aber durch die Anforderungen bei Kurzschluss-Abschaltungen gegeben. Beim Druckluftschalter sind die Abreiss-Ströme kleiner als etwa 20 A und ergeben damit leicht zu beherrschende Überspannungen. Zudem bietet er mit seiner einfachen zweistufigen Löschung das überspannungsbegrenzende Mittel an, wie Fig. 9 zeigt.

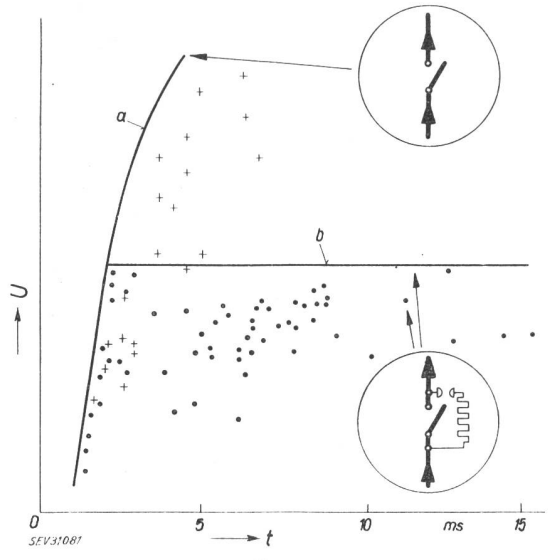


Fig. 9
Mit Dämpfungswiderständen werden die Überspannungen beim Ausschalten kleiner induktiver Ströme (Umhüllende *b*) auf ungefährliche Werte herabgesetzt

Die eingetragenen Punkte entsprechen je einem über den Schalter gemessenen Spannungsmaximum, die Umhüllende

a: für den Schalter ohne,
b: für den Schalter mit Funkenstrecke und Dämpfungswiderständen.

Durch Ansprechen der Funkenstrecke wird die auftretende Überspannung so weit begrenzt, dass sie sich nicht mehr schädlich auswirken kann. Ohne doppelstufige Löschung treten bedeutend höhere Werte auf, und zwar besonders im Bereich der kleinen Betriebsspannungen.

Bei der Ausschaltung von Hochspannungsmotoren besteht wie allgemein bei der Unterbrechung kleiner induktiver Ströme die Gefahr von Überspannungen. Um über die tatsächlichen Grössen Aufschluss zu erhalten, wurden sehr ausgedehnte Versuche mit verschiedensten Motoren und Schaltern unter wechselnden Bedingungen ausgeführt. Die Ausschaltung von Motoren aus dem Leerlauf ergab mit modernen Schaltern nur mässige Überspannungen, wie sie von jeder Wicklung ausgehalten werden müssen. In anderen Fällen, insbesondere bei Ausschaltungen im Anlauf mit noch praktisch stillstehendem Rotor, können höhere Überspannungen auftreten. Durch zusätzliche, einen sehr geringen Aufwand erforderliche kleine spannungsabhängige Widerstände, können die Überspannungen annähernd auf die Hälfte gesenkt werden. Diese Widerstände wirken wie Ableiter, erhöhen aber die Ausschaltleistung nur mässig. So hat der Mittelwert des Überspannungsfaktors aus etwa 60 Schaltungen eines Kurzschlussankermotors für 6300 V und 240 kW Leistung noch 1,9 und der Maximalwert nur 2,5 betragen. Da die Ausschaltung-Überspannungen mit zunehmender Leistung abnehmen, sind sie bei grösseren Maschinen völlig unbedeutend.

Mit der zunehmenden Vermaschung der Netze gewann auch die Beherrschung der Phasenopposition an Bedeutung.

Fig. 10 zeigt die Ausschaltleistung eines Druckluftschalters in Funktion der Spannung. Praktisch bis zur doppelten Nennspannung bleibt die Leistung konstant. Er genügt daher reichlich als Kuppelschalter allen Anforderungen beim Schalten mit Phasenopposition.

Je kleiner die Ausschaltzeit eines Schalters ist, desto kleiner ist auch der Schaden am Fehlerort und desto weniger wird das ganze Netz durch die Störung beeinträchtigt. Die Forderung nach kürzeren Ausschaltzeiten stellt sich schon beim normalen Netzschutz, wird jedoch zwingend für die erfolgreiche Anwendung der Schnellwiedereinschaltung. Die Betriebe verlangen heute Schalter, die im Bereich von 25...100 % Aus-

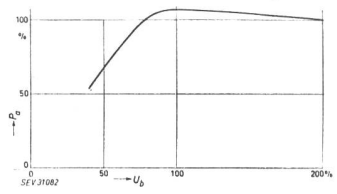
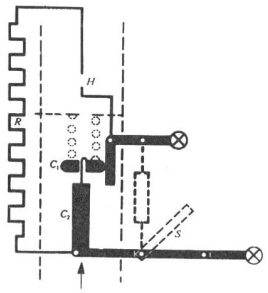


Fig. 10
Ausschaltleistung P_a des Druckluft-Schnellschalters in Funktion der Betriebspannung U_b

schaltleistung Aus-Zeiten besitzen, die zwei Perioden nicht überschreiten. Das bedeutet, dass zwischen Impulsgabe und erfolgter Löschung des Hauptlichtbogens im 50-Hz-Netz nicht mehr als 0,04 s und im 60-Hz-Netz nicht mehr als 0,033 s zur Verfügung stehen. Die normalen Druckluftschalter für 10 bis 30 kV erfüllen bei Betriebsdrücken von 15 bis 16 atü mit einer speziellen Schaltung im Steuerstromkreis diese Bedingung, mit ihnen ist der Zweiperiodenschalter realisiert.

