Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 47 (1956)

Heft: 8

Artikel: Nachstrom und Restleitfähigkeit in Leistungsschaltern

Autor: Baltensperger, P. / Schmid, P.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060088

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. Siehe Rechtliche Hinweise.

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. Voir Informations légales.

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. See Legal notice.

Download PDF: 16.05.2025

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

Nachstrom und Restleitfähigkeit in Leistungsschaltern

Von *P. Baltensperger*, Unterengstringen (ZH) und *P. Schmid*, Wettingen (AG)

621.316.57.064.2

An einem Kesselölschalter, einem ölarmen Schalter und einem Druckluftschalter, alle für 10 kV Nennspannung, wurden Nachströme und Restleitfähigkeiten der Schaltstrecken nach der Ausschaltung induktiver Ströme gemessen. Der Nachstrom streute bei den Ölschaltern in weiten Grenzen, während er beim Druckluftschalter sehr klein war. Ein dämpfender Einfluss der Restleitfähigkeit auf die nach Kurzschlußausschaltungen wiederkehrende Spannung ist bei Eigenfrequenzen unterhalb 5000 Hz bei keinem der geprüften Schaltertypen mit Sicherheit vorhanden.

Des mesures ont été effectuées pour déterminer le courant et la conductibilité post-arc lors de coupures de courants inductifs par un disjoncteur à cuve d'huile, un disjoncteur à faible volume d'huile et un disjoncteur pneumatique, tous construits pour la tension nominale de 10 kV. Tandis que les valeurs du courant post-arc relatives aux disjoncteurs dans l'huile accusent une très grande dispersion, celles mesurées dans le disjoncteur pneumatique sont très faibles. Pour aucun des types de disjoncteurs et pour les fréquences propres inférieures à 5000 Hz, on ne pouvait pas déceler avec certitude une influence de la conductibilité post-arc sur la tension transitoire de rétablissement.

Einleitung

Ein idealer Wechselstrom-Schalter stellt beim Ausschalten vor dem Stromnulldurchgang einen idealen Kurzschluss dar und hat nach dem Stromnulldurchgang sofort einen unendlich grossen Widerstand. Solche ideale Schalter gibt es aber nicht. Denn jeder Leistungsschalter erzeugt bei der Kontakttrennung einen Lichtbogen und besitzt nach der Löschung des Lichtbogens infolge der noch bestehenden Ionisierung der Schaltstrecke eine Restleitfähigkeit, welche beim Ansteigen der transitorischen wiederkehrenden Spannung einen Stromfluss, den sog. Nachstrom bewirkt. Der vorliegende Aufsatz berichtet über im Hochleistungs-Versuchslokal der A.-G. Brown, Boveri & Cie. durchgeführte Messungen von Nachstrom und Restleitfähigkeit, bei 1poligen Ausschaltungen.

I. Messeinrichtung

Die Mess-Apparatur muss den Nachstrom, welcher Bruchteile eines Ampère betragen kann, exakt messen können, ohne dass eine Beeinflussung durch den in der vorangegangenen Halbwelle geflossenen grossen Strom von beispielsweise 20 000 A stattfindet. Diese strenge Forderung machte eine Reihe besonderer Massnahmen nötig, die wir nachstehend erwähnen.

Der *prinzipielle Aufbau* der Messeinrichtung ist in Fig. 1 dargestellt. Der Schalterstrom wird durch einen induktionsarmen Shunt *S* gemessen, indem die Shuntspannung durch einen Verstärker *V* vergrössert, und zu einem Kathodenstrahloszillographen K_1 geführt wird. Die Spannung über der Schaltstrecke *D* wird mittels eines kapazitiven Spannungsteilers *T* und des Kathodenstrahloszillographen K_2 gemessen.

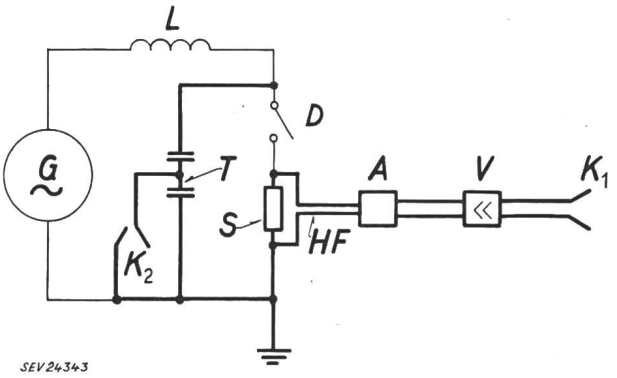


Fig. 1
Prinzipschema der Messeinrichtung
G Hochleistungsgenerator; *L* Strombegrenzungsdrosselspulen; *D* Versuchsschalter; *S* Rohrshunt; *HF* Hochfrequenzkabel; *A* Amplitudenbegrenzer; *V* Verstärker; K_1, K_2 Kathodenstrahloszillograph; *T* kapazitiver Spannungsteiler

Der *Shunt S* muss vor der Abschaltung beispielsweise einen Kurzschlußstrom von 20 kA während 0,1 s ohne Änderung seiner Messeigenschaften aushalten können. Um die dabei entwickelte Wärmemenge nicht unnötig gross werden zu lassen, wurde ein kleiner Widerstandswert gewählt. Anderseits musste aber die Induktivität des Shunt sehr klein sein, um nicht eine Phasenverschiebung zwischen Shuntspannung und Shuntstrom, d. h. Schalterstrom, zu erzeugen, wodurch unter Umständen ein nicht existierender Nachstrom oszillographiert würde. Die obigen beiden Bedingungen führten zum Bau eines Rohrshunts mit einem Widerstandswert von 0,00124 Ω und einer Induktivität von $1{,}3 \cdot 10^{-9}$ H, wie er in Fig. 2 dargestellt ist. Für Abschaltströme unterhalb 500 A wurde ein Shunt höheren Widerstandes verwendet.

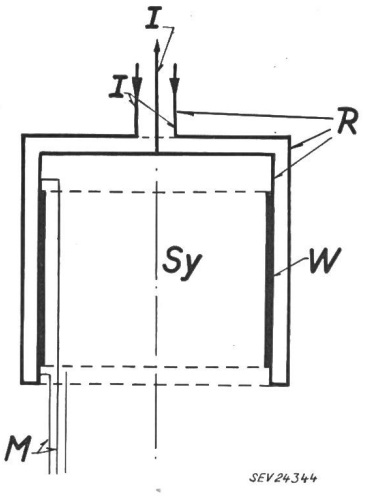


Fig. 2
Rohrshunt
I Strom; *M* Messekabel; *Sy* Symmetrieachse; *W* Widerstandsmaterial; *R* Kupferrohr

Der *Verstärker* hatte die Shuntspannung (z. B. 1,24 mV bei 1 A) auf eine für den Kathodenstrahloszillographen passende Spannung (z. B. 30 V) zu verstärken. Es wurde ein Gleichstromverstärker mit einem Verstärkungsgrad von 5000...50 000 und einer Zeitkonstanten von $0{,}5 \cdot 10^{-6}$ s verwendet. Die Eingangsspannung des Verstärkers durfte auch wäh-

rend des Strom-Maximums nicht mehr als 0,2 V betragen, weil sonst die Nullposition des Kathodenstrahles abwanderte. Da aber die am Shunt erzeugte Spannung während der betriebsfrequenten Halbwelle des Kurzschlußstromes viel grösser ist, wurde dem Verstärker ein besonderer *Amplitudenbegrenzer* vorgeschaltet. Dieser musste eine genügend kleine Ansprechzeit haben, und es wurde darauf geachtet, dass er z. B. nicht durch Eigenschwingungen die Messung verfälschte. Die Nullpunktstabilität des Verstärkers konnte durch Verwendung stabilisierter Anodenspannungen und Heizspannungen von Batterien soweit verbessert werden, dass eine stündliche Nachregelung genügte. Die Ausgangsspannung des Verstärkers war nicht im ganzen Messbereich proportional zur Eingangsspannung, d. h. zum Shuntstrom, wie eine Eichkurve Fig. 3 zeigt. Wie man dort sieht, hatte der Verstärker bis zu einem Momentanwert von ca. 20 A eine lineare Charakteristik, was für die vorliegenden Messungen genügte.

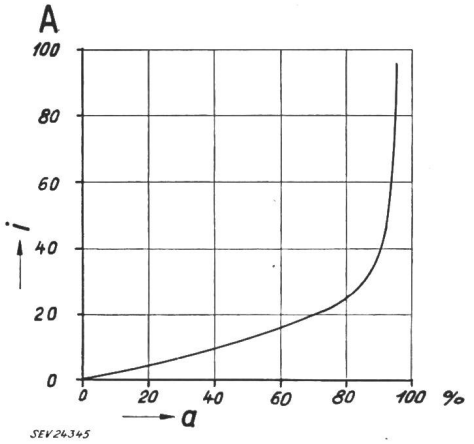


Fig. 3
Eichkurve des Verstärkers
i Momentanwert des Eingangsstromes (Shuntstrom);
a Amplitude

Die Messeinrichtung wurde durch zahlreiche Detailkontrollen geprüft. Eine dieser Kontrollen bestand z. B. darin, mittels des aus dem gemessenen Reststrom bestimmten Widerstandes der Schaltstrecke die Dämpfung der wiederkehrenden Spannung zu berechnen, und mit dem gemessenen Spannungsverlauf zu vergleichen. Wir werden später auf diesen Fall zurückkommen.

II. Messresultate

Der Nachstrom wurde an folgenden Schaltern gemessen:

A) Kesselölschalter klassischer Bauart: Nennspannung 10 kV, Nennausschaltvermögen 80 MVA;

B) Ölarmer Schalter: Nennspannung 10 kV, Nennausschaltvermögen 250 MVA;

C) Druckluftschalter (ohne Widerstand): Nennspannung 10 kV, Ausschaltvermögen 200 MVA.

In Fig. 4 sind einige mit dem Kesselölschalter erhaltene Kathodenstrahloszillogramme des Nachstromes und der zugehörigen Schalterspannung wiedergegeben. Die ausgeschalteten Ströme betrugen ca. 100 A, 800 A, 4300 A. Analog gibt Fig. 5 Oszillogramme des ölarmen Schalters, und Fig. 6 des Druckluftschalters wieder.

Die Figuren 7, 8, 9 vermitteln Darstellungen des Nachstromes und der Nachstromdauer, in Abhängigkeit des ausgeschalteten Stromes, getrennt nach den drei oben genannten Schaltertypen. Unter Dauer verstehen wir dabei die Zeit zwischen dem Verlöschen des Lichtbogens und dem Zeitpunkt, wo der Nachstrom zum letzten Mal 10 % seines Maximalwertes unterschreitet.

Ferner zeigen die Figuren 10, 11, 12 zeitliche Verläufe der Widerstandswerte der Schaltstrecke.

III. Diskussion der Resultate

1. Der zeitliche Verlauf des Nachstromes und der wiederkehrenden Spannung sei am Beispiel des Oszillogrammes Fig. 4B besprochen. Dieses stellt eine Abschaltung von effektiv 800 A induktiv bei effektiv 5,7 kV mit einem Kesselölschalter dar. *X*-1 bedeutet den Strom- bzw. Spannungsverlauf beim vorletzten, und *X* beim letzten Stromnulldurchgang. Bei diesem verlöscht zur Zeit *a* der Lichtbogen. Der Schalterstrom sinkt dann rasch auf ca. 6 A ab, und der Hauptstrom fliesst von diesem Moment an durch die Kapazität parallel zum Schalter. Die Spannung über dem Schalter steigt somit an, erreicht zur Zeit *b* das Maximum, wird zur Zeit *c* null und schwingt nachher in Form einer gedämpften Schwingung um den Scheitelwert der Phasenspannung. Der Nachstrom nähert sich zwischen *b* und *c* langsam dem Wert null. Er bleibt dann praktisch null bis zur Zeit *d*, wo die Spannung 3 kV erreicht hat, nimmt hierauf mit wachsender Spannung zu und erreicht sein Maximum von 18 A bei *e* etwas nach dem Maximum der wiederkehrenden Spannung. Nach einem Minimum *f* und einem 2. Maximum *g*, die ungefähr mit dem Minimum bzw. Maximum der Schwingung der wiederkehrenden Spannung zusammenfallen, nähert sich der Nachstrom langsam dem Wert 0. (Nach 1 ms beträgt er noch 1 A.)

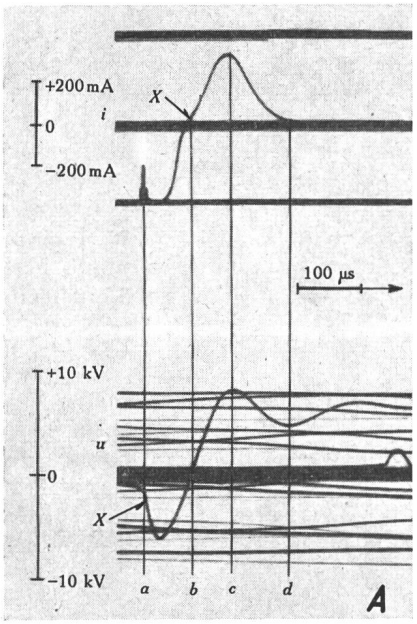
Das soeben beschriebene Oszillogramm stellt eine Abschaltung mit verhältnismässig grossem und lange dauerndem Nachstrom dar, d. h. es entspricht in Fig. 10 einer flachen Kurve. In dieser Figur erkennt man im Prinzip 2 typische Kurvenscharen:

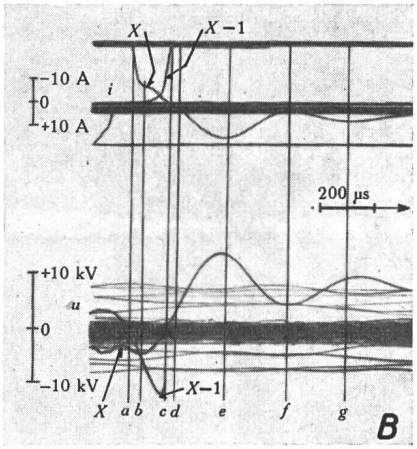
a) die Kurven mit hohem Widerstandswert im Nulldurchgang ($t = 0$) und

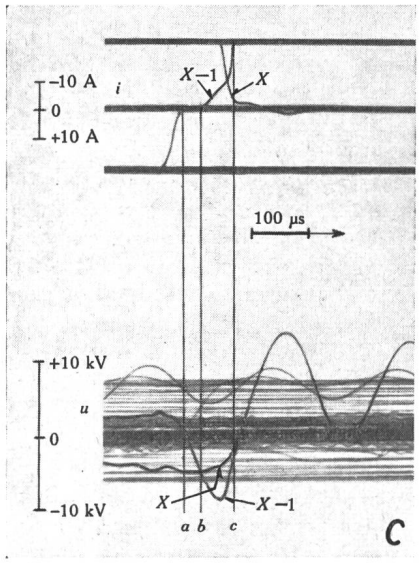
b) die flachen Kurven.

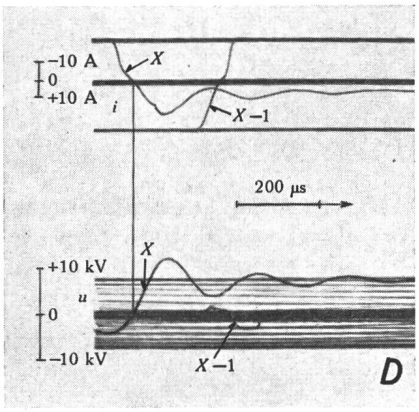
Die Kurven der ersten Schar zeigen im Stromnulldurchgang ein ausgesprochenes Maximum; der Widerstandswert sinkt dann nach ca. 0,1...0,2 ms auf ein Minimum von einigen kΩ, um nachher rasch anzusteigen. Dieses Minimum tritt meistens etwas später als das Maximum der wiederkehrenden Spannung auf. Die Streuung der Zeiten, bei welchen das Maximum auftritt, rührt von den verschiedenen Eigenfrequenzen der wiederkehrenden Spannung her. Die flachen Kurven haben im Nulldurchgang nur ein schwaches Maximum und anschliessend nur ein unbedeutendes Minimum. Der Verlauf dieser

Kurven ist ziemlich unregelmässig und der Anstieg sehr langsam (nach 1 ms ca. 2...4 kΩ).









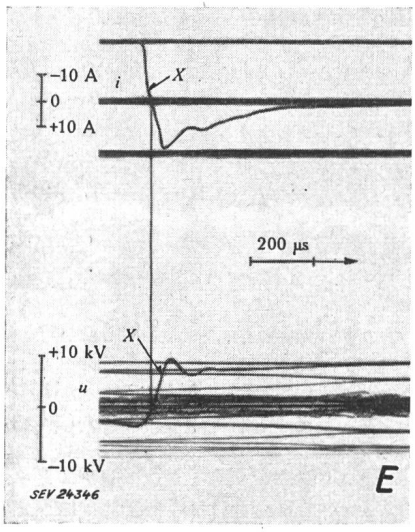


Fig. 4
Kathodenstrahloszillogramme des Nachstromes *i* und der zugehörigen Schalterspannung *u* eines Kesselölschalters

Nennspannung 10 kV
Ausschaltvermögen 80 MVA
1polige Ausschaltung bei 5,7 kV
C, D, E ausgeschalteter Strom, ca. 4300 A
A ausgeschalteter Strom, ca. 100 A
B ausgeschalteter Strom, ca. 800 A
X-1 vorletzter Nulldurchgang
X letzter Nulldurchgang

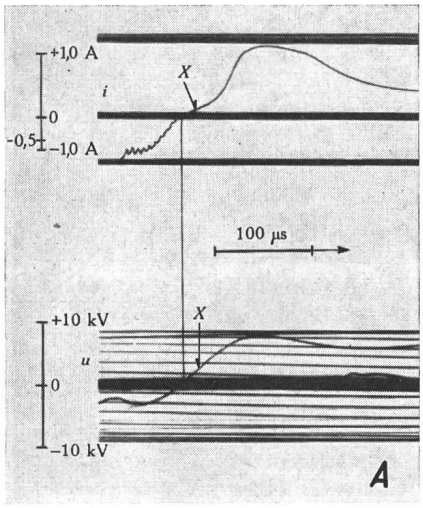
Die im Strom-Oszillogramm zu oberst und zu unterst sichtbaren horizontalen Linien sind durch den Amplitudenbegrenzer bedingt, welcher jede durch den Schalterstrom bedingte Shuntspannung von einer gewissen Grösse an «abschneidet». Der Bereich zwischen diesen beiden Linien ist so gewählt, dass der uns interessierende Verlauf des Strom-Nulldurchganges in vernünftiger Grösse oszillographiert werden konnte. Die Nullinie des den Strom aufzeichnenden Kathodenstrahles konnte zwischen den beiden Grenzlinien des Amplitudenbegrenzers verschoben, d. h. in beliebiger Position fixiert werden.

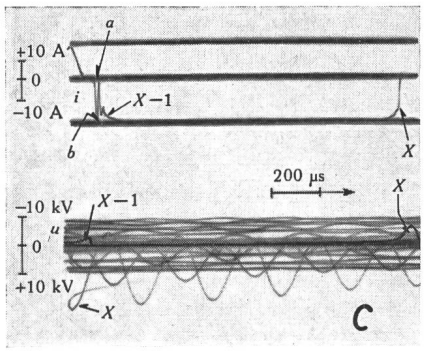
Der ölarme Schalter zeigt schon wesentlich steilere Widerstandskurven (Fig. 11), und der Druckluftschalter überhaupt kein Maximum mit nachfolgendem Absinken des Widerstandes nach dem Nulldurchgang mehr (Fig. 12), d. h. die Widerstandskurve steigt nach dem Nulldurchgang rapid und stetig an. Man sieht daraus, dass beim Druckluftschalter die Entionisation am raschesten und zuverlässigsten erfolgt.

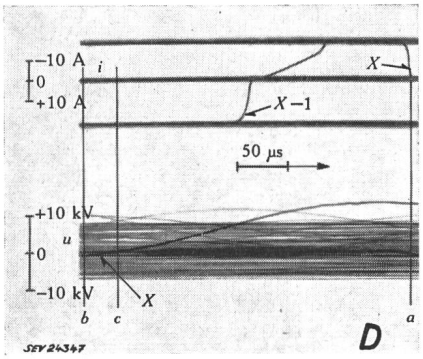
2. Die Grösse des Nachstromes variierte beim Kesselölschalter zwischen 0 und einem Scheitelwert von 24 A und die Dauer des Nachstromes zwischen 0 und $0{,}9 \cdot 10^{-3}$ s (siehe Fig. 7). Diese Variation trat praktisch im ganzen Gebiet des ausgeschalteten Stromes auf. Dabei liess sich keine besondere Gesetzmässigkeit feststellen. Es zeigte sich jedoch, dass im allgemeinen bei «schweren» Ausschaltungen, d. h. bei langen Lichtbogendauern der Nachstrom sehr gering war, während die grössten Nachströme bei leichten Schaltungen, d. h. bei kurzen Lichtbogendauern, auftraten. Dies ist erklärlich, da bei schweren Schaltungen mehr Druck in der Öl-Schaltkammer erzeugt wird, und somit die Entionisation rascher vor sich geht. Daraus ist zu schliessen, dass gerade bei schweren Schaltungen und normalen Eigenfrequenzen von z. B. 3000 Hz keine wesentliche Dämpfung der wiederkehrenden Spannung durch den Nachstrom zu erwarten ist. Da überdies der Widerstand der Schaltstrecke bei schweren Schaltungen und auch bei fast allen leichten Schaltungen nicht kleiner als 600 Ω war, lässt sich leicht ausrechnen, dass erst bei sehr hohen Eigenfrequenzen eine wesentliche Dämpfung der wiederkehrenden Spannung durch die Restleitfähigkeit zu erwarten ist. Als Beispiel kann erwähnt werden, dass bei einer Betriebspannung von 10 kV und einer Ausschaltleistung von 200 MVA der Restwiderstand von 600 Ω von ca. 30 000 Hz an aufwärts erst wirksam dämpft.

Beim ölarmen Schalter war die Streuung des Nachstromes kleiner als beim Kesselölschalter (Fig. 8). Man beachte, dass bei den kleinen Ausschaltströmen von z. B. 100 A sowohl der Nachstrom als auch seine Dauer verhältnismässig gross

waren, was mit dem kleinen Druck in der Schaltkammer bzw. mit der geringen entionisierenden Wirkung bei diesen Strömen erklärt werden kann. Diese relativ grosse Restleitfähigkeit genügt aber anderseits nicht, um die beim Ausschalten kleiner induktiver Ströme entstehenden mittelfrequent ansteigenden Spannungen bzw. Überspannungen wirksam zu dämpfen.







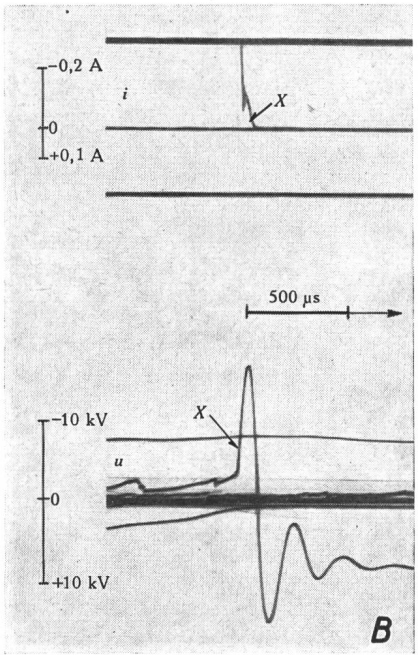


Fig. 5
Kathodenstrahloszillogramme des Nachstromes i und der zugehörigen Schalterspannung u eines ölarmen Schalters

Nennspannung 10 kV
Ausschaltvermögen 250 MVA
1polige Ausschaltung bei 5,7 kV

A, B ausgeschalteter Strom, ca. 100 A
C ausgeschalteter Strom, ca. 800 A
D ausgeschalteter Strom, ca. 10 000 A
X-1 vorletzter Nulldurchgang
X letzter Nulldurchgang

Beim Druckluftschalter wurden nur sehr kleine Nachströme (max. 2 A) von äusserst kurzer Dauer gemessen, die teilweise schwer auszuwerten waren. Die Messungen lassen dabei eine lineare Abhängigkeit des grösstmöglichen Nachstromes in Funktion des Ausschaltstromes vermuten. Da hier der Druck und die Strömung des Löschmittels stets gleich sind, ist diese Beobachtung erklärlich, wenn man annimmt, dass die Ionisierung in der Schaltstrecke mit zunehmendem Ausschaltstrom zunimmt. Es erscheint paradox, dass in Fig. 9b die Nachstromdauern bei kleinen Ausschaltströmen viel grösser sind als bei grossen. Man kann jedoch diese Zeiten nicht ohne weiteres vergleichen. Denn einerseits ist die Restleitfähigkeit bei kleinen Ausschaltströmen schon von Anfang an verhältnismässig klein und ihr weiterer Verlauf bis zu dem Wert von $^1/_{10}$ ihrer Anfangsgrösse kann länger dauern, als der analoge Verlauf einer Leitfähigkeit, die wie etwa bei grossen Strömen mit höherem Wert beginnt. Anderseits war die Eigenfrequenz der wiederkehrenden Spannung, welche die Restleitfähigkeit beeinflusst, bei den verschiedenen Ausschaltströmen nicht gleich.

Bei den durchgeführten Messungen variieren die Eigenfrequenzen mit Ausnahme des Oszillogrammes in Fig. 6C (20 kHz) zwischen 2 und 5 kHz, also in einem ziemlich kleinen Bereich.

Es gibt Druckluftschalter, bei denen ein oder mehrere Widerstände und Hilfsschaltstrecken an der Ausschaltung beteiligt sind. Hiebei kann u. U. die Restleitfähigkeit bedeutender werden. Versuche an einem 10-kV-Druckluftschalter mit parallel zur Hauptschaltstrecke angeordneter Hilfsschaltstrecke (mit zu dieser in Reihe geschaltetem niederohmigem Widerstand) ergaben z. B. Nachströme an der Hilfsschaltstrecke bis einen Schwellenwert von 15 A bei einer reduzierten Betriebspannung von effektiv 2,3 kV. Dies erklärt sich damit, dass bei diesem Schalter die ionisierte Luft der Hauptschaltstrecke zwischen die Elektroden der Hilfsfunkenstrecke geblasen wird, wobei der Druck dort verhältnismässig klein ist. Dadurch wird bei normaler Betriebspannung die gewollte Zündung der Hilfsfunkenstrecke (thermisch-elektrischer Zusammenbruch), d. h. die Einschaltung des erwähnten Widerstandes, beim Ansteigen der wiederkehrenden Spannung begünstigt.

3. Einfluss der Restleitfähigkeit der Schaltstrecke auf den Verlauf der wiederkehrenden Spannung; Kontrolle der Nachstrommessung. Fig. 13 stellt schematisch den Stromkreis beim Ausschalten eines Stromes dar. Für ein genügend kleines Zeitintervall kann man den an sich veränderlichen Restwiderstand R_S des Schalters durch einen konstanten Wert ersetzen. R_N und R_S wirken dämpfend auf die wiederkehrende Spannung. Das logarithmische Dekrement beträgt:

$$\vartheta = \left[\frac{R_N}{2\,L} + \frac{1}{2\,R_S\,C}\right] T \qquad (1)$$

wobei T die Schwingungsdauer, L die Strombegrenzungsinduktivität; R_N und R_S Widerstände nach Fig. 13 und C die Ersatzkapazität des speisenden Netzteiles bedeuten. Man kann nun z. B. R_N direkt messen, oder aus der oszillographisch gemessenen Dämpfung der wiederkehrenden Spannung bei einer Schaltung mit sehr kleinem Nachstrom, bestimmen. Ferner kann aus einer Schaltung mit grossem Reststrom der Widerstand R_S (gleich wiederkehrende Schalterspannung dividiert durch Reststrom) ermittelt, und dann aus R_N und R_S das logarithmische Dekrement nach Gl. (1) berechnet werden. Zur Kontrolle kann aber anderseits das logarithmische Dekrement auch aus der oszillographisch gemessenen gedämpft einschwingenden wiederkehrenden Spannung bestimmt, und mit dem nach Gl. (1) berechneten Dekrement verglichen werden. Z. B. ermittelte man beim Versuch Fig. 4D R_S als Quotient aus wiederkehrender Spannung und Nachstrom zu ca. 600 Ω. Der Widerstand des übrigen Stromkreises (ohne Schaltstrecke) betrug $R_N = 3\ \Omega$. Ferner war $L = 4{,}2 \cdot 10^{-3}$ H, $C = 2{,}7 \cdot 10^{-7}$ F und $T = 2{,}1 \cdot 10^{-4}$ s. Nach Gl. (1) folgt daraus ein logarithmisches Dekrement von $\vartheta = 0{,}65$. Demgegenüber beträgt das aus dem Spannungsoszillogramm der Fig. 4D hergeleitete logarithmische Dekrement $\vartheta = 0{,}70$, was mit obigem gut übereinstimmt.

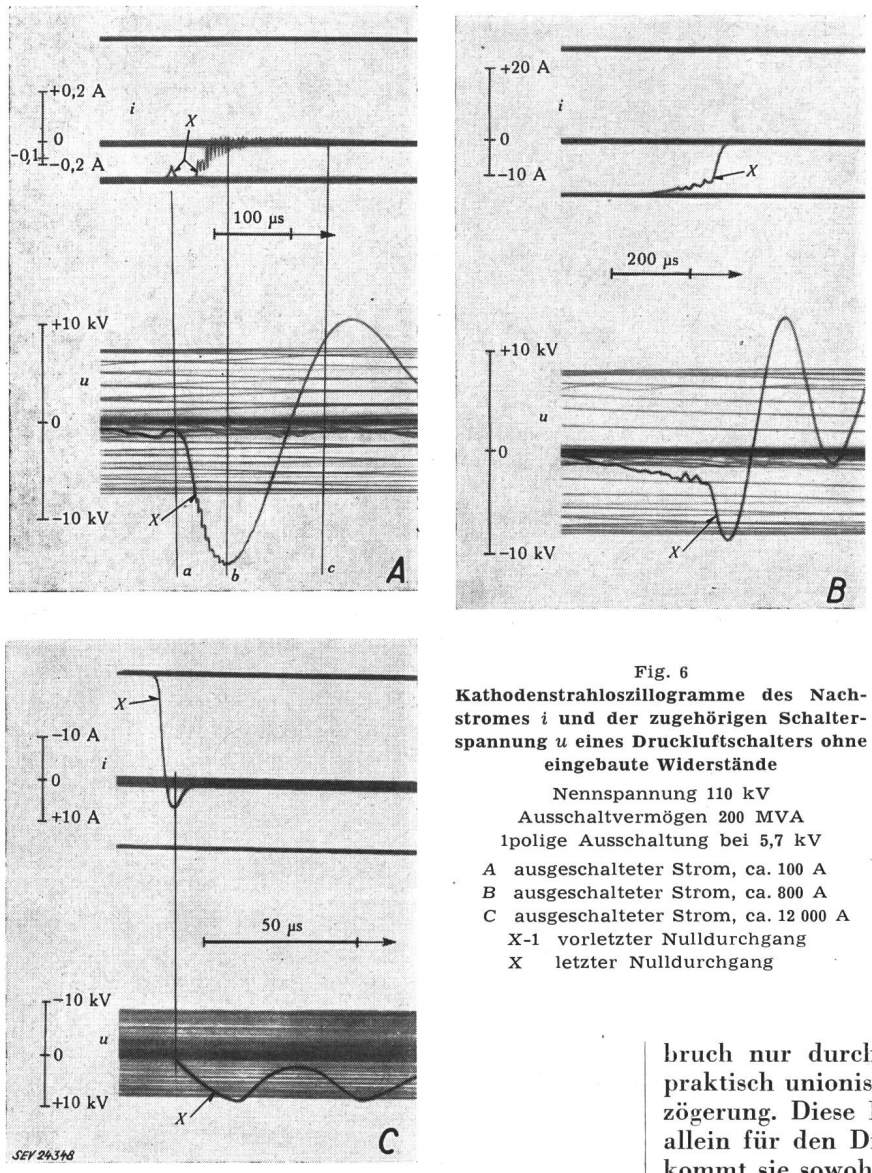


Fig. 6
Kathodenstrahloszillogramme des Nachstromes i und der zugehörigen Schalterspannung u eines Druckluftschalters ohne eingebaute Widerstände

Nennspannung 110 kV
Ausschaltvermögen 200 MVA
1polige Ausschaltung bei 5,7 kV

A ausgeschalteter Strom, ca. 100 A
B ausgeschalteter Strom, ca. 800 A
C ausgeschalteter Strom, ca. 12 000 A
X-1 vorletzter Nulldurchgang
X letzter Nulldurchgang

4. Rückzündungen infolge thermischen Zusammenbruches und Rückzündungen infolge dielektrischen Durchschlages der Schaltstrecke. Fliesst beim Anstieg der wiederkehrenden Spannung im Schalter ein Nachstrom, so wird in der Schaltstrecke eine Leistung entwickelt, die dem Produkt aus Schalter-Strom und Schalter-Spannung entspricht. Dieser Energiezunahme steht die durch Strahlung, Konvektion, Wärmeleitung (Abbau durch das Löschmittel) usw. abgegebene Leistung gegenüber. Ist die zugeführte Energie grösser als die abgegebene, so steigt die Temperatur im ionisierten Pfad, d. h. der Ionisationsgrad. Der Nachstrom nimmt zu, wodurch auch wieder die im Strompfad entwickelte Leistung zunimmt usw., d. h. der Strom wächst immer mehr an bis zum völligen Zusammenbruch der Schaltstrecke. Dies nennt man thermischen Durchschlag. Bei solchen Durchschlägen massen wir zwischen dem Beginn des Nachstromanstieges bis zum völligen Zusammenbruch der Spannung eine Zeit von ca. 50...200 µs. Thermische Durchschläge traten vor allem beim Kesselölschalter und manchmal auch beim ölarmen Schalter, aber praktisch nie beim Druckluftschalter auf. Bei diesem entstand der Spannungszusammenbruch nur durch dielektrischen Durchschlag der praktisch unionisierten Schaltstrecke, ohne Zeitverzögerung. Diese Rückzündungsform ist aber nicht allein für den Druckluftschalter typisch, vielmehr kommt sie sowohl beim ölarmen Schalter, als auch beim Kesselölschalter oft vor, so dass also bei diesen beiden Schaltertypen beide Entladungsformen auftreten können. Beim Kesselölschalter war, im ganzen Stromgebiet betrachtet, der dielektrische Durchschlag etwa gleich häufig wie der thermische.

Als Beispiel für einen thermischen Durchschlag betrachte man das Oszillogramm in Fig. 4C. Dort stellt man beim vorletzten betriebsfrequenten Strom-Nulldurchgang X-1 eine stromlose Pause von ca. 40 µs fest. Hat aber die Spannung ca. 6 kV erreicht (b), so beginnt der Nachstrom zu wachsen, zuerst langsam und nachher immer rascher, bis schliesslich die Spannung ganz zusammenbricht (c). Die Zeit zwischen dem Beginn des Wachsens

des Nachstromes (*b*) und dem völligen Zusammenbruch der Spannung (*c*) beträgt ca. 60 µs. Ein typischer dielektrischer Durchschlag ist in Fig. 5C

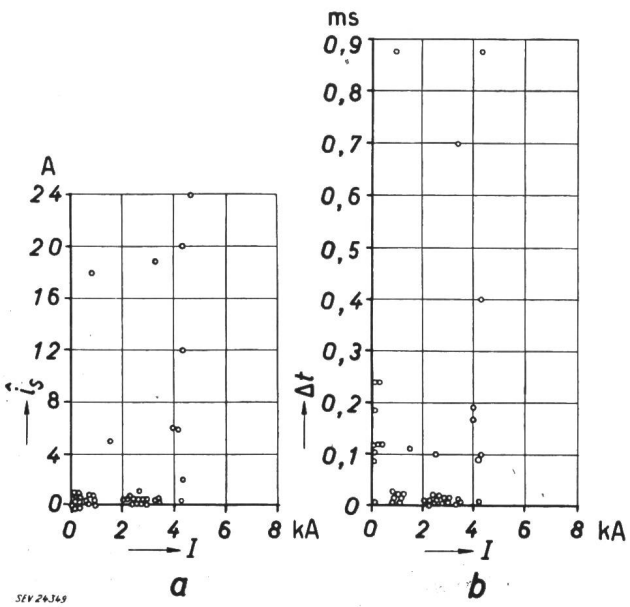


Fig. 7
Messungen an einem Kesselölschalter, 10 kV, 80 MVA
a grösste Nachstromspitzen $\hat{i}_s$ in Funktion des Ausschaltstromes *I*
b Nachstromdauer Δ*t* in Funktion des Ausschaltsromes *I*
Der Ausschaltstrom wurde zwischen 100 A und 4,3 kA variiert

dargestellt. Hier ist beim vorletzten Nulldurchgang *X*-1 ein sehr rasches Anwachsen des Stromes bei *a* vom Werte null bis zum vollständigen Durchschlag bei *b* sichtbar.

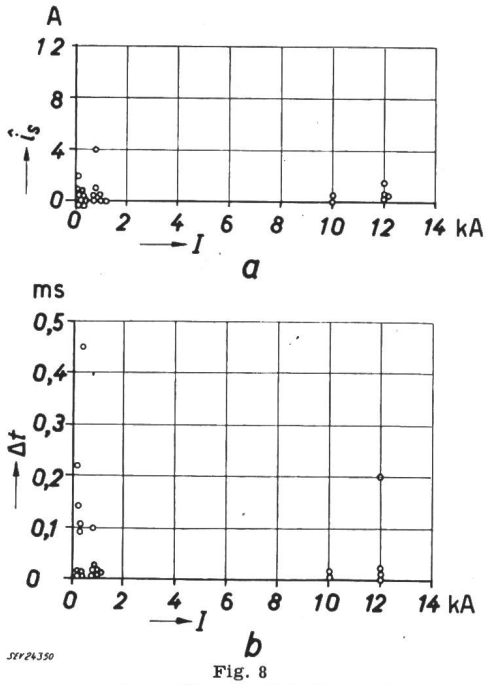


Fig. 8
Messungen an einem ölarmen Schalter, 10 kV, 250 MVA
a grösste Nachstromspitzen $\hat{i}_s$ in Funktion des Ausschaltstromes *I*
b Nachstromdauer Δ*t* in Funktion des Ausschaltsromes *I*
Der Ausschaltstrom wurde zwischen 100 A und 12 kA variiert

5. *Vorzeitiges Nullwerden des Ausschaltstromes und Nachstrom vor dem Nulldurchgang.* Die Lichtbogenspannung kann vor dem betriebsfrequenten

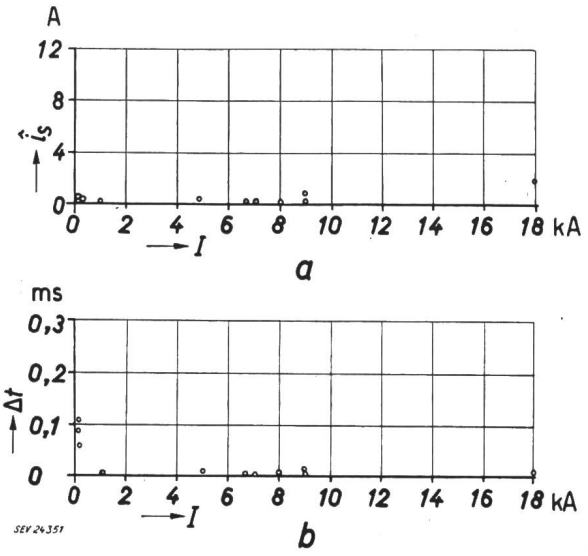


Fig. 9
Messungen an einem Druckluftschalter, 20 kV, 200 MVA
a grösste Nachstromspitzen $\hat{i}_s$ in Funktion des Ausschaltstromes *I*
b Nachstromdauer Δ*t* in Funktion des Ausschaltsromes *I*
Der Ausschaltstrom wurde zwischen 100 A und 18 kA variiert

Stromnulldurchgang so stark zunehmen, dass fast der gesamte Strom des Schaltkreises zur Aufladung der sich parallel zum Schalter befindenden Kapazität benötigt wird. Der Strom durch den Schalter sinkt somit auf einen sehr kleinen Wert ab, und der Lichtbogen verlöscht, währenddem die Spannung

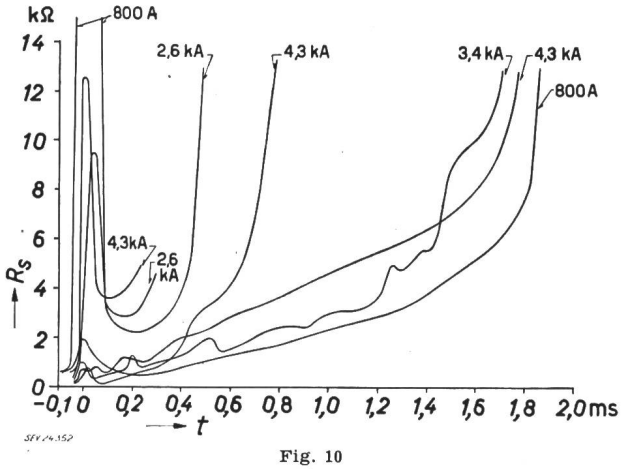


Fig. 10
Messungen an einem Kesselölschalter, 10 kV, 80 MVA
Zeitlicher Verlauf des Widerstandes R_s der Schaltstrecke bei effektiven Abschaltströmen zwischen 0,8 kA und 4,3 kA
t = 0 Stromnulldurchgang

über dem Schalter infolge der magnetischen Energie des Stromkreises noch weiter ansteigt, und erst einige Zeit später durch null geht, um mit umgekehrter Polarität auf den Wert der Phasenspannung einzuschwingen. Der Strom kann hiebei somit sehr klein werden, «lange» bevor die Spannung durch null geht. Dieser Stromverlauf kann bei allen

untersuchten Schaltern bis zu Abschaltströmen von mehreren kA auftreten. So zeigt z. B. Fig. 5D beim Ausschalten von 10 kA bei 5,7 kV (Effektivwerte) mit einem ölarmen Schalter ein Nullwerden des

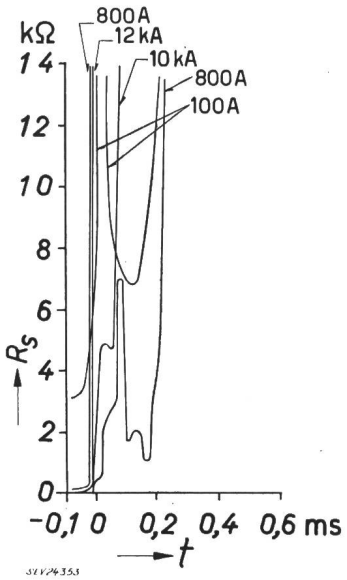


Fig. 11
Messungen an einem ölarmen Schalter, 10 kV, 250 MVA
Zeitlicher Verlauf des Widerstandes R_S der Schaltstrecke bei effektiven Abschaltströmen zwischen 0,8 kA und 12 kA
$t = 0$ Stromnulldurchgang

Stromes (Zeitpunkt *a*) 50 µs vor dem Spannungsnulldurchgang (Zeitpunkt *c*). Dazwischen erreicht die Spannung im Zeitpunkt *b* ein deutliches Maximum von ca. 500 V.

Im folgenden wollen wir die Abschaltung kleiner induktiver Ströme von ca. 100 A (Effektivwert) etwas näher betrachten. Auf die sehr komplizierten Schwingungsvorgänge vor der Löschung wollen wir hier nicht eingehen [darüber vergl. z. B. [12][1])],

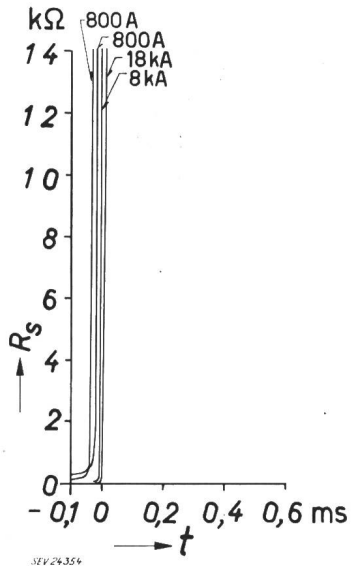


Fig. 12
Messungen an einem Druckluftschalter, 10 kV, 200 MVA
Zeitlicher Verlauf des Widerstandes R_S der Schaltstrecke bei effektiven Abschaltströmen zwischen 0,8 kA und 18 kA
$t = 0$ Stromnulldurchgang

sondern es sei hier nur an Hand des Oszillogrammes in Fig. 4A das Verhalten des Stromes in der Nähe des Nulldurchganges diskutiert. Zur Zeit *a* reisst der Strom ab, und die Spannung über dem Schalter beginnt sinusförmig zu wachsen. Der Strom wird aber beim Abreissen nicht null, sondern sinkt auf einen momentanen Wert von ca. 200 mA. Von hier an hat der Strom Nachstromcharakter, d. h. er wächst wieder mit zunehmender Spannung, ohne dass dies zu einer Rückzündung führt. Zur Zeit *b* geht er dann gleichzeitig mit der Spannung durch null und nach dem Nulldurch-

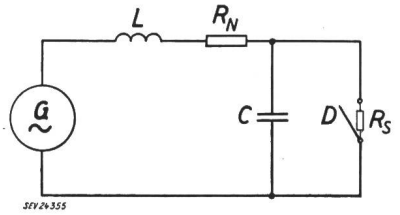


Fig. 13
Stromkreisschema für die Ausschaltung
G Generator; *L* Strombegrenzungsinduktivität; *C* Ersatzkapazität des speisenden Netzteiles; R_N Widerstand des Stromkreises bei geschlossenem Schalter; *D* Schalter; R_S Widerstand der Schaltstrecke (gleich der reziproken Leitfähigkeit)

gang tritt noch ein eigentlicher Nachstrom von 350 mA auf. Das Maximum dieses Nachstromes wird fast mit dem Maximum der wiederkehrenden Spannung erreicht. Nachströme vor dem Nulldurchgang des Stromes treten bei kleinen induktiven Strömen oft auf (siehe z. B. die Oszillogramme in den Fig. 5B und 6A). Schon bei effektiv 800 A ist diese Erscheinung aber bedeutend weniger ausgeprägt.

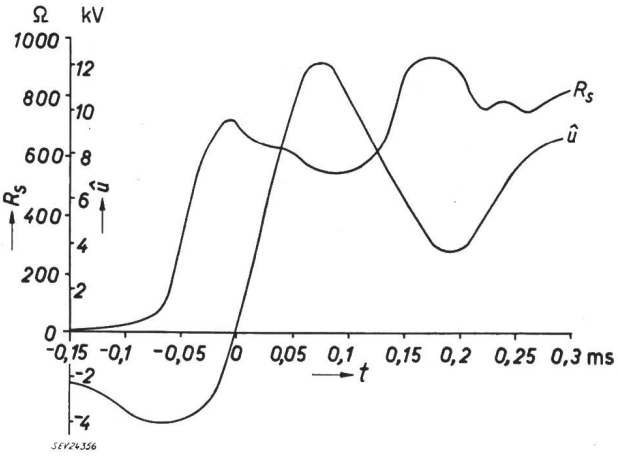


Fig. 14
Messungen an einem Kesselölschalter, 10 kV, 80 MVA
Zeitlicher Verlauf des Widerstandes R_S der Schaltstrecke und der wiederkehrenden Spannung *u* bei einer Abschaltung von 4,3 kA bei 5,7 kV. Auswertung des Oszillogrammes in Fig. 4 D; *u* Scheitelwert der Spannung; *t* Zeit

IV. Schlussfolgerungen

a) Nachstrom und Restleitfähigkeit hängen nicht nur vom Schalter und vom ausgeschalteten Strom, sondern ebenso vom Verlauf der wiederkehrenden Spannung, namentlich von der Eigenfrequenz ab (thermische Ionisation infolge der wiederkehrenden Spannung). Bei verschiedenen Eigenfrequenzen kann also ein Schalter unter Umständen ganz verschiedene Nachströme und Leitfähigkeiten haben. Aber auch umgekehrt kann der Verlauf der wiederkehrenden Spannung durch die Restleitfähigkeit der Schaltstrecke beeinflusst, d. h. gedämpft werden, wenn die Schwingungsdauer der Eigenfrequenz von gleicher Grössenordnung oder kleiner als die Nachstromdauer ist.

[1]) siehe Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

Als wichtige repräsentative Grösse der nach dem Strom-Nulldurchgang sich abspielenden Vorgänge wäre die schaltereigene, d. h. nur vom Schalter und Ausschaltstrom abhängige Restleitfähigkeit zu betrachten. Diese könnte z. B. praktisch nach der Unterbrechung des Stromes bestimmt werden, wenn die wiederkehrende Spannung möglichst klein gehalten, und über die Schaltstrecke aus fremder Spannungsquelle eine hochfrequente kleine Spannung angelegt wird [2].

β) Beim Kesselölschalter variierten Grösse und Dauer des Nachstromes in grösseren Grenzen als beim ölarmen Schalter und vor allem viel mehr als beim Druckluftschalter. Die beim Kesselölschalter bei schweren Schaltungen gemessenen verhältnismässig kleinen Nachströme mit kurzen Nachstromdauern zeigen, dass bei Eigenfrequenzen unter 5000 Hz auch bei diesem Schalter ein dämpfender Einfluss der Restleitfähigkeit auf die nach den Kurzschlußschaltungen wiederkehrende Spannung nicht mit Sicherheit vorhanden ist.

γ) Die beim Druckluftschalter gemessenen sehr kleinen Nachströme und Nachstromdauern bestätigen die bereits bekannte Tatsache der sehr raschen Wiederverfestigung der Schaltstrecke, wodurch ein rasches, eindeutiges und sauberes Schalten auch bei extremen Schaltfällen mit grosser Spannungsbeanspruchung ermöglicht wird.

δ) Die komplizierten Zusammenhänge zwischen Lichtbogenstrom, Lichtbogenspannung, Reststrom, wiederkehrender Spannung, thermischer Ionisation usw. zeigen, dass man bei indirekten Prüfverfahren, z. B. mit getrennten Hochstrom- und Hochspannungskreisen, äusserst sorgfältig vorgehen muss, indem sowohl der Stromverlauf als auch die wiederkehrende Spannung vor und während des Strom-Nulldurchganges in Amplitude und zeitlichem Verlauf genau der Wirklichkeit entsprechen müssen; andernfalls ist die indirekte Prüfung nicht schlüssig.

ε) Die sog. Elementenprüfung bei Schaltern mit Mehrfachunterbrechung besteht darin, eine Unterbrechungsstelle mit voller Ausschaltleistung zu prüfen, und hieraus das Ausschaltvermögen des Schalters durch Umrechnung unter Berücksichtigung der Spannungsverteilung zu bestimmen. Diese Methode ist dann einwandfrei, wenn die Spannungsverteilung über die Unterbrechungsstellen, beim Ansteigen der wiederkehrenden Spannung, genau definiert und bekannt ist. Beim Druckluftschalter ist eine Beeinflussung der Spannungsverteilung durch die Restleitfähigkeit dank der raschen Entionisierung praktisch nicht vorhanden, während bei Schaltern mit grosser und lange dauernder Restleitfähigkeit, welche wegen des grossen Streubereiches in jeder Unterbrechungsstelle in Grösse und Verlauf verschieden sein kann, eine ungleichmässige Beeinflussung der Spannungsverteilung möglich ist. Bei solchen Schaltern ist die Methode der Elementenprüfung daher nicht ohne weiteres zulässig.

Literatur

[1] *Cassie, M. A.:* Théorie nouvelle des arcs de rupture et de la rigidité des circuits. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1939, Bd. 1, Rapp. 102, 16 S.

[2] *Cassie, A. M., F. O. Mason* und *L. H. Orton:* Measurement of Rapidly Varying Resistance in an Arc Gap near Current Zero. Electrician Bd. 122(1939), Nr. 3168, S. 206.

[3] *Mayr, O.:* Über die Theorie des Lichtbogens und seiner Löschung. ETZ Bd. 64(1943), Nr. 49/50, S. 645...652.

[4] *Boehne, E. W.:* The Geometry of Arc Interruption II. Current-Zero Phenomena. Trans. AIEE Bd. 63(1944), Juni, S. 375...386; 447...450.

[5] *Hammarlund, P.:* Transient Recovery Voltage. Handl. Proc. Bd. -(1946), Nr. 189, S. 182 ff.

[6] *Lewis, L. J.:* Circuit-Breaker Current Measurements During Reignitions and Recovery. Trans. AIEE Bd. 66(1947), S. 1253...1257.

[7] *Browne, T. E.:* A Study of A.C. Arc Behaviour near Current Zero by Means of Mathematical Models. Trans. AIEE Bd. 67(1948), Part. 1, S. 141...153.

[8] *Teszner, S., A. Guillaume, P. Fourmarier, J. Blase* und *P. Walch:* Contribution à l'étude des courants post-arc dans les interrupteurs à haute tension. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1952, Bd. 2, Rapp. 130, 21 S.

[9] *Hochrainer, A.:* Der Nachstrom in Leistungsschaltern. ETZ Bd. 73(1952), Nr. 19, S. 627...629.

[10] *Mason, F. O.:* Gas Blast Circuit Breakers. Recording of Current in A. C. Power Arcs near Current Zero. Engr. Lond. Bd. 193(1952), 23. Mai, S. 686...689.

[11] *Teszner, S.* und *J. Blase:* Nouvelle Contribution à l'étude des courants post-arc dans les interrupteurs à haute tension. Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques (CIGRE), Paris 1954, Bd. 2, Rapp. 145, 29 S.

[12] *Baltensperger, P. und P. Schmid:* Lichtbogenstrom und Überspannungen beim Abschalten kleiner induktiver Ströme in Hochspannungsnetzen. Bull. SEV Bd. 46(1955), Nr. 1, S. 1...13.

Adresse der Autoren:

Dr. sc. math. *P. Baltensperger,* Hönggerstrasse 22, Unterengstringen (ZH); *P. Schmid,* dipl. Physiker, Gottesgraben 3, Wettingen (AG).

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Nachträgliches aus den Mustermesse-Ständen

Hasler A.-G., Bern und Zürich

(Halle 3, Stand 706; Halle 11, Stand 4139.) Die Firma zeigt an der diesjährigen Mustermesse eine Vielzahl von Apparaturen aus dem Gebiet der *Fernmeldetechnik* nebst einer sorgfältigen Auslese interessanter mechanischer Erzeugnisse aus dem Bereich der *Präzisionsmechanik.*

Die moderne Übertragungstechnik hat einen gewaltigen Aufschwung zu immer neuen Anwendungen genommen. So wurde der drahtlose Telexverkehr mit Übersee erst möglich durch die *TOR-Apparaturen zur automatischen Fehlerkorrektur,* wovon 1 Schrank ausgestellt ist. — Zur Verbesserung des Empfanges der Rundspruch-Programme der Landessender wird gegenwärtig in der Schweiz ein UKW-Netz aufgebaut. Daran ist die Firma massgeblich beteiligt durch die Lieferung einer Serie von *FM-UKW-Sendern,* von denen einer ausgestellt ist (Fig. 1). Unter C-Trägersystemen sind den Fachleuten die neuentwickelten *trägerfrequenten Telephonsysteme zu 5 + 5 Kanäle* bekannt, die besonders für kleine Distanzen entwickelt worden sind. Zwei Buchten, die in Betrieb gezeigt werden, enthalten die nötigen Trägerfrequenz- und Linienausrüstungen (Fig. 2). Weiter entwickelt mit neuer Phasen-Modulation wurden die *drahtlosen Telephonanschlüsse.* Dadurch besitzen Klubhütten, Berggasthöfe usw. trotz allfälliger Lawinen und Steinschläge stets eine sichere Verbindung mit dem öffentlichen Telephonnetz. Bei dem von der Firma entwickelten *Autoruf* ist der Aufbau eines Empfängers mit Gehäuse aus transparentem Material sichtbar gemacht.

Direktionstelephone (welche die Auszeichnung «Die gute Form 1955» tragen) und der einplätzige *Hotel-Vermittler* fal-