

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band:	35 (1944)
Heft:	20
Artikel:	Oszillographisch gemessene Ueberspannungen beim Abschalten eines leerlaufenden Transformators mit Druckluft- und Oelschaltern verschiedener Bauart
Autor:	Berger, K. / Jean-Richard, Ch.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1061601

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: 14.01.2026

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

BULLETIN

REDAKTION:

Sekretariat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:

Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telephon 25 17 42
Postcheck-Konto VIII 8481

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

XXXV. Jahrgang

Nº 20

Mittwoch, 4. Oktober 1944

Oszillographisch gemessene Ueberspannungen beim Abschalten eines leerlaufenden Transformators mit Druckluft- und Oelschaltern verschiedener Bauart

Bericht, erstattet an die Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH),
von K. Berger, Zürich, und Ch. Jean-Richard, Muri b. Bern

621.3.015.3 : 621.316.5.064.2

Die FKH hat zusammen mit den Bernischen Kraftwerken im Kraftwerk Spiez Ueberspannungen, die beim Abschalten eines leerlaufenden 6000 kVA-Transformators entstehen, oszillographisch aufgenommen und ausgewertet. Die Abschaltungen wurden bei 50 und 16½ Hz durchgeführt. Dabei wurden Druckluft- und Oelschalter verschiedener Fabrikate verwendet. Alle Druckluftschatzer ohne Widerstand ergaben grössere Leerschaltüberspannungen als der untersuchte Oelschalter. Die Zahl der Rückzündungen bei der Leerabschaltung war am Oelschalter bedeutend grösser als an den Druckluftschatzern. Die Messungen lassen erkennen, dass Ueberspannungsableiter, die zur Verhinderung zu hoher Schaltüberspannungen dienen sollen, zwischen Druckluftschatzer und Transformator eingebaut werden müssen.

La FKH, avec la collaboration des Forces Motrices Bernoises, a relevé au moyen de l'oscillographe cathodique, à la centrale de Spiez, les surtensions qui se produisent lors du déclenchement d'un transformateur à 6000 kVA, en régime de marche à vide. Les déclenchements furent produits aux fréquences de 50 et de 16½ Hz en utilisant des disjoncteurs à air comprimé et à huile de différentes marques. Tous les disjoncteurs à air comprimé sans résistance donnèrent lieu à des surtensions de déclenchement à vide plus élevées que celles produites avec le disjoncteur à huile examiné. Par contre, le nombre des réallumages fut plus grand avec l'interrupteur à huile. Les mesures ont démontré que les parafoudres destinés à empêcher les tensions de coupure d'atteindre des valeurs trop élevées doivent être montés entre le disjoncteur à air comprimé et le transformateur.

A. Einleitung

Aus Anlass eines Generatordefektes im Moment einer Schaltung entstand die Aufgabe, im Kraftwerk Spiez der BKW die beim Abschalten eines leerlaufenden Transformators von 16,9/49 kV Spannung, 50 Hz, entstehenden Schaltüberspannungen mit dem KO-Messwagen der FKH mit 6 Kathodenstrahlen zu messen.

Da die Resultate der Messungen praktisch wichtig schienen, wurden diese Versuche in der Folge ausgedehnt auf Messungen auch bei Bahnfrequenz (16²/₃ Hz). Die Drehstrommessungen wurden als Auftrag der BKW, NOK und des EW Basel ausgeführt, die Messungen bei Bahnfrequenz als Auftrag der BKW und der SBB. Alle untersuchten Schalter hatten eine Nennspannung von 16 kV, sowohl jene für das Drehstromnetz (50 Hz), als auch jene für das Einphasen-Bahnenetz (16²/₃ Hz Nennfrequenz).

Der geschaltete Transformator war ein Drehstromtransformator von 6000 kVA Leistung, 16,9/49 kV, 7 % Kurzschlußspannung und 5 % Leerlaufstrom. Er war bei den Messungen im Drehstromnetz normal an 16 kV Betriebsspannung angeschlossen. Für die Messungen bei Bahnfrequenz wurden, um möglichst normale Eisensättigung beizubehalten, zwei seiner Oberspannungsklemmen an die Fahrleitungsspannung 16 kV, 16²/₃ Hz ange-

schlossen. Dabei betrug seine magnetische Sättigung ca. 90 % des Wertes im Drehstrombetrieb. Die Messungen erfolgten im Herbst 1942.

B. Der physikalische Vorgang,

der sich beim Abschalten eines leerlaufenden Transformators abspielt, lässt sich auf Grund der Oszillogramme mit aller wünschbaren Klarheit und bis in alle Einzelheiten verfolgen.

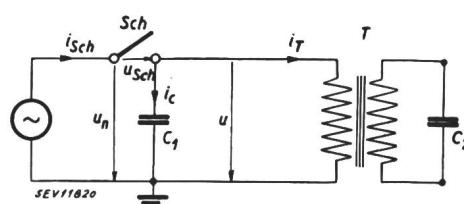


Fig. 1.

Einpoliges Prinzipschema der Abschaltung eines leerlaufenden Transformators T mit dem Schalter Sch

An Hand des einpoligen Prinzipschemas Fig. 1 und der Oszillogrammbeispiele Fig. 2, die den Einphasenversuchen entnommen sind, ergibt sich in Kürze folgendes:

Beim Öffnen des Schalters Sch entsteht ein Lichtbogen, der infolge des kleinen Leerlaufstromes von der Größenordnung 10 A bei 50 Hz und der parallel zum Transformator liegenden Zulei-

tungskapazität C_1 nicht stabil brennt, sondern leicht abreisst. In der grossen Induktivität L des leerlaufenden Transfornators fliesst der Strom i_T

jedoch weiter. Somit muss sich dieser jetzt notgedrungen über die Kapazität C_1 schliessen und diese aufladen. Dadurch verlagert sich magnetische

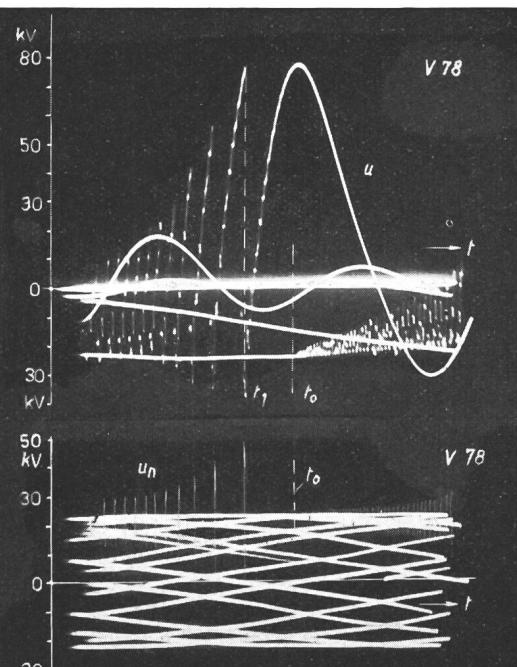
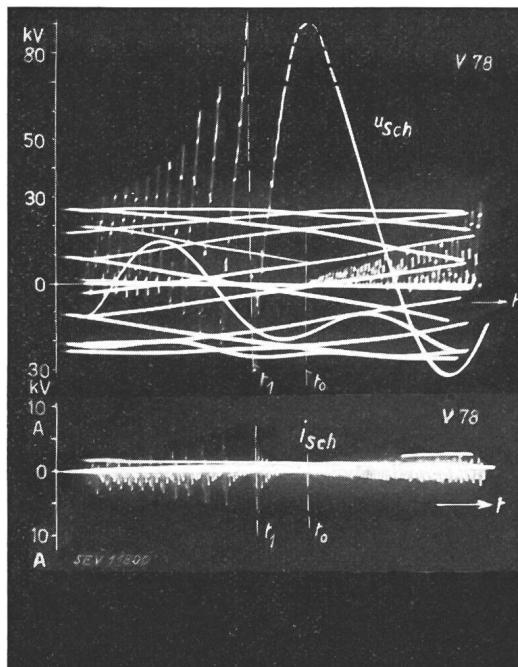


Fig. 2a.

Drei Oszillogrammbespiele der einphasigen Leer-Abschaltung mit Druckluftschalter (Bahnnetz 16 kV, 16% Hz)
 u Spannung am Transfornator.
 u_{Sch} Spannung über den Schalter.
 u_n Spannung des Netzes.
 i_{Sch} Strom im Schalter.
 t_0 Moment der Kontaktöffnung.
 t_1 Ende der Abschaltung.

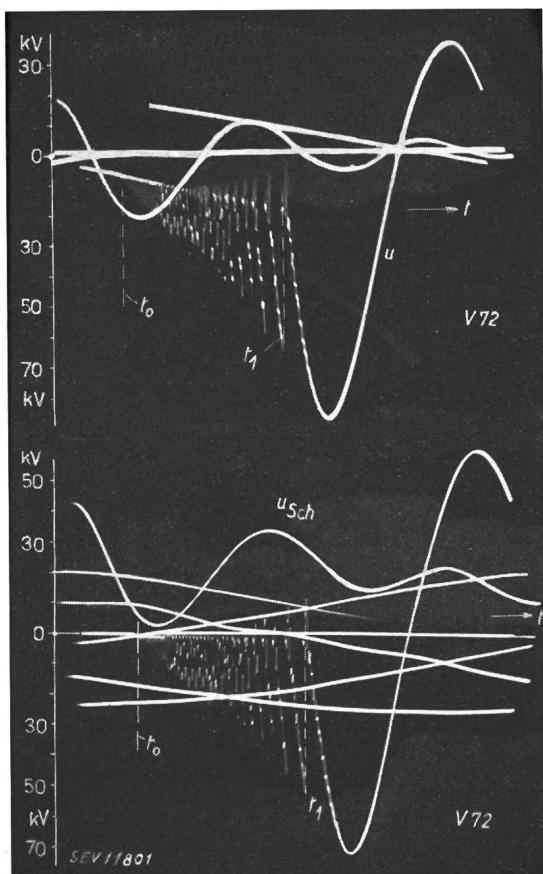


Fig. 2b.

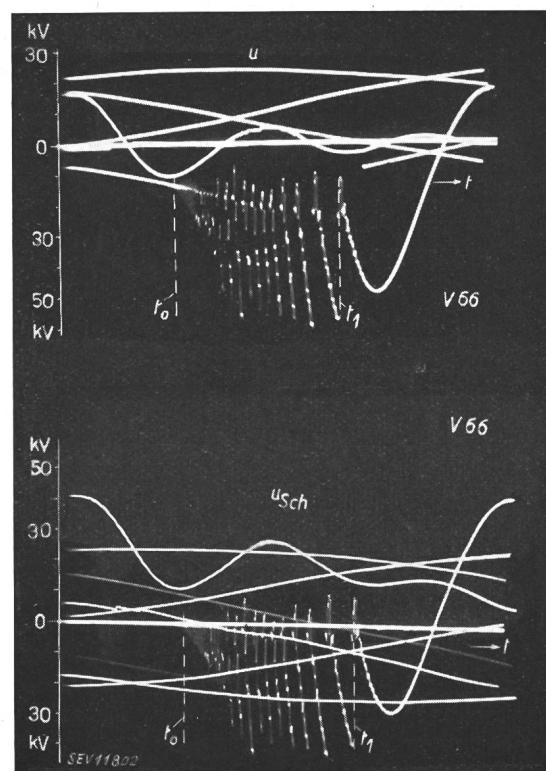


Fig. 2c.

Energie von der Transformatoreninduktivität L in den Kondensator C_1 . Dessen Spannung steigt fast gradlinig an, wie z. B. aus den Oszillogrammen der Fig. 3a und 4b zu sehen ist. Damit wächst auch

Bei dem Schalterpol in diesem Moment zukommenden elektrischen Durchschlagspannung der Öffnungsstrecke entsteht eine Rückzündung, d. h. ein elektrisches Wiederschliessen des Strom-