1.3.3 Schalter grosser Ausschaltleistung

Der Druckluftschalter gestattet auch für die höchsten Leistungen das gleiche Schaltprinzip wie für kleinere und mittlere Anforderungen. Dies bietet den sehr wichtigen Vorteil einer durchgehenden Verwertung der bei Konstruktion, Fabrikation und Betrieb gesammelten Erfahrungen. Als Beispiel zeigt Fig. 11 einen Schalter für 10 kV, 1000 MVA Ausschaltleistung und 4000 A Nennstrom. Parallel zum Hauptkontakt C_1, C_2 ist der niederohmige Widerstand R angeordnet, der über eine feste Hilfselektrode H im Auspuffkanal durch die ionisierten Gase eingeschaltet wird. Zur Erzielung geringer Überspannungen beim Ausschalten kleiner induktiver Ströme dient ein zusätzlicher hochohmiger spannungs-



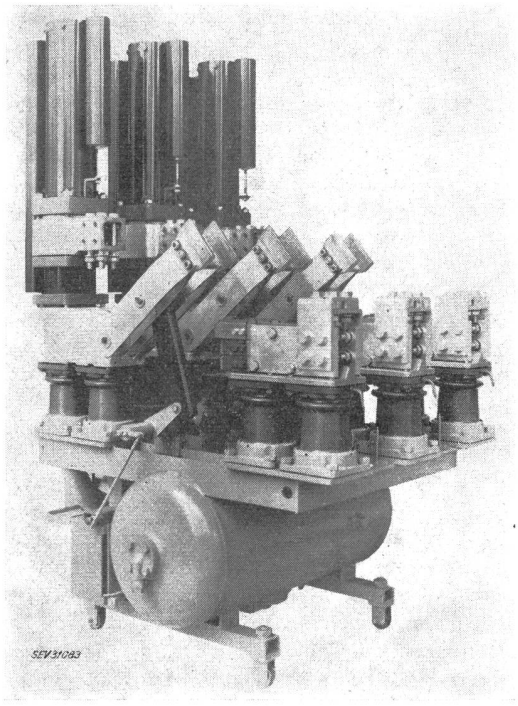


Fig. 11
Druckluft-Schnellschalter für 1000 MVA Ausschaltleistung bei 10 kV Betriebsspannung und 4000 A Dauerstrom
Schalterschema: C_1, C_2 Hauptkontakt; S Trennmesser; H Hilfsfunkenstrecke; R niederohmiger Widerstand; r hochohmiger Widerstand

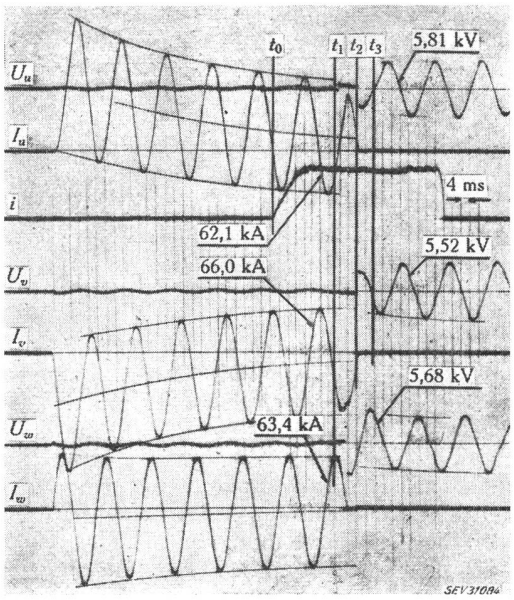
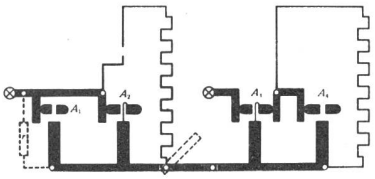


Fig. 12
Oszillogramm einer Ausschaltung mit dem Schalter nach Fig. 11
U_u, U_v, U_w wiederkehrende Spannung zwischen Phase und Erde; I_u, I_v, I_w Kurzschluss-Ströme in 3 Phasen; i Strom in der Ausschaltspule; t_0 Zeitpunkt der Befehlsgabe; t_1 Zeitpunkt der Kontakttrennung; t_2 Zeitpunkt der Löschung des letzten Hauptlichtbogens; t_3 Zeitpunkt der Unterbrechung des letzten Reststromes in den niederohmigen Widerständen
Die Ausschaltleistung beträgt 1080 MVA bei 9,8 kV verketteter wiederkehrender Spannung



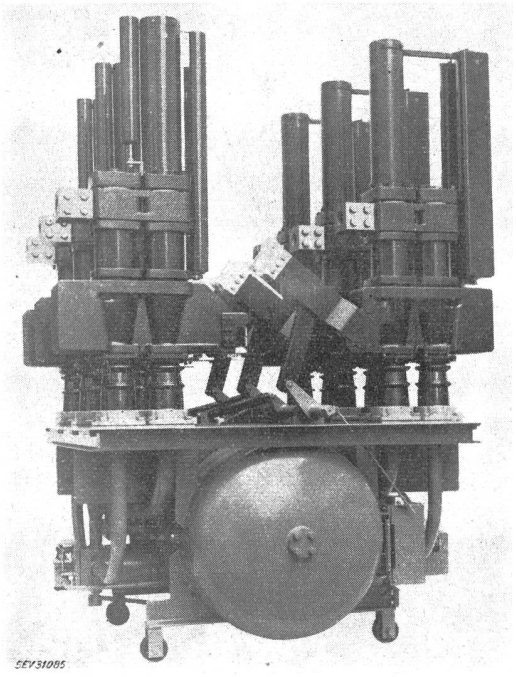
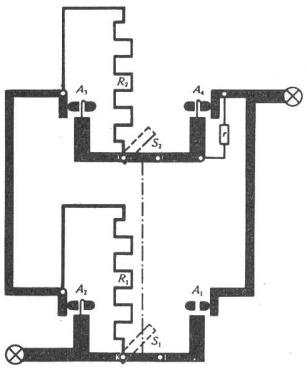


