

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 22 (1931)

Heft: 25

Artikel: Die Hochleistungsversuchsanlage der A.-G. Brown, Boveri & Cie.

Autor: Thommen, Hans

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1060541>

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: 10.01.2026

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

BULLETIN

REDAKTION:

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

VERLAG UND ADMINISTRATION:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G., Zürich 4
Stauffacherquai 36/38

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXII. Jahrgang

Nº 25

Mittwoch, 9. Dezember 1931

Die Hochleistungsversuchsanlage der A.-G. Brown, Boveri & Cie.

Von Hans Thommen, Ingenieur, Baden.

621.316.313(494)

Einleitend gibt der Autor einen Ueberblick über die Methoden, die nach und nach angewendet wurden, um Hochspannungsschalter zu verbessern. Systematisch durchgeführte Forschungen mit verhältnismässig kleinen Abschaltleistungen führten schliesslich dazu, dass die aufgestellten Theorien überprüft und Oelschalter vorausberechnet werden konnten. Um die gemachten Fortschritte auszudehnen und zu vertiefen, sind jedoch Abschaltversuche mit höchsten Leistungen unerlässlich. Zur Durchführung solcher Versuche kommt, weil dazu geeignete Hochspannungsnetze nur ausnahmsweise zur Verfügung stehen, nur eine besondere Versuchsanlage in Frage. Die erste derartige Hochleistungsversuchsanlage in der Schweiz baute die A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden. Diese Anlage wird im folgenden beschrieben, und es wird gezeigt, welche Erfahrungen bezüglich Weiterentwicklung von Schaltmaterial damit schon vorliegen. Nicht voraussehbare, schwerwiegende Konstruktionsmängel an Oelschaltern konnten in kurzer Zeit aufgedeckt und behoben werden, so dass die Betriebssicherheit von neu zu entwickelnden Schalttypen gegenüber früher bedeutend gesteigert werden kann. Nur mit den besprochenen Mitteln ist es möglich, öllose Schalter zielbewusst zu entwickeln, um nicht, wie es beim Oelschalter der Fall war, jahrelang nach sicher arbeitenden Konstruktionen tasten zu müssen. Am Schlusse des Artikels wird gezeigt, dass die Beanspruchung von Schaltern in der Hochleistungsversuchsanlage die denkbar schärfste ist, so dass in Netzbetrieben zusätzliche Sicherheitsfaktoren auftreten.

L'auteur commence par un aperçu des méthodes appliquées successivement pour améliorer les interrupteurs à haute tension. Des recherches systématiques, avec des puissances de rupture relativement faibles, ont finalement abouti à ce que l'on a pu contrôler les théories dressées et calculer à l'avance des interrupteurs dans l'huile. Pour étendre et approfondir les progrès déjà réalisés, il est indispensable de pouvoir faire des essais de rupture avec des puissances très élevées. Il arrive très rarement de disposer de réseaux à haute tension appropriés pour faire ces essais, de sorte qu'une station d'essai spéciale entre seule en considération. La première station d'essai à haute puissance de ce genre a été construite par la S. A. Brown, Boveri et Cie à Baden. L'auteur décrit cette installation et montre quels résultats elle a déjà permis d'obtenir quant au perfectionnement des interrupteurs. On a ainsi découvert en peu de temps des défauts graves de construction des interrupteurs à huile, défauts auxquels on a naturellement pu remédier de suite, de telle sorte que la sécurité en service de nouveaux types en sera considérablement augmentée. Seuls les moyens décrits permettent de développer les interrupteurs sans huile, en marchant droit au but et non pas à tâtons comme on l'a fait pendant des années pour les interrupteurs à huile. Pour terminer, l'auteur démontre que la sollicitation des interrupteurs éprouvés à l'aide de la nouvelle station à haute puissance est la plus sévère que l'on puisse imaginer, de sorte que dans l'exploitation des réseaux, on peut compter avec des coefficients de sécurité plus élevés.

Die Hochleistungsversuchsanlage, welche im folgenden beschrieben wird, ist bereits im ersten Ausbau, d. h. mit nur einem Generator, zweifellos eine der grössten ihrer Art und die erste in der Schweiz, so dass eine ausführliche Beschreibung der Ausrüstung allgemeines Interesse bietet. Die Installation dient in erster Linie der Entwicklung von Hochleistungsschaltern. Ausserdem werden in ihr auch Sicherungen, Drosselpulsen, Stromwandler, Relais, Sammelschienenmodelle usw. auf Kurzschlussfestigkeit geprüft. Es sei vorweggenommen, dass die meisten Versuche der Erforschung der Vorgänge in neu zu entwickelnden Apparaten gewidmet sind.

I. Bedeutung systematischer Erforschung der Abschaltvorgänge.

Die fortwährend zunehmende Leistungsfähigkeit der Ueberlandkraftwerke und die weitgehende Vermaschung der Hochspannungsnetze, die bereits

über die politische Grenze einzelner Länder hinauswächst, zwingt die Betriebsingenieure zu immer gewissenhafterer Wahl der Sicherheits- und Schutzapparate. Den Konstruktionsfirmen erwächst dabei die Aufgabe, den Forderungen der Praxis in weitgehendstem Masse zu entsprechen.

Die Schalter spielten in der Entwicklungsgeschichte der Hochspannungstechnik von Anfang an eine bedeutende Rolle¹⁾. Nachdem an gewöhnlichen Hebeleinschaltern in Luft schon bei verhältnismässig niederen Spannungen und Strömen ausserordentlich lange Abschaltlichtbogen auftraten, kam C. E. L. Brown im Jahre 1897 anlässlich der Versuche im Kraftwerk Porta-Volta (Mailand) auf den Gedanken, die Unterbrechung unter Öl vorzunehmen. Mit der Einführung des auf diese Weise entstandenen Oelschalters glaubte man eine

¹⁾ Vogelsang: Geschichtliche Einzeldarstellungen aus der Elektrotechnik, 2. Band, s. Bull. SEV 1930, Nr. 11, S. 386.

K. Sachs: Brown-Boveri-Mitteilungen, Januar 1930.

Lösung gefunden zu haben, die allen Forderungen der Praxis genügen könnte. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass auch diese Schalter unter Umständen Störungen mit schwerwiegenden Folgen verursachen. Die Konstrukteure mussten nach und nach einsehen, dass zur Behebung der bestehenden Mängel Abschaltversuche in Netzen notwendig waren. Solche sind aber aus betriebstechnischen Gründen sehr umständlich durchzuführen, da für eine methodische Erforschung eine verhältnismässig grosse Zahl von Kurzschlussversuchen notwendig ist. Im Laufe der Zeit sind auch nur wenige Schalterprüfungen in Hochspannungsnetzen durchgeführt worden; zudem konnten die dabei gewonnenen Erkenntnisse gerade nur für die Verbesserung der untersuchten Typen verwertet werden.

Die Erkenntnis, dass auf solche Weise nur schwer zusammenfassbares Erfahrungsmaterial gesammelt werden kann, gab seinerzeit dem Schweizerischen Elektrotechnischen Verein (SEV) Veranlassung zur Beschreitung eines andern Weges²⁾. Es ist das Verdienst von Prof. Dr. Bruno Bauer, in den Jahren 1915 bis 1917, als Ingenieur des Generalsekretariates des SEV und VSE, an Hand von sehr sorgfältig durchgeföhrten analytischen Studienversuchen gezeigt zu haben, welchen Einfluss Strom und Spannung, Kontaktform und Kontaktmaterial, Ausschaltgeschwindigkeit und Anzahl Unterbrechungsstellen usw. auf den Abschaltvorgang ausüben. Mit jenen Versuchen ist zum ersten Mal die vielversprechende Methode der systematischen Forschung auf dem Gebiete des Schalterbaues angewendet worden. Eine eingehende theoretische Bearbeitung der Ergebnisse konnte jedoch nicht die Lücke ausfüllen, die wegen der zu kleinen, für die experimentelle Erforschung zur Verfügung gestellten Abschaltleistung geblieben war. Aus diesem Grunde wurden die systematischen Untersuchungen in den Versuchsläden der A.-G. Brown, Boveri & Cie. auf grössere Leistungen ausgedehnt. Die durchgeföhrten Arbeiten sind seither verschiedentlich veröffentlicht worden und dürfen wohl heute zu den gründlichsten Forschungen auf diesem Gebiete gezählt werden³⁾.