Fig. 13
Druckluft-Schnellschalter für 2000 MVA Ausschaltleistung bei 20 kV und 6000 A Dauerstrom
Schalterschema: A_1, A_4 Stromkammern; A_2, A_3 Löschkammern

abhängiger Widerstand r. Das Oszillogramm in Fig. 12 zeigt den Verlauf der Kurzschlußströme und der wiederkehrenden Spannung bei einer dreiphasigen Ausschaltung. Der mittlere Ausschaltstrom von 63,8 kA mit der mittleren wiederkehrenden Spannung von 9,8 kV ergibt eine Ausschaltleistung von 1080 MVA. Von der Befehlsgabe bis zur Kontaktöffnung wurden 28 ms und bis zur Lichtbogenlöschung 40 ms benötigt.

Für sehr grosse Anlagen werden heute Schalter für noch höhere Nennströme gebaut. Fig. 13 zeigt eine Ausführung für 20 kV, 2000 MVA Ausschaltleistung und 6000 A Nennstrom. Parallel zu den beiden seriegeschalteten Leistungskammern A_2 und A_3 befinden sich die beiden Stromkammern A_1 und A_4. Diese haben die Aufgabe, einen Teil des Betriebsstromes zu übernehmen. Sie sind genau gleich gestaltet wie die Leistungskammern, jedoch ohne Auspuffteil. Bei einer Ausschaltung öffnen sich ihre Kontakte kurz vor den Löschkontakten. Die Stromunterteilung verleiht diesem Schalter auch die Fähigkeit, stark erhöhte elektrodynamische Beanspruchungen auszuhalten.



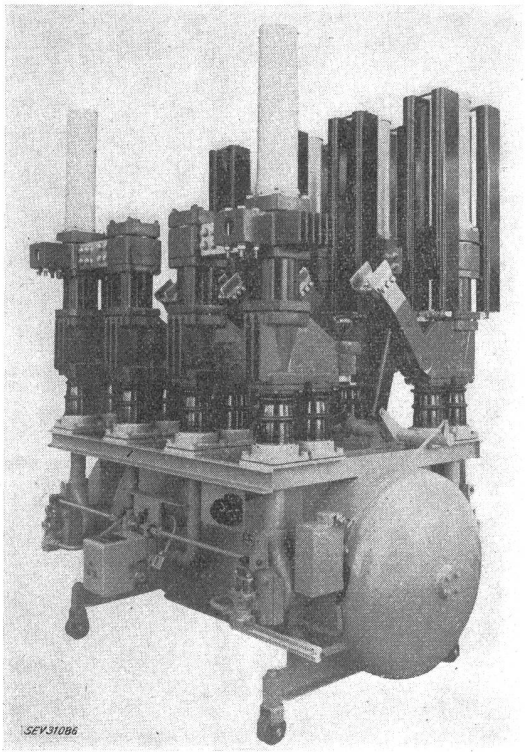


Fig. 14

Druckluft-Schnellschalter in 2poliger Ausführung für 6000 A Dauerstrom

Schalterschema: A_1 Stromkammer; A_2, A_3, A_4 Leistungskammern

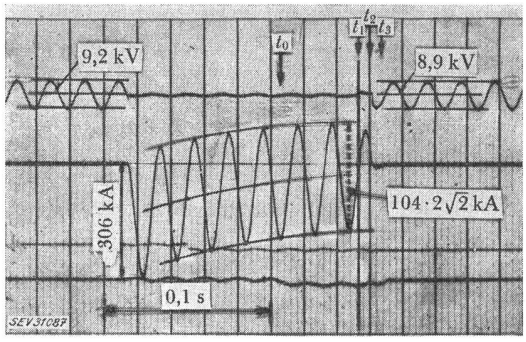


Fig. 15

Oszillogramm einer Ein-Ausschaltung mit dem Schalter nach Fig. 14

Die 3 2poligen Schalter beherrschen bei 18 kV eine dreiphasige Ausschaltleistung von 5400 MVA

Bei noch höheren Anforderungen bezüglich Nennstrom wird parallel zum Schalter ein Schnelltrenner geschaltet, welcher in seinen stromführenden Teilen gleich ausgeführt ist, wie die Trennmesser des Schalters. Auf pneumatischem Weg wird dafür gesorgt, dass der Schnelltrenner immer vor dem Leistungsschalter arbeitet. Die gesamte Ausschaltzeit für Trenner und Schalter für 12 000 A Nennstrom beträgt weniger als 200 ms.

Auch in bezug auf Ausschaltleistung lassen sich extrem hohe Anforderungen durch gut geeignete Anordnungen erprobter Schaltelemente verwirklichen. Günstige Strömungsverhältnisse und ausgeprägte Verwendung der Mehrfachunterbrechung zusammen mit sehr niederohmigen Widerständen sind die Hauptmassnahmen, die dabei die Ausschaltleistung beträchtlich erhöhen. Eine typische Ausführung ist in Fig. 14 als zweipoliger Schalter dargestellt. Ein Pol eines Schalters besteht aus 4 Löschkammern und 2 Trennmessern. Die Löschkammer A_1 sorgt nur für die Führung eines Teils des Dauerstromes oder Stosskurzschluss-Stromes; sie öffnet frühzeitig. Die drei Löschkammern A_2, A_3, A_4 sind in Serie geschaltet, pneumatisch miteinander gekuppelt und schalten den Strom aus. Zwei von ihnen sind durch niederohmige Widerstände fest überbrückt, die dritte sorgt für das Ausschalten des Widerstands-Reststromes. Diese Löschkammer ist lediglich durch einen hochohmigen Widerstand überbrückt. Die entsprechende dreiphasige Ausschaltleistung, die von diesen Leistungsschaltern bewältigt wird, beträgt bei 18 kV 5400 MVA.

Fig. 15 zeigt das Oszillogramm der letzten Ein—Ausschaltung des 3-min-Prüfzyklus. Der Einschaltstrom betrug einen Scheitelwert von 306 kA und der symmetrische Ausschaltstrom 104 kA bei einer wiederkehrenden Polspannung von 8,9 kV. Die längste Ausschaltzeit im Verlauf von 18 Leistungsausschaltungen überstieg nicht 67 ms.

Besondere Anforderungen werden an die Sicherheitsschalter von Hochleistungs-Prüfanlagen gestellt. Sie sind häufig mit Leistungen beansprucht, die wesentlich über den in den Netzen vorkommenden Werten liegen, und müssen diese sehr oft schalten. Der Sicherheitsfaktor in elektrischer und mechanischer Beziehung muss sehr gross sein. Nachdem sich der Sicherheitsschalter in der alten Leistungsanlage der KEMA in Holland in jahrelangem Betrieb bewährt hatte, wurde für die neue, leistungsfähigere Anlage wieder ein Druckluftschalter als Sicherheitsschalter mit viel höherer Ausschaltleistung eingesetzt.

Die langjährigen Erfahrungen und Forschungen auf dem Gebiet der Druckluftschalter führten zur begründeten Überzeugung, dass die Probleme des Schalterbaues mit dieser Schalterart in der besten, umfassendsten und betriebssichersten Weise gelöst werden können.

2. Magnetschalter für Innenraum-Anlagen

Im Bestreben nach einem öllosen, autonomen Hochspannungsschalter entstanden unter Ausnützung der grossen Fortschritte in der Isolierstofftechnik die Schalter mit magnetischer Lichtbogenbeblasung. Es existieren z. Z. drei Bauarten als Mittelspannungs-Wechselstrom-Magnetschalter. Sie eignen sich hauptsächlich für kleinere Unterstationen in Energieverteilungsnetzen, Eigenbedarfsanlagen von thermischen Kraftwerken, als Kondensatorschalter und Objektschalter, wo für Spannungen bis 17,5 kV grössere Leistungen ein- und ausgeschaltet werden und Öl aus betrieblichen Gründen unbedingt vermieden werden muss.

1.1 Magnetschalter mit Zickzack-Lichtbogen

Fig. 16 zeigt den grundsätzlichen Aufbau dieses Schaltertyps. Der Lichtbogen wird durch das magnetische Feld des die Kammer umgebenden Elektromagneten in die Längsspalte der aus hochwertigem Material bestehenden Isolierplatten hineingetrieben. Da die Spalten der Nachbarplatten gegenseitig verschoben sind, nimmt der hochsteigende Lichtbogen eine Zickzackform an, wird wesentlich verlängert und infolge der hohen Wärmekapazität der Platten stark gekühlt.

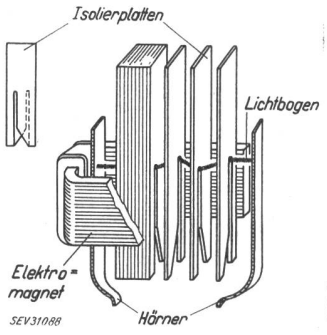


Fig. 16
Prinzipieller Aufbau der Lichtbogenkammer von Magnetschaltern mit Zickzack-Lichtbogen

1.2 Magnetschalter mit Solenoid-Lichtbogen

Der prinzipielle Aufbau dieses Typs ist in Fig. 17 dargestellt. Der Lichtbogen wird ebenfalls unter der Wirkung eines die Kammer umgebenden Elektromagneten in die Kammer hineingetrieben. Infolge der V-förmigen Funkenhörner und des magnetischen Feldes erweitern sich die einzelnen Lichtbogen zu Schleifen und bilden in ihrer Gesamtheit eine solenoidartige Strombahn. Durch das hitzebeständige Material der Isolierplatten werden sie stark gekühlt. Diese Schalterbauart ermöglicht die Erzeugung einer wesentlich grösseren Lichtbogenlänge im gleichen Kammervolumen als bei Magnetschaltern mit Zickzack-Lichtbogen.

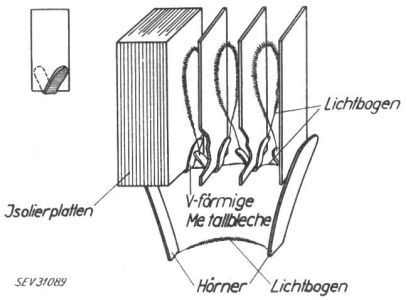


Fig. 17
Prinzipieller Aufbau der Lichtbogenkammer von Magnetschaltern mit Solenoïd-Lichtbogen

1.3 Magnetschalter mit kurzen Lichtbogen

Schalter dieses Prinzips basieren auf dem Kathodeneffekt, der darin besteht, dass sofort nach der Lichtbogenlöschung beim Stromnulldurchgang vor der Kathode eine positive Raumladungsschicht entsteht, die etwa 300 V zu halten vermag. Dieser Effekt wird umso ausgeprägter, je kleiner der Elektrodenabstand und je geringer der Ionisationsgrad, bzw. die Temperatur, ist. Durch Serieschaltung einer entsprechend grossen Zahl von Lichtbogen zwischen Metall-Lamellen kann damit ein Wiederzünden verhindert werden.

Der schematische Aufbau dieses Schaltertyps ist in Fig. 18 dargestellt. Der Lichtbogen wird durch ein starkes Magnetfeld aus der Kontaktzone in die Teilkammern hineingeblasen. Dadurch wird er verlängert, erstmalig unterteilt und die Teillichtbogen so gedreht, dass sie parallel zueinander und senkrecht zur ursprünglichen Lichtbogenebene stehen. Durch das magnetische Eigenfeld dieser schraubenförmigen Strombahn werden die Lichtbogen in den Teilkammern weiter aufwärts gegen die Metall-Lamellenzone getrieben und durch diese erneut unterteilt. Die 2 mm langen Lichtbogen laufen dann zwischen den Lamellen bis zum nächsten Stromnulldurchgang weiter aufwärts.

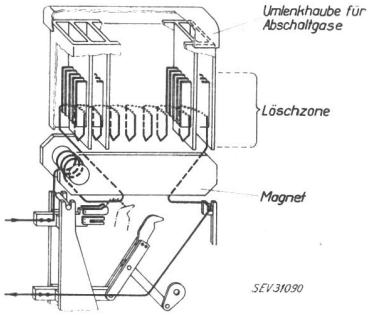


Fig. 18
Prinzipieller Aufbau der Kontaktanordnung und Löschkammer von Magnetschaltern mit kurzen Lichtbogen

Bei allen Magnetschaltern genügt das magnetische Feld zur Bewegung des Lichtbogens aus der Kontaktzone in die Löschkammern bei kleinen induktiven Strömen bis etwa 50 A nicht. Zur Lösung dieses Problems werden daher Luftkolben angeordnet, die während der Öffnung der Kontakte mittels eines Luftstrahls den Lichtbogen in die Kammer hineinblasen.

Die Lichtbogenlöschung erfolgt im ganzen Strombereich sehr sanft. In den gewöhnlich schwierigen Fällen eines rein induktiven Kurzschlusses wird infolge der hohen Lichtbogenspannung in den Stromkreis ein rasch anwachsender Ohmscher Widerstand eingeschaltet. Dadurch wird erstens der Kurzschluss-Strom sofort nach der Kontakttrennung begrenzt und zweitens der Leistungsfaktor stark vergrössert. Das Oszillogramm in Fig. 19 zeigt dieses Verhalten deutlich. Der cos φ steigt

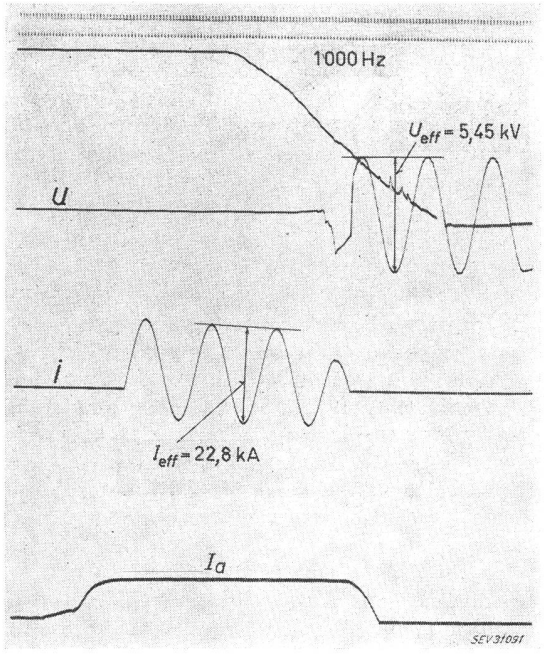


Fig. 19
Ausschaltoszillogramm des Magnetschalters mit kurzen Lichtbogen
I_a Auslösestrom

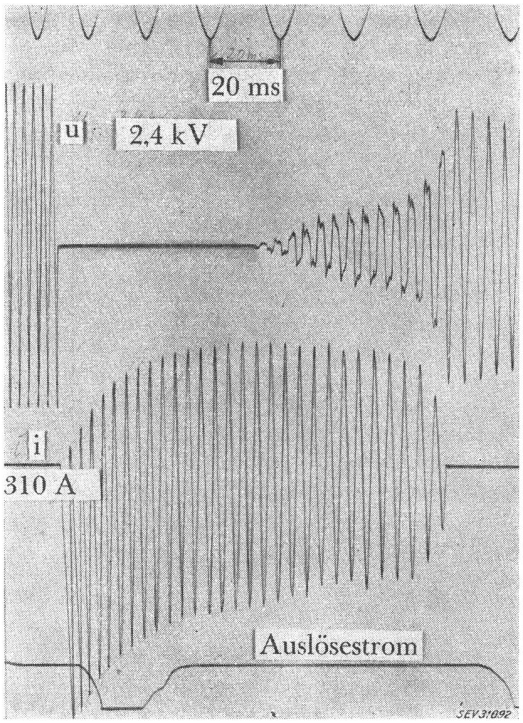


Fig. 20
Ausschaltung eines 300-Hz-Motors mit Magnetschaltern
Das Wachsen der Lichtbogenspannung und die Reduktion des Ausschaltstromes während der Lichtbogenlöschung ist deutlich sichtbar

von 0,1 auf etwa 0,6 im Moment der Löschung. Die hohe Lichtbogenspannung bringt jedoch auch eine höhere Schaltarbeit mit sich. Magnetschalter, welche dem Lichtbogen durch feuerfeste Platten Energie entziehen, werden bei hohen Strömen stark aufgeheizt und kühlen nach dem Stromnulldurchgang mit einer grösseren Zeitkonstante ab als der Entladungskanal. Die Isolierplatten verzögern von einem gewissen Zeitpunkt an die Verfestigung. Metall-Lamellenschalter arbeiten mit einer viel kleineren thermischen Zeitkonstante, was speziell bei rasch aufeinanderfolgenden Schaltungen, wie der Schnellwiedereinschaltung und grossen Kurzschlußströmen, vorteilhaft ist.

Der Einfluss der hohen Lichtbogenspannung ist auch bei kapazitiven Ausschaltungen wichtig. Bei kleinen kapazitiven Strömen wird der Lichtbogen durch die Luftblasung nicht abgerissen, sondern verlängert und in die Kammer geblasen. Dadurch wird auch bei kapazitiven Ausschaltungen ein hoher Widerstand in den Kreis eingeschaltet. Selbst wenn einmal nach einer sehr kurzen stromlosen Pause von 1...2 ms eine Rückzündung erfolgt, so geschieht dies immer durch einen langen Lichtbogenkanal, d. h. über einen hohen Widerstand. Dadurch werden Überspannungen vermieden. Es wurde ausserdem festgestellt, dass beim Ausschalten kleiner induktiver Ströme relativ grosse Nachströme fliessen. Auch diese dämpfen das Überschwingen ganz erheblich.

Magnetschalter sind für grosse Schalthäufigkeit sehr geeignet. Der Lichtbogen läuft von den Hauptkontakten in weniger als 5 ms weg. Dies führt zu einem nur sehr geringen Kontaktverschleiss. Die Lebensdauer der Laufschienen und Lamellen ist sehr gross, da ein rasch wandernder Lichtbogen praktisch keinen Abbrand verursacht. Magnetschalter, eingesetzt als Ofenschalter, haben ohne Revision der Kontakte über 2000 Schaltungen mit Betriebsströmen von einigen 100 A ausgeführt.

Das Unterteilungsprinzip der Löschkammern hat den weiteren Vorteil, dass die Entionisierung im Stromnulldurchgang sehr rasch geschieht. Innerhalb der technisch möglichen Eigenfrequenzen wurde daher keine Eigenfrequenzabhängigkeit festgestellt. Fig. 20 zeigt das Oszillogramm einer Motorausschaltung mit einer Betriebsfrequenz von 300 Hz. Die Ausschaltleistung der Schalter bei der Schaltung von Mittelfrequenzen wird nicht reduziert.

Die Entwicklung von Magnetschaltern setzt eine intensive Forschungstätigkeit voraus. Dabei sind viele Fragen abzuklären wie:

a) Die Mindestfeldstärke, welche erforderlich ist, um einen Lichtbogen in Bewegung zu setzen, abhängig von Stromstärke, Elektrodenabstand, Druck und Elektrodenmaterial;

b) Die Geschwindigkeit, mit welcher der Bogen geblasen wird;

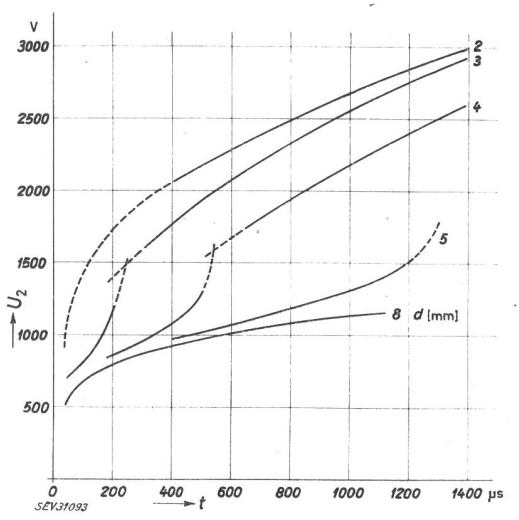


Fig. 21
Verlauf der Wiederzündspannung nach dem Nulldurchgang eines Wechselstrombogens zwischen Metall-Lamellen
U_2 Wiederzündspannung; t Zeit bis zur Wiederzündung; d Abstand der Metall-Lamellen

c) Der Einfluss des Magnetfeldes und der Bogenspannung auf das Wiederzünden bzw. Löschen des Lichtbogens;

d) Der Einfluss isolierender Kammerwände verschiedenen Materials auf Bewegung, Spannung und Wiederzünden des Lichtbogens;

e) Der Einfluss der Laufgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Elektrodenform und des Elektrodenmaterials.

Der Vorteil kurzer gegenüber langen Lichtbogen geht aus dem in Fig. 21 dargestellten Verlauf der Wiederzündspannung nach dem Nulldurchgang eines Wechselstrombogens hervor. Unabhängig von der Bogenlänge erreicht jede Bogenstrecke innerhalb 1 µs eine dielektrische Festigkeit von etwa 700 V bei blanken bzw. etwa 300 V bei oxydierten Elektroden. Nach einiger Zeit folgt ein zweiter Verfestigungssprung, der umso früher einsetzt, je geringer der Elektrodenabstand ist. U. U. kann deshalb die Wiederzündspannung eines 2-mm-Bogens das Mehrfache der Wiederzündspannung eines 100-mm-Lichtbogens betragen und ein Wechselstrom-Lichtbogen durch Verkürzen gelöscht werden.

Das Magnetfeld ist nicht nur ein Hilfsmittel, um den Lichtbogen in die Löschkammer zu zwingen, sondern auch im eigentlichen Sinne ein Löschmittel. In Fig. 22 ist der Verlauf der Wiederzündspannung eines 3 mm langen Lichtbogens unter verschiedenen Bedingungen gezeigt. Die tiefste Kurve entspricht der Verfestigung eines unbewegten feldfreien Lichtbogens. Die mittlere Kurve zeigt die Erhöhung der Wiederzündspannung, wenn auf den stillstehenden Lichtbogen ein Magnetfeld von 100 Gs einwirkt. Die oberste Kurve zeigt die Wiederverfestigung eines mit einer Geschwindigkeit von etwa 10 m/s in einem Magnetfeld von 100 Gs wandernden Lichtbogens. Die beiden Effekte des Magnetfeldes und des rasch bewegten Lichtbogens sind etwa gleich gross und nebeneinander wirksam.

Leistungsschalter für Innenraum-Anlagen dürfen nur ein kleines Bauvolumen, besonders eine nur geringe Grundfläche, beanspruchen. Das Löschprinzip des Magnetschalters führt zu schmalen Schaltkammern, was wesentliche Voraussetzungen für Verwendung in gekapselten Schaltanlagen schafft. Fig. 23 zeigt den konstruktiven Aufbau des Schalters für 7,2 kV Betriebsspannung und 300 MVA Ausschaltleistung. Durch Anordnen des Antriebes unterhalb des Kontaktsystems und der Löschkammern kann die Grundfläche minimal gehalten werden. Alle wichtigen Teile sind für Kontrollen und Revisionen leicht zugänglich und

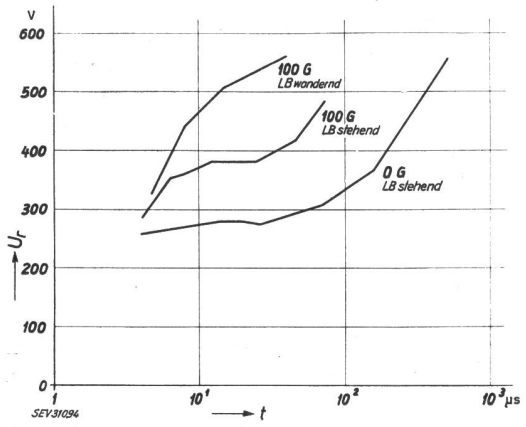


Fig. 22

Verlauf der Wiederzündspannung eines 3 mm langen Lichtbogens zwischen Metall-Lamellen

U_r Wiederzündspannung; t Zeit; *LB* Lichtbogen

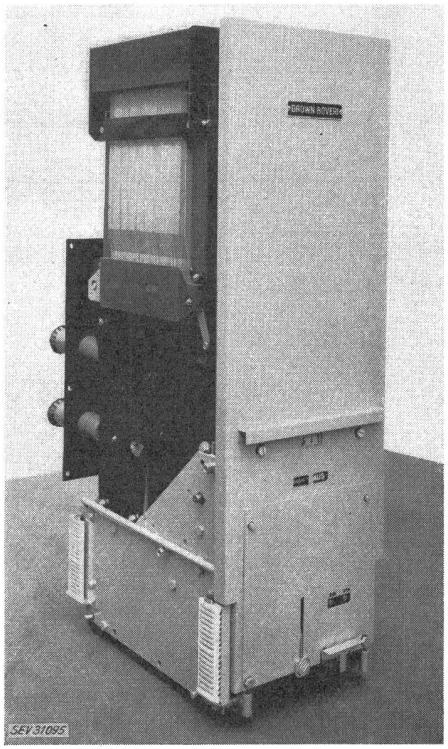


Fig. 23

Magnetschnellschalter für 7,2 kV Betriebsspannung und 300 MVA Ausschaltleistung

Das Kontaktsystem und der Antrieb sind unterhalb der Löschkammern angeordnet

können einzeln rasch ausgebaut werden. Der Kraftspeicher-Federantrieb besitzt ein Energievolumen für die drei Schaltspiele des Schnellwiedereinschalt-Zyklus. Schalter nach dieser Bauart werden von Brown Boveri bis 17,5 kV Betriebsspannung und bis 50 kA Ausschaltstrom gebaut.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich Schalter mit magnetischer Lichtbogenbeblasung in den verschiedensten Anwendungsgebieten einwandfrei bewährt haben. Bisher sind keine derartigen Schalter für Betriebsspannungen über 20 kV ausgeführt worden. Forschungen in der Isolierstofftechnik, neuartige Löschmittel und wirkungsvollere Anwendungsmöglichkeiten der magnetischen Blasung eröffnen dem Magnetschalter möglicherweise in Zukunft den Weg bis zu höheren Spannungen und Leistungen.

3. Gesichtspunkte für die Wahl zwischen Druckluft-, ölarmen und Magnet-Schaltern für Innenraum-Anlagen

Die Erfahrungen der Praxis haben bewiesen, dass sich alle drei Schalterarten für die Anforderungen der Innenraum-Anlagen eignen. Jeder Schaltertyp besitzt innerhalb gewisser Spannungsbereiche bemerkenswerte Vorzüge vor den anderen, die sich aus technischen, wirtschaftlichen und betrieblichen Gesichtspunkten ergeben. Generell sind die zwei Hauptgruppen der öllosen Schalter und die, welche Öl enthalten, zu unterscheiden. Diese weisen eine gewisse Brand- und Explosionsgefahr auf. Ölarme Schalter liegen in den Gestehungskosten wohl tiefer als öllose Schalter; trotzdem konnten sie sich z. B. in den USA, wo die Öllosigkeit eine grosse Rolle spielt, gegenüber den Ma-

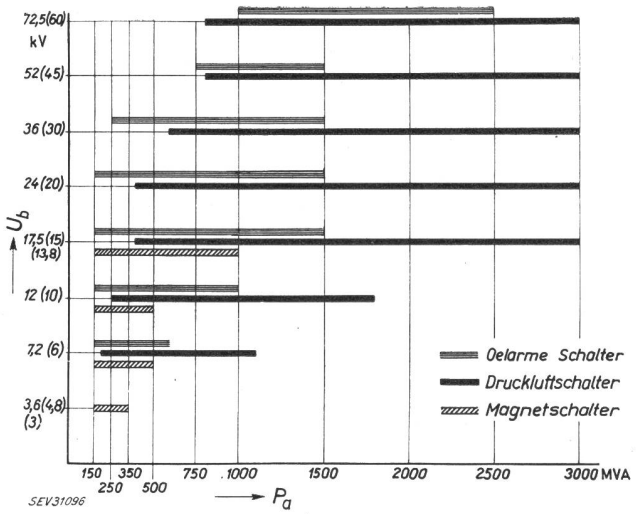


Fig. 24
Übersicht der verfügbaren Schaltertypen unter Berücksichtigung ihrer Betriebsspannung U_b und Ausschaltleistung P_a

gnet- und Druckluftschaltern nicht durchsetzen. Innerhalb der Gruppe der Magnet- und Druckluftschalter wird sich die Wahl eher nach der Preisfrage richten. In Stationen mit einer grösseren Anzahl von Schaltern und höheren Spannungen wird der Druckluftschalter nach wie vor der bevorzugte Typ sein.

Fig. 24 gibt eine Übersicht über die verfügbaren Typen der verschiedenen Schalterarten unter Berücksichtigung ihrer Nenndaten. Die Magnetschalter sind auf die Spannungen 3...17,5 höchstens 24 kV mit Ausschaltleistungen bis 500, höchstens 1000 MVA, begrenzt. Die ölarmen und Druckluftschalter überdecken sich auf einem grösseren Bereich. Die Vorherrschaft des Druckluftschalters ist im Gebiet grosser und grösster Ausschaltleistungen klar ersichtlich.

Die fortschreitende Entwicklung und das ständige Wachsen der Übertragungs- und Verteilnetze haben die Wechselstrom-Leistungsschalter zu wichtigsten Gliedern in der Energieversorgung gemacht. Ihre Bedeutung wird zukünftig durch die steigenden Kraftwerkleistungen und damit der Kurzschlussleistungen erheblich zunehmen.

Adresse des Autors:
J. Schneider, dipl. Ingenieur, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

Ölarme Schalter für Innenraumanlagen

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 30. und 31. Januar 1962 in Zürich,
von G. Marty, Zürich
621.316.57.064.25-744

Nach einem kurzen geschichtlichen Rückblick wird auf das Prinzip der Lichtbogenlöschung beim ölarmen Schalter für Mittelspannungen näher eingetreten. Es werden anschliessend Konstruktionen und Schaltverhalten moderner Schalter schweizerischer Provenienz beschrieben und gezeigt, dass der ölarme Hochspannungsschalter ein betriebssicherer, einfacher Apparat ist, der alle auftretenden Schaltfälle einwandfrei beherrscht.

Après un bref historique, l'auteur expose plus en détail le principe du soufflage des arcs dans des disjoncteurs à faible volume d'huile, pour moyennes tensions. Il décrit ensuite la construction et le comportement en service de disjoncteurs de fabrication suisse et montre que le disjoncteur à faible volume d'huile est un appareil simple et sûr, qui fonctionne impeccablement dans tous les cas qui peuvent se présenter.

In der Schweiz werden Mittelspannungsanlagen üblicherweise als Innenraumanlagen gebaut, während für höhere Spannungen im allgemeinen die Freiluftausführung gewählt wird. Basierend auf diese grobe spannungsmässige Abgrenzung der beiden Bauarten von Hochspannungsanlagen beschränken sich die folgenden Ausführungen auf das Gebiet der Mittelspannungsschalter.

Verfolgt man die Geschichte des ölarmen Schalters rückwärts, so lässt sich feststellen, dass diese Schalterart heute rund 60 Jahre alt ist. Die Entwicklung begann mit dem von *Ferranti* und *Rice* knapp vor der Jahrhundertwende karzipierten sog. Topfschalter. Dieser Schalter wies schon alle Kennzeichen des ölarmen Schalters auf, nämlich die durch Luftstrecken erreichte Isolation des Schaltelementes gegen Erde und die geringe Ölmenge, die gerade nur jenes Quantum Öl vorsah, das für den eigentlichen Löschvorgang notwendig war.

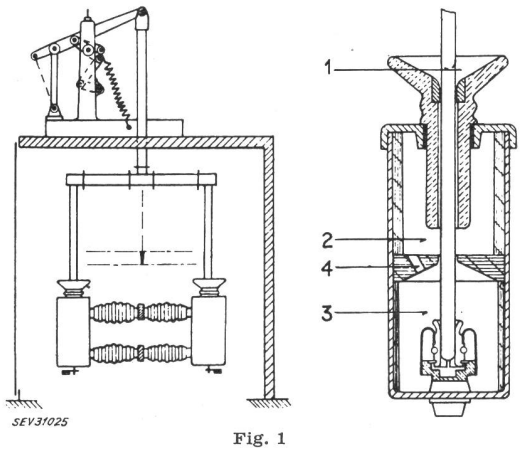


Fig. 1
Topfschalter (1904...1908)
1 Stellung «Aus» des Schalters; *2* Pufferkammer mit Luftpolster; *3* Druckkammer (ölgefüllt); *4* Öffnung zur Druckbegrenzung

Der Topfschalter wurde bei der Maschinenfabrik Oerlikon 1904 eingeführt (Fig. 1). Der das Kontaktsystem enthaltende Topf bestand ursprünglich aus einem einzigen Raum, der jedoch nach kurzer Zeit unterteilt wurde in zwei Kammern, wovon die untere ölgefüllte die eigentliche Druckkammer war und die obere als Pufferkammer mit Luftpolster wirkte. Verbunden waren beide durch eine Öffnung, durch welche eine Druckbegrenzung der untern Kammer erreicht wurde.

Die Ausführung eines solchen Schalters für eine Nennspannung von 20 kV und einen Nennstrom von 600 A zeigt Fig. 2. Trotz der Serieschaltung von zwei Unterbrechungsstellen pro Pol ist die mit 60 MVA angegebene Schaltleistung, die einem Abschaltstrom von 1700 A entspricht, äusserst bescheiden. Dieser Schaltertyp wurde bis in die zwanziger Jahre hinein gebaut. Abgelöst wurde er durch den Kesselölschalter. Der Hauptgrund für den Übergang zum Kesselölschalter dürfte darin zu suchen sein, dass sich bei diesem die konstruktiven Probleme, die sich bei der Weiterent-