Mit Hilfe von Zeitlupenaufnahmen des Abschaltvorganges in Glasschaltern gelang es, die Oelkolbentheorie nachzuweisen. Nach dieser Theorie bilden sich um die Abschaltlichtbogen herum rasch wachsende Gasblasen. Das Oel oberhalb den Unterbrechungsstellen wird wie ein Kolben gegen den Deckel geschleudert. Hierauf entsteht im Schalter bei noch nicht beendigter Unterbrechung ein bis zur Löschung der Lichtbogen stetig anwachsender Ueberdruck⁴⁾. Die Druckbeanspruchung eines Oelschalters ist somit einerseits von seinem Luftpolstervolumen, anderseits von der insgesamt ent-

wickelten Gasmenge abhängig. Letztere ihrerseits wird wieder bestimmt durch die während der Abschaltung in den Lichtbogen aufgezehrte Energie. An Hand von vielen tausend Abschaltversuchen, die unter verschiedensten Bedingungen durchgeführt wurden, gelang es, die gegenseitige Abhängigkeit zwischen den verschiedenen Grössen, welche den Unterbrechungsvorgang beeinflussen, experimentell zu ermitteln. Durch Extrapolation der erhaltenen Kurven auf grössere Leistungen war es möglich geworden, die Schalterbeanspruchungen voraus zu bestimmen und somit ein Berechnungsverfahren für die Oelschalter in die Praxis einzuföhren.

Auch die Vorgänge beim Einschalten auf hohe Kurzschlussströme wurden unter Benützung eines Hochstromtransformators, der bei kleiner Spannung Stromstösse bis zu 160 000 A abzugeben imstande war, eingehend untersucht. Nachdem man eingesehen hatte, dass gewöhnliche Klotzkontakte bei Strömen über 15 000 A infolge Kontaktabhebung der Schweißgefahr ausgesetzt sind, wurden die abhebungsfreien Solenoidkontakte entwickelt. Die Hochstromversuche, die auch auf Finger- und Tulpenkontakte ausgedehnt wurden, gewähren heute einen weitgehenden Einblick in die Vor- und Nachteile der verschiedenen Kontaktformen.

Um diese unverkennbaren Fortschritte auszudehnen und zu vertiefen, wurde beschlossen, eine Hochleistungsversuchsanlage zu errichten. Die neuen Schalterkonstruktionen werden in dieser durch direkte Versuche auf ihre Leistungsfähigkeit geprüft. Die Berechnung der Apparate wird auf solche Weise einer scharfen Kontrolle unterworfen, eine Massnahme, die auf andern Gebieten der Technik schon längst als selbstverständlich betrachtet wird.

II. Beschreibung der Hochleistungs-Versuchsanlage.

Die Hochleistungsversuchsanlage besteht gegenwärtig aus einem Drehstromgenerator von hoher Kurzschlussleistung, aus einem Transformator zur Erzeugung hoher Versuchsspannungen, der 11-kV-Verteilungsanlage mit Drosselpulen und den Schalterprüfständen. Fig. 1 gibt eine Innenansicht mit dem Generator und dem Transformator wieder. Hinter dem Generator befindet sich ein zweistöckiges Gebäude mit einem Mess- und Kommandoraum sowie einem Bureauraum für das technische Personal.

Der Generator hat ein Gesamtgewicht von 300 t, macht 500 Umdrehungen in der Minute und kann hinsichtlich Grösse mit einer Einheit von rund 80 000 kVA Leistung verglichen werden. Es ist einleuchtend, dass beim Entwurf dieser anormalen Maschine sowohl in elektrischer als auch in mechanischer Beziehung ganz neue Gesichtspunkte zur Geltung kommen mussten. Vorerst fehlte es an einer Berechnungsmethode, welche erlaubte, die erreichbaren Kurzschlussströme mit genügender Sicherheit zu bestimmen. Die Rechnungsunter-

²⁾ Berichte der Kommission für Hochspannungsapparate und Brandschutz des SEV und des VSE, Bulletin des SEV, Jahrgang 1915, S. 137 und 300; Jahrgang 1916, S. 85; Jahrgang 1917, S. 225 und 273.

³⁾ J. Kopeliowitsch, Bull. SEV 1928, S. 541; RGE 1930, S. 251 und 291.

⁴⁾ G. Brühlmann, Bull. SEV 1925, S. 81.

lagen mussten vielmehr an Hand von Versuchen mit besonders gebauten Modellgeneratoren verschafft werden. Aus den durchgeföhrten theoretischen und experimentellen Untersuchungen konnte die Folgerung gezogen werden, dass eine Maschine mit 12 Polen den gestellten Forderungen am besten

Der Stator hat ein elektrisch geschweisstes Gehäuse. Seine Wicklung ist für 6,4 kV pro Phase bemessen und kann in Stern oder in Dreieck geschaltet werden. Mit Rücksicht auf die sehr hohe elektrodynamische Beanspruchung der Spulenköpfe wurde den Wicklungsabstützungen besondere Aufmerksamkeit

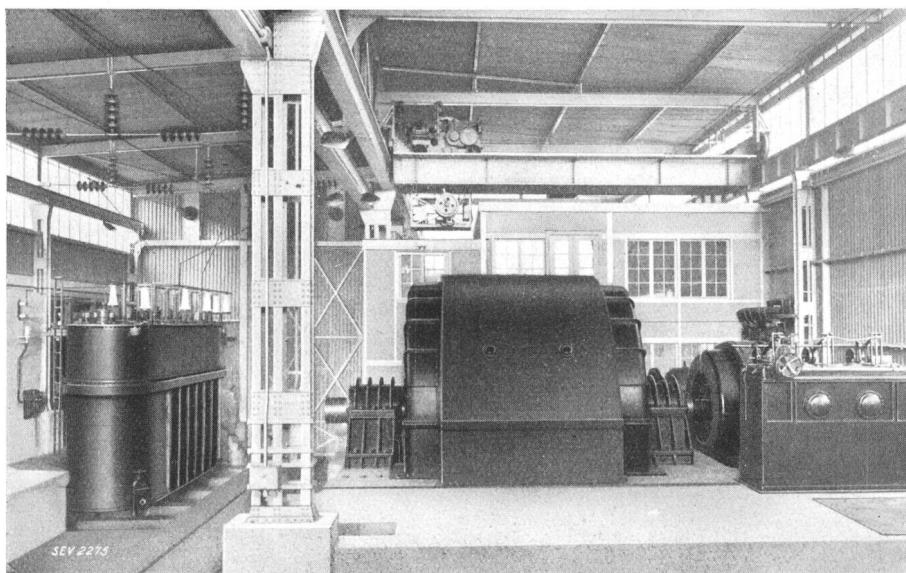


Fig. 1.
Innenansicht der Hochleistungsversuchsanlage.

genügt. Im weiteren hat man eingesehen, dass eine äusserst starke Erreger- und Dämpferwicklung auf dem Rotor von grosser Wichtigkeit ist. Diese bewirkt, dass die Kurzschlussleistung nur sehr langsam vom Anfangswert auf den Dauerwert abklingt. In einem Normalgenerator ist das Gewicht des Rotorkupfers ungefähr gleich dem des Statorkupfers, während bei der vorliegenden Maschine ein Verhältnis von rund 3,5 : 1 angewendet wurde.

Der 120 t schwere Rotor ist nach Art der Turboläufer mit glatter Ankeroberfläche gebaut. Das Schwungmoment der rotierenden Massen beträgt 550 tm², so dass bei Normaldrehzahl eine kinetische Energie von $19,3 \cdot 10^6$ mkg aufgespeichert ist.

geschenkt. Der zusammengebaute Generator mit den Verschalungen ist in Fig. 2 zu sehen. Die separat angetriebene Erregermaschine kann als Nebenschluss- oder Seriegenerator verwendet werden, wobei die Gruppe für eine weitgehende kurzzeitige Ueberlastung vorgesehen ist.

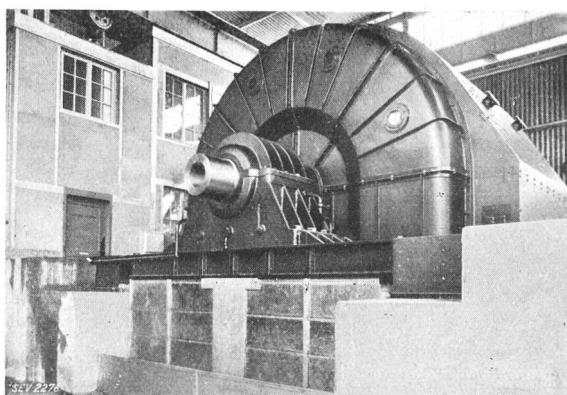


Fig. 2.
Generator mit angebauten Verschalungen.

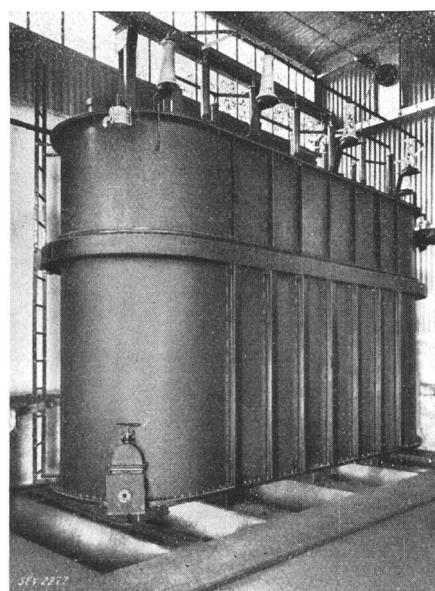


Fig. 3.
Transformator zur Erzeugung von Versuchsspannungen
bis 150 kV

Der Generator ist mit einem Asynchronmotor von 2200 kW bei 8 kV direkt gekuppelt. Der Anlauf erfolgt mit einer Leistungsaufnahme von 2000 bis 3000 kW in etwa drei Minuten. Während der Kurzschlüsse werden die gewaltigen Belastungsspitzen durch den Energieinhalt der rotierenden Massen gedeckt. Der Motor wird auch als Bremse zum raschen Stilllegen der Gruppe verwendet, da der Auslauf ohne Bremsung etwa 2½ h dauert.

Der *Transformator* (Fig. 3) hat eine Nennleistung von 85 000 kVA. Dem Verwendungszwecke gemäss konnte durch Anwendung von doppelkonzentrischen Wicklungen eine Kurzschlussspannung von nur 2,2 % erreicht werden. Die Wicklungsabstützungen und Ableitungen sind besonders sorgfältig durchgebildet worden, mit Rücksicht auf die maximal vorkommenden Ströme, die auf der Unterspannungsseite 180 000 A erreichen. Durch Umschalten der unterteilten Wicklungen kann man je nach Bedarf verschiedene Spannungen erzeugen. Die wichtigsten dreiphasigen Schaltungen gehen aus der Tabelle I hervor. Ausser diesen können einphasige Spannungen bis zu 150 kV angewendet werden. Alle Umschaltungen der Wicklungen werden über dem Deckel vorgenommen. Von den Oberspannungsklemmen führt eine durch Isolatorketten abgespannte 150-kV-Freileitung über Durchführungsstromwandler zu den Schalterprüfständen.

Schaltungsmöglichkeiten des Transformators.

Tabelle I

Oberspannungs-Wicklung		Unterspannungs-Wicklung	
Schaltung	Spannung	Schaltung	Spannung
Serie λ	87 kV	λ	11 kV
		Δ	6,4 kV
Parallel λ	43,5 kV	λ	11 kV
		Δ	6,4 kV
Serie Δ	50 kV	λ	11 kV
		Δ	6,4 kV
Parallel Δ	25 kV	λ	11 kV
		Δ	6,4 kV

Die 11-kV-Anlage umfasst in der Hauptsache einen Schalerraum und einen Satz umschaltbarer Drosselpulen. Es lassen sich folgende Schaltzustände herstellen:

1. Der Generator arbeitet direkt oder über Drosselpulen auf die Prüfstände.
2. Der Generator arbeitet direkt oder über Drosselpulen auf den Transformator.

Der Hauptschalter, ein Dreikesselölschalter mit Solenoidkontakte, ist im Stande, direkte Kurzschlüsse des Generators einzuleiten und zu unterbrechen. Die Sammelschienen werden mit Rücksicht auf die grossen elektrodynamischen Kräfte durch Querabstützungen zusammengehalten. Die Drosselpulen (Fig. 4), je drei pro Phase, dienen zur Einstellung der Kurzschlussleistung. Sie können zu diesem Zweck nach belieben in Serie oder parallel geschaltet werden.

Die verlegten *Dreiphasenkabel* werden täglich mehrere Male grossen Kurzschlussbeanspruchungen unterworfen. Aus diesem Grunde musste ihre Auswahl besonders sorgfältig erfolgen. Der Bestellung gingen eingehende Versuche mit verschiedenen Prüfstücken voraus. Es zeigte sich, dass im allgemeinen schon bei Stromstößen von 70 000 bis 80 000 A eine Verlagerung der Leiter im Kabelinnern eintritt. Die bessere Widerstandsfähigkeit wurde durch eine besondere Bandagierung und eine zweckmässige Form des Bleimantels erreicht. Zur Verkleinerung der Beanspruchung hat man

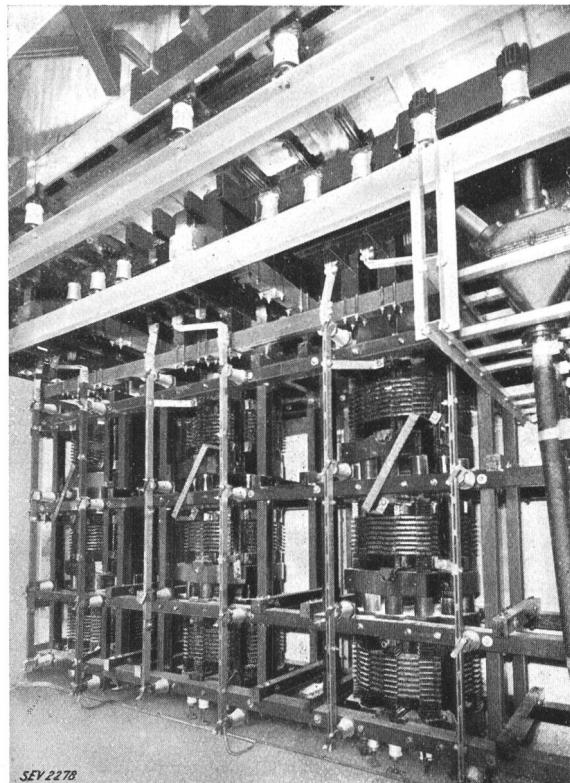


Fig. 4.
Drosselpulen zur Regulierung der Kurzschlussleistungen.

ausserdem sechs Kabel parallel mit je 3×350 mm^2 Querschnitt verlegt.

Die drei *Schalterprüfstände* (Fig. 5) werden durch offene Gruben gebildet, die in der natürlichen Böschung des Geländes angelegt sind und je einen Geleiseanschluss aufweisen. Mit Hilfe eines besonderen Transportwagens, der eine Drehscheibe trägt, können die Schalter bequem in die Geleiseanschlüsse eingefahren werden. Die Beobachtung der Versuchsstoffe geschieht in etwa 30 m Entfernung vom Kommandoraum aus. Die ankommenden 11-kV-Kabel, sowie die Mess- und Steuerleitungen sind in Eisenbetonkabinen zwischen den Prüfständen untergebracht. Das Öl wird aus einer Oeltankanlage, bestehend aus zwei Behältern mit je 16 000 l Inhalt bezogen. Eine Filtrieranlage dient zur Reinigung des verrosteten Oels.

Der grösste Teil der *Energie für den Betrieb* der Anlage wird vom 8-kV-Netz der Aargauischen

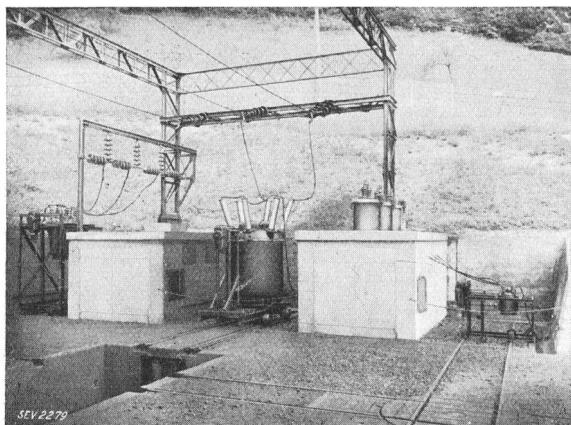


Fig. 5.
Prüfstände mit Kabelkabinen.

Elektrizitätswerke gedeckt. Ein Kabel speist die in besonderen Zellen untergebrachte 8-kV-Schaltanlage, die den Antriebsmotor von 2200 kW, sowie einen 1000-kVA-Dreiphasentransformator, 8000/380 V, mit Strom versorgt. Letzterer speist unterspannungsseitig die Motoren des Erregerumformers und andere Nebenbetriebe. Alle Schalterbetätigungen erfolgen von einem Hauptschaltpult aus, welches im Kommandoraum aufgestellt ist (Fig. 6).

Um sämtliche während der Versuche vorkommenden Erscheinungen zu erfassen, sind zahlreiche *Messeinrichtungen* notwendig. In erster Linie kommt es auf die oszillographischen Messungen an. Zu diesem Zweck sind im Kommandoraum einige Oszillographen aufgestellt (Fig. 7). Ein Kathodenstrahlzoszillograph dient zur Aufnahme besonders

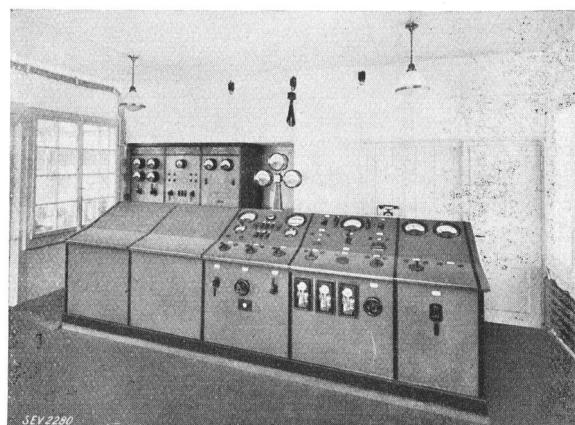


Fig. 6.
Kommandoraum mit Hauptschaltpult.

rasch verlaufender Vorgänge. Zur Messung der Kurzschlußströme werden je nach Versuchsanordnung Stromwandler oder Shunts verwendet. Bei der Durchbildung der letzteren muss sehr auf ihre Temperaturabhängigkeit geachtet werden, sowie darauf, dass sie eine gegenüber dem Widerstandswert vernachlässigbar kleine Reaktanz aufweisen. Die Messung der Spannungen erfolgt mit Spannungswandlern oder über hochohmige Spannungsteiler-Widerstände. Die Schalterarbeit kann aus den Oszillogrammen ausgewertet oder mit ballistischen Wattmetern unmittelbar gemessen werden. Sehr wichtig ist auch die Bestimmung der Kontaktbewegung während der Abschaltung. Diese Aufzeichnung geschieht unter Benützung der Oszillographen, wofür an der Schalterwelle befestigte

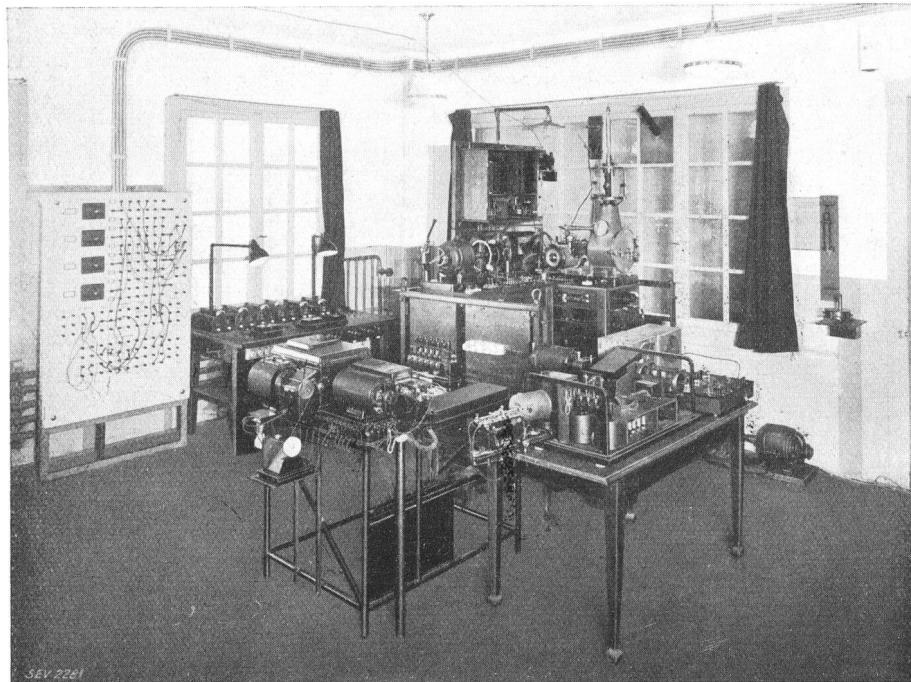


Fig. 7.
Anordnung der Oszillographen im Kommandoraum.

kollektorartig aneinander gereihte Kontakte von gegebener Breite und gegebenem Abstand Verwendung finden.

Den Druckmessungen kommt bei Schalteruntersuchungen besondere Bedeutung zu. Bei der angewandten Methode ändert der Druck durch Einwirken auf eine Membran die Reluktanz eines Eisenkreises, der durch eine Primärspule mit einem konstanten Strom von 1000 Per./s erregt wird. Dadurch ändert sich die in einer Sekundärspule induzierte Spannung. Da die Durchbiegung der Membran proportional mit dem Druck wächst, kann aus der Spannungsänderung der Sekundärspule der gesuchte Druck abgeleitet werden. Um die Methode empfindlicher zu gestalten, wird eine Kompensationsschaltung angewendet. Der Druckverlauf während des Abschaltvorganges ist durch die Umhüllungskurve sämtlicher Amplituden einer auf diese Weise oszillographisch aufgenommenen 1000periodigen Wechselspannung wiedergegeben. Die Eichung des Druckmessers erfolgt jeweils vor und nach den Versuchen mit einer Druckpumpe.

Ein sehr wertvolles Hilfsmittel zur Untersuchung von Schaltvorgängen aller Art ist die Zeitlupe. Es steht der Hochleitungsversuchsanlage ein Aufnahmegerät zur Verfügung, der bis 1500 Bilder pro Sekunde aufnehmen kann. Mit dieser Bilderfrequenz können die vorgekommenen Erscheinungen im Normalkino unter 100 bis 150facher Zeitdehnung beobachtet werden.

III. Einiges über die Prüferfahrungen.

Nachdem im ersten Abschnitt dieses Aufsatzes besprochen wurde, auf welche Grundlagen die Schaltertechnik früher angewiesen war, wird im nachfolgenden gezeigt, welche neuen Entwicklungsmöglichkeiten und Gesichtspunkte durch den ständigen Betrieb der Hochleitungsversuchsanlage erschlossen werden konnten. Die hier angegebenen Abschaltleistungen wurden nach den schweizerischen Richtlinien gerechnet. Sie ergeben sich aus dem Effektivwert des Wechselstromes im Moment der Kontaktöffnung und der wiederkehrenden Spannung nach der Unterbrechung des Kurzschlusses. Es sei noch hinzugefügt, dass die mitgeteilten Zahlen keineswegs die Grenze der Leistungsfähigkeit der Anlage bedeuten, sondern nur Abschaltleistungen darstellen, die jeweils bei den angeführten Versuchen gemessen wurden. Um dennoch ein Bild über die weitgehenden Möglichkeiten zu geben, die die Anlage bietet, möge die Angabe dienen, dass der Generator selbst ohne Uebererregung eine höchste Stromspitze von 205 000 A abgibt.

1. Vorteile der Typenprüfung an Oelschaltern.

Um den Bedürfnissen der Elektrizitätswerke nachzukommen, müssen die Konstruktionsfirmen Schalter mit immer höheren Typenleistungen auf den Markt bringen. Es wurde bereits erwähnt, wie man auf Grund von analytischen Untersuchungen die Beanspruchung eines Oelschalters vorausbestimmen kann. Ein einwandfreies Urteil über

neue Reihen ist jedoch nach den neuesten Erfahrungen erst dann möglich, wenn jede Erstausführung eingehende Prüfungen bis zu den Grenzbedingungen bestanden hat. Ausser einer Nachprüfung der Berechnung gestattet ein solches Vorgehen Mängel konstruktiver Art aufzudecken, die beim Entwurf nicht vorausgesehen werden können. Einige Beispiele mögen andeuten, welcher Art die bis jetzt begegneten Schwierigkeiten sind.

Bekanntlich sind Deckel und Befestigungsteile des Oelschalters den Schlägen des Oelkolbens ausgesetzt. Wegen der vielen vereinfachenden Annahmen, auf welchen die Berechnung aufbaut, ist es sehr schwierig, die entstehenden Beanspruchungen ohne grundlegende Versuche vorauszubestimmen.

Die Trennwände und Auskleidungen aus Isoliermaterial werden bei unzweckmässigem Material durch Druckwellen zerstört und verlieren ihre Schutzwirkung. Das geeignetste Material und der zweckmässigste Einbau für diese Teile kann nur durch Prüfung mit Hochleistung ermittelt werden.

Im weiteren ist es ohne Leistungsversuche nicht denkbar, das Abbrennen der Kontakte, das Verhalten von Dichtungen und Auspufföffnungen usw. richtig zu beurteilen.

Während der Erstversuche muss die Ausschaltgeschwindigkeit ständig kontrolliert werden, da Unregelmässigkeiten in derselben die Beanspruchung der Apparate in ungünstigem Sinne beeinflussen. Bei einem mangelhaften Schalter traten schon bei der Abschaltung von 74 000 kVA starke Hemmungen der Bewegung auf. Die Erscheinung konnte auf eine Druckdifferenz zwischen oberem und unterem Teil des Schalters zurückgeführt und durch entsprechende Massnahmen leicht und rasch behoben werden. Darauf konnte der Schalter mehrere Male 400 000 kVA ohne Störung bewältigen.

Fig. 8 zeigt das Oszillogramm einer sehr schlecht verlaufenen Abschaltung in einem anderen Oelschalter. Bald nach Beginn der Unterbrechung traten ebenfalls unzulässige Verzögerungen in der Kontaktbewegung auf. Die Ausschaltgeschwindigkeit sank rasch auf den kleinen Wert von 0,19 m/s. Ferner haben in den Zeitpunkten A und B Lichtbögen im Schalterinnern nach Erde übergeschlagen. Im Oszillogramm äussert sich letztere Erscheinung durch das plötzliche Verschwinden der Stromausschläge, da vom Augenblick des Ueberschlags an die Kurzschlußströme den Messhund nicht mehr durchflossen. Die Behebung der dem betreffenden Versuchsschalter anhaftenden Mängel war auch in diesem Falle verhältnismässig einfach. In einem Antriebskasten mussten einige Änderungen vorgenommen werden. Ferner wurden die inneren Isolierteile zweckmässiger angeordnet. Das in Fig. 9 dargestellte Oszillogramm der Abschaltung von 498 000 kVA im geänderten Schalter zeigt in eindeutiger Weise, wie ausserordentlich günstig sich die durchgeführten Verbesserungen auf das Arbeiten des Schalters auswirken.

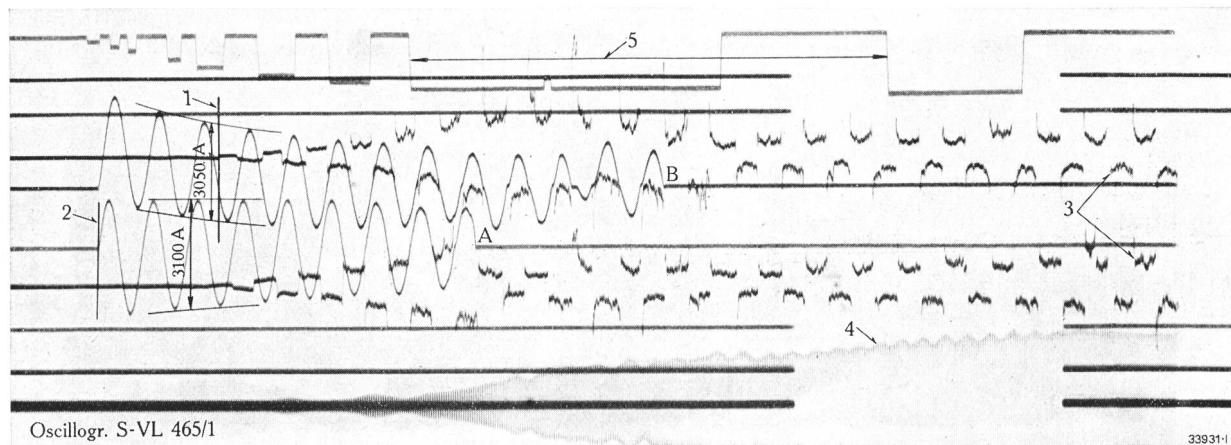


Fig. 8.

Oszillogramm einer Abschaltung in einem mit Fehlern behafteten Oelschalter.

- 1 Trennung der Kontakte.
2 Beginn des Kurzschlusses.
3 Spannungen der Stehlichtbogen im Schalterinnern.

- 4 Druckanstieg im Schalter.
5 Zeit zur Zurücklegung von 4 cm Traversenweg = 0,21 s; $v = 0,19 \text{ m/s}$.
A und B Ueberschlag des Lichtbogens im Schalterinnern auf Erde.

Wären diese Oelschaltertypen ohne vorherige Prüfung der serienmässigen Fabrikation übergeben worden, so hätten sie bei der Verwendung in den Anlagen eine grosse Gefahr für das Personal und einen sehr unangenehmen Störungsherd für den elektrischen Betrieb bedeutet. Sowohl Betriebsingenieure wie Konstrukteure hätten sich eifrig bemüht, die betreffenden Apparate in dieser oder jener Richtung zu verbessern. Es erscheint jedoch sehr fraglich, ob auf diese Weise wirklich jede schwache Stelle gefunden worden wäre. Schliesslich wäre man gezwungen gewesen, die Schalter auszubauen und durch neue zu ersetzen. Es ist nicht ausgeschlossen, dass diese letzteren die gleichen Fehler oder Fehler ähnlicher Art ebenfalls aufgewiesen und im Laufe der Zeit neue Betriebsstörungen verursacht hätten. Die Versuche in der

Hochleistungsversuchsanlage gestatteten jedoch mit Hilfe der verwendeten vielseitigen Mess- und Kontrollmöglichkeiten, vorhandene Fehler und Mängel aufzudecken und zu beheben. Dadurch konnten in kurzer Zeit aus anfänglich schlecht arbeitenden Schaltern sehr betriebssichere Typen entwickelt werden.

Die Durchführung der Prüfungen geschieht für gewöhnlich unter allmählicher Steigerung der Abschaltleistung, wobei es zweckmässig ist, die Druckbeanspruchung sowie die Lichtbogenlängen noch während den Versuchen auszuwerten. Nach der Durchführung solcher Versuche für verschiedene Betriebsspannungen ist die Arbeitsweise eines Oelschalters in seinem ganzen Anwendungsgebiet eindeutig bekannt. Das in Fig. 9 wiedergegebene Oszillogramm enthält die wichtigsten Grössen, die für die Eintragung eines einzigen Messpunktes, z. B. der Druckkurve, aufgenommen werden müssen.

Aus diesen Ausführungen kann wohl eindeutig die Schlussfolgerung gezogen werden, dass nur solche Konstruktionen, die vor der serienmässigen Herstellung die vollständige Prüfung auf ihre Abschaltleistung bestanden haben, die höchste Betriebssicherheit aufweisen.

2. Systematische Forschung an ölossen Schaltern.

Die Erfahrungen, die im Laufe der Jahre mit unrichtig bemessenen Oelschaltern gemacht wurden, haben das Interesse für ölose Schalter nie erlahmen lassen. In diesem Zusammenhang wäre zu erwähnen, dass Wasserschalter schon um die Jahrhundertwende herum praktisch verwendet, jedoch bald wieder durch Oelschalter ersetzt wurden⁵⁾. Erst in neuerer Zeit wird diesem Prinzip in Form des Expansionsschalters⁶⁾ vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt. Die ersten Angaben über Druckgasschalter sind im amerikanischen Patent 716 848 aus dem Jahre 1902 enthalten, ohne dass

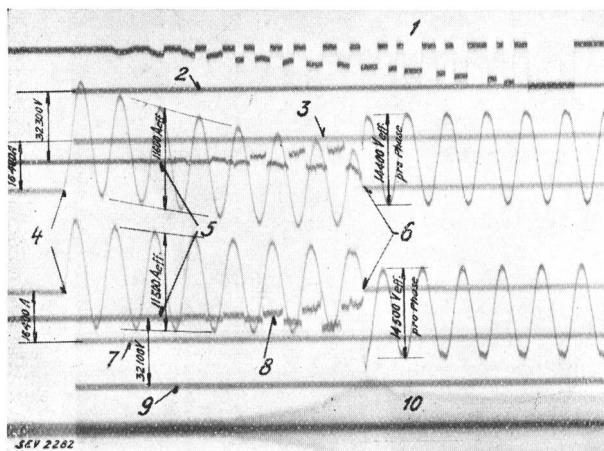


Fig. 9.

Oszillogramm einer Abschaltung von 498 000 kVA im verbesserten Oelschalter.

- 1 Ausschläge zur Bestimmung 6 Löschung des Lichtbogens der Traversenbewegung.
2 Eichlinie der Spannung, 7 Eichlinie des Stromes, Phase V.
3 Eichlinie des Stromes, Phase U. 8 Lichtbogenspannung.
4 Beginn des Kurzschlusses. 9 Eichlinie der Spannung, Phase V.
5 Trennung der Kontakte. 10 Druck im Schalter.

5) Vogelsang: loc. cit.

6) S. Bull. SEV 1931, Nr. 11, S. 254.

praktische Ausführungen des dort niedergelegten Gedankens bekannt geworden wären. Auch sind die magnetische Blasung, das Prinzip der Unterteilung auf viele Unterbrechungsstellen und der Vakuumschalter seit rund 30 Jahren bekannt.

Der Wasserschalter hat im Vergleich zum Oel-schalter den Vorteil, dass er keine brennbare Schaltflüssigkeit enthält. Die Explosionsgefahr schliesst er jedoch nicht aus, da beim Versagen durch einen Stehlichtbogen unter Umständen Dampf in solcher Menge erzeugt wird, dass ein Zersprengen der Schalterteile die Folge sein kann. Demgegenüber arbeitet der Pressluftschalter⁷⁾ mit einem gegebenen, nicht überschreitbaren Betriebsdruck. Der Nachteil dieser Schalterart besteht aber darin, dass seine Arbeitsweise von einer Druckluftversorgungsanlage abhängt. Oellose Schalter, die nach dem Prinzip der magnetischen Beeinflussung des Lichtbogens gebaut sind, erreichen den gleichen Grad der steten Betriebsbereitschaft wie der Oel- und auch der Wasserschalter, ausserdem sind sie nicht explosionsgefährlich und enthalten nur wenig brennbare Bestandteile. Aus isoliertechnischen Gründen ist jedoch ihre praktische Verwendung für höhere Spannungen nicht mehr möglich. Der Vakuumschalter⁸⁾ stellt schalttechnisch eine ideale Lösung dar, da die Schalterarbeit nur äusserst kleine Werte annimmt. Für einwandfreies Arbeiten ist aber ein sehr hohes Vakuum notwendig, das mit praktisch verwendbaren Mitteln nur schwer erreicht und dauernd aufrechterhalten werden kann.

Bereits im Jahre 1922 wurde im Versuchsräum der A.-G. Brown, Boveri & Cie. ein Pressluftschalter erstmalig mit Erfolg gebaut und ausprobiert⁹⁾. Die damals für Versuche zur Verfügung stehende Leistung betrug 15 000 kVA (einphasig) bei 8 kV. Der Schalter bestand aus einem rohrförmigen beweglichen Kontakt und einem feststehenden Kontaktstift. Die Löschung des Lichtbogens erfolgte unter Einwirkung eines kräftigen Luftstrahles, der während der Schaltung vom Innern durch den Hohlkontakt ins Freie austrat. Die erzielten Resultate waren vielversprechend, so dass die Forschungsarbeiten an diesem Schalter, unter Beachtung der gleichen Grundidee, nach der Inbetriebnahme der Hochleistungsversuchsanlage mit höheren Leistungen von neuem aufgenommen wurden. In Fig. 10 ist ein Versuchs-Pressgasschalter dargestellt. An diesem können alle die Abschaltung beeinflussenden Faktoren, wie Abmessung, Form und Material der Kontakte, Öffnungswege, Auspuffverhältnisse usw. in einfacher Weise verändert werden. Auf solche Art kann diejenige günstigste Anordnung gefunden werden, die die höchste Abschaltleistung ohne Stehlichtbogenbildung ergibt. Das Pressgas wird in einer besonderen Anlage erzeugt, wobei Drücke bis zu 20 kg/cm² eingestellt werden können. Es hat sich bei diesen Versuchen

gezeigt, dass die abschaltbare Leistung in sehr weitgehendem Masse vom Druck abhängt. Interessieren dürfte auch die Feststellung, dass bei gegebenem Druck die mit einem gegebenen Schalter zu bewältigende Abschaltleistung bei Bahnfrequenz (16 $\frac{2}{3}$ Per./s) höher ist, als bei industrieller Frequenz.

In ebenso systematischer Weise werden Wasserschalter erforscht. Die Abschaltung vollzieht sich in einer geschlossenen Kammer, aus welcher der Kontaktstift herausgezogen wird. Der entstehende Dampf wirkt entionisierend auf den Lichtbogen ein und pufft nach oder während der Schaltung in einen Expansionsraum aus. Als Schaltflüssigkeit

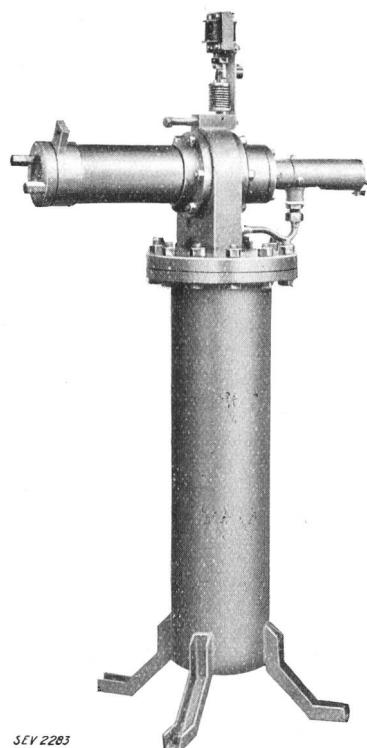


Fig. 10.
Pressgas-Experimentierschalter.

wird Wasser mit Zusätzen verwendet. Wichtig ist beim Wasserschalter, wie bei allen Druckkammer-schaltern, die richtige Bemessung der Auspuffdüse. Die Lichtbogendauer wird in dieser Schaltart um so kleiner, je grösser der Strom ist und erreicht bei grossen Abschaltströmen eine bis zwei Perioden. Der Löschung von sehr kleinen Strömen muss besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Beim Schalten von grossen Leistungen entstehen in den Kammern hohe Drücke, welche die Kammern selbst sowie die übrigen Schalterteile mechanisch äusserst stark beanspruchen. Durch den zweckmässigen Einbau von Entlastungsventilen kann eine Verminderung der Drücke erzielt werden. Die Begrenzung darf jedoch nicht so weit getrieben sein, dass die Löschwirkung des Schalters herabgesetzt wird oder sogar ausbleibt. Fig. 11

⁷⁾ S. Bull. SEV 1929, Nr. 18, S. 632.

⁸⁾ S. Seite 622.

⁹⁾ Brown-Boveri-Mitteilungen 1930, S. 63.

und 12 stellen versuchsbereite, dreipolige Wasserschalter für 10 kV dar. Unten sind die drei Druckkammern mit Expansionsräumen, oben die Antriebsteile ersichtlich. Fig. 13 zeigt das Oszillogramm der Abschaltung von 225 000 kVA durch den Schalter Fig. 12.

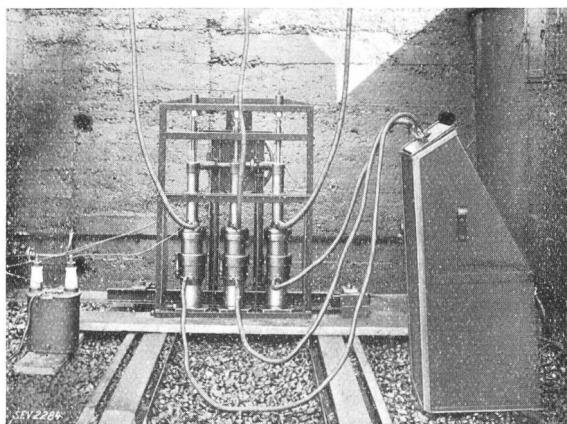


Fig. 11.
Dreipoliger Wasserschalter im Prüfstand.

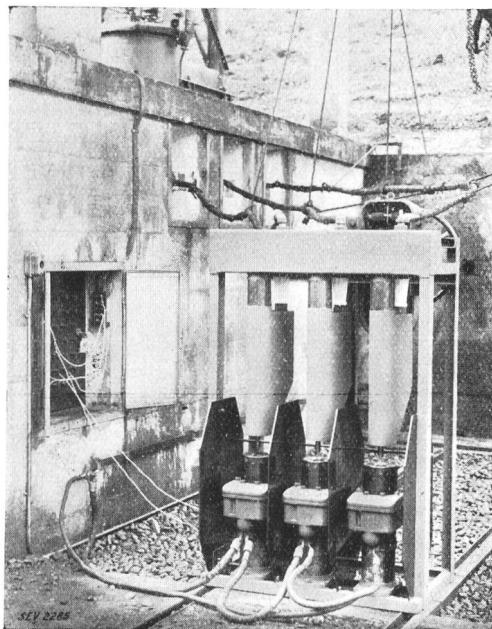


Fig. 12.
Versuchsbereiter 10-kV-Wasserschalter.

Die bis jetzt gewonnenen Erkenntnisse mit diesen Schalterarten lehren, dass es gerade auf diesem Gebiete besonders wichtig, ja unumgänglich ist, weitgehende Forschungen mit möglichst hohen Leistungen durchzuführen. Ohne solche setzt man sich von Anfang an der Gefahr aus, einen ähnlichen Entwicklungsgang wie beim Oelschalter durchzumachen, gekennzeichnet durch jahrelanges Tasten nach sicher arbeitenden Konstruktionen. Der eingeschlagene Weg rechtfertigt sich um so mehr durch die Tatsache, dass die besprochenen

Mittel es heute ermöglichen, vollständig erprobte Oelschalter auf den Markt zu bringen.

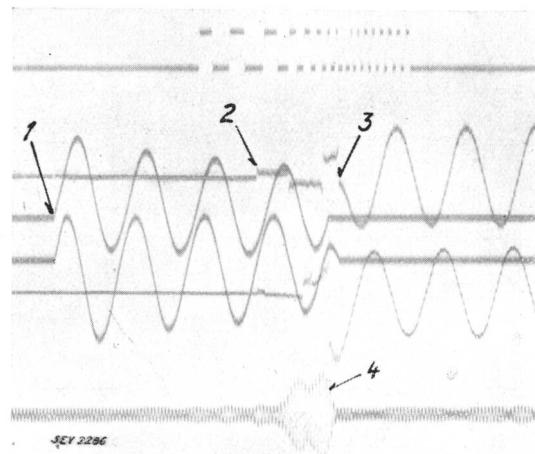


Fig. 13.
Oszillogramm der Abschaltung von 225 000 kVA im Schalter der Fig. 12.

- 1 Beginn des Kurzschlusses.
- 2 Beginn der Unterbrechung, Abschaltstrom 12 850 A.
- 3 Ende der Unterbrechung, Abschaltspannung 10 100 V.
- 4 Druckverlauf in der Kammer, Maximaldruck 40 kg/cm².

3. Die Beanspruchung der Schalter in Netzen.

Es ist eine von Fachleuten schon oft beobachtete Tatsache, dass Oelschalter, die an Netzknotenpunkten zu schalten haben, trotz höchster Leis-

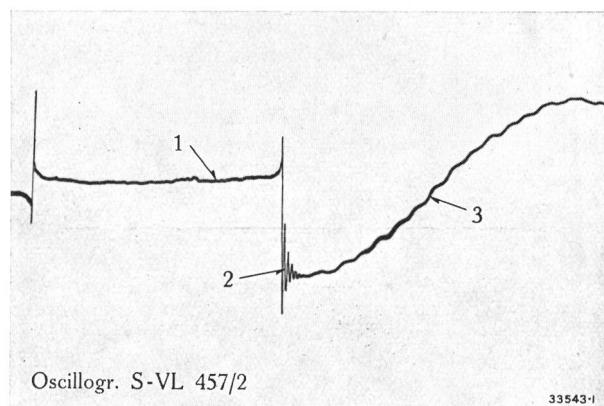


Fig. 14.
Kathodenstrahl-Oszillogramm einer Abschaltung.
1 Lichtbogenspannung vor dem Löschen.
2 Überlagerte Schwingungen.
3 Wiederkehrende Spannung $f = 50$.

stungsbeanspruchung besser arbeiten als solche, die Kurzschlüsse in der Nähe der Sammelschienen einzelner Kraftwerke unterbrechen müssen. Die Ursache dieser Erscheinung liegt im verschiedenen Aufbau der wiederkehrenden Spannung nach dem Kurzschluss¹⁰⁾. Diese Spannung kann nicht sofort

¹⁰⁾ J. Kopeliowitsch, Bull. SEV 1928, Nr. 17, S. 541; Bull. SEV 1931, Nr. 13, S. 312; «Electra» Revue mensuelle de la Conférence Internationale des Grands Réseaux Paris 1931, Nr. 1; R. H. Park and W. F. Skeats, Trans. AIEE 1931, p. 204; R. M. Spurck and H. E. Strang, Trans. AIEE 1931, p. 513; H. Gubler, VDE-Fachberichte 1931.

den Scheitelwert annehmen, sondern sie wird sich infolge der vorhandenen Netzkapazität auf diesen Wert einschwingen, wobei Spannungserhöhungen über den Normalwert hinaus entstehen. Das in Fig. 14 wiedergegebene Kathodenstrahlzosillogramm zeigt den Verlauf der Spannung während und nach einer Kurzschlussabschaltung. Wie man ersieht, tritt die Spannungsbeanspruchung der Lichtbogenstrecke mit einer Zeitverzögerung auf, welche um so grösser wird, je kleiner die Eigenfrequenz des Netzes ist. Während dieser Zeitspanne werden die heissen Lichtbogengase entionisiert; je mehr die Entionisierung fortgeschritten ist, um so grössere Spannungen sind notwendig, um ein Wiederzünden einzuleiten.

In Oelschaltern wird die Beeinflussung des Abschaltvorganges besonders ausgesprochen, wenn die Eigenfrequenz weniger als 1000 Per./s ist. In weit-ausgedehnten Hochspannungsnetzen wird diese Frequenz nicht nur erreicht, sondern meistens unterschritten. Demgegenüber weist die Hochleistungsversuchsanlage Eigenfrequenzen bis 25 000 Per./s auf. Diese verhältnismässig hohen Zahlen haben ihre Ursache in der Verwendung von sehr kurzen Leitungen einerseits und in den kleinen Streuinduktivitäten von Generator und Transfomator anderseits. Unter solchen Umständen erreichen die Abschaltlichtbogen eine in den Netzen nur selten zu erwartende Länge oder Dauer. Die Folge davon ist, dass auch die während der Abschaltung entwickelte Gasmenge und der damit im Zusammenhang stehende Druck im Schalter die denkbar ungünstigsten Werte annehmen. Oelschalter, die auf Grund von Versuchen in der Hoch-

leistungsversuchsanlage durchentwickelt wurden, weisen somit einen Oeffnungsweg der Kontakte sowie eine Druckfestigkeit auf, welche bei den späteren Beanspruchungen nie voll ausgenutzt werden.

Aehnlich liegen die Verhältnisse bei den öllosen Schaltern. Auch diese Apparate arbeiten in der Hochleistungsversuchsanlage viel ungünstiger als an ihrem nachherigen Aufstellungsort in den Netzen. So stieg z. B. die Abschaltfähigkeit eines Druckluftschalters auf das 2,6fache, als durch Zuschalten von Kondensatoren parallel zu den Kontakten die Eigenfrequenz der Anlage von 18 600 Per./s auf 7200 Per./s vermindert wurde. Die verwendete Kapazität der Kondensatoren entsprach derjenigen einer etwa nur 10 km langen Freileitung.

Ein weiterer, die Abschaltung im Betrieb begünstigender Einfluss ist das Vorhandensein der Netzlast. Diese hat eine ähnliche Wirkung wie die früher viel verwendeten niederohmigen Stufenwiderstände zur Verminderung der Oelschalterbeanspruchungen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Abschaltungen in der Hochleistungsversuchsanlage die schärfsten Anforderungen an die Apparate stellen. Diese Prüfung kann somit als das vollwertigste Kriterium über die Zuverlässigkeit eines Schalters bezeichnet werden. Der angeführte günstige Einfluss der Netzkapazität und der Belastung auf den Abschaltvorgang stellt für den Betriebsleiter eine wesentliche zusätzliche, von Fall zu Fall wechselnde Sicherheit dar.

Vakuumschalter.

Von K. A. Wiedemann, Dipl.Ing., Berlin.

621.316.512.064.24

Der Autor gibt einen Ueberblick über die Entwicklung der Vakuumschalter, das sind Schalter, welche den Strom in Vakua von 10^{-4} bis 10^{-6} mm Hg unterbrechen, wobei er anhand der Patentschriften besonders auch die bekanntgegebenen konstruktiven Einzelheiten berücksichtigt.

L'auteur donne un aperçu sur le développement des interrupteurs dans le vide, c'est-à-dire des appareils qui coupent le courant dans le vide de 10^{-4} à 10^{-6} mm de mercure, en tenant particulièrement compte des détails de construction publiés dans les exposés d'invention des brevets récents.

Zur Verringerung bzw. Unterdrückung des Schaltfeuers an Kontakten kommen im wesentlichen Vergrösserung der Schaltgeschwindigkeit, Anordnung der Kontakte in Medien, die das Entstehen des Schaltfeuers erschweren, sowie Verwendung besonderer Kontaktmaterialien in Frage. Diese Massnahmen dienen zur Verhinderung der Ionisation der Schaltstrecke. Durch Anordnung der Kontakte in indifferenten Gasen oder in hohem Vakuum wird überdies eine Oxydation der Kontakte verhindert. Schon 1923 wurde von den Siemens-Schuckert-Werken angegeben, dass statt der gebräuchlichen Wolframkontakte auch andere Metalle verwendbar seien, sofern sie einen hohen Schmelzpunkt und niederen Dampfdruck aufweisen. Die erste Forderung ist bedingt durch die freiwerdende Wärme des Oeffnungslichtbogens, die bei

Vakuumschaltern nicht oder nur zum geringen Teil abgeleitet wird. Niederer Dampfdruck des Kontaktmaterials ist erforderlich, um bei dem äusserst niederen Absolutdruck des die Kontakte umgebenden Vakuums ein Verdampfen der erwärmten Kontaktteile zu verhindern, da der Metalldampf zu einer Ionisation der Schaltstrecke und weiter zu einem den Schalter zerstörenden Stehlichtbogen führen würde.

Durch Versuche der Birka A. B. in Stockholm wurde gefunden, dass durch in das Vakuum eingebrachte Phosphor- oder Chlorverbindungen eine Bindung der beim Schaltfunken freiwerdenden Elektronen durch die Halogene erfolgt, so dass hierdurch ein stabiler Zustand im Vakuum entstehe. Im übrigen ist die Einbringung von Halogenverbindungen in die Kolben bei der Glühlampen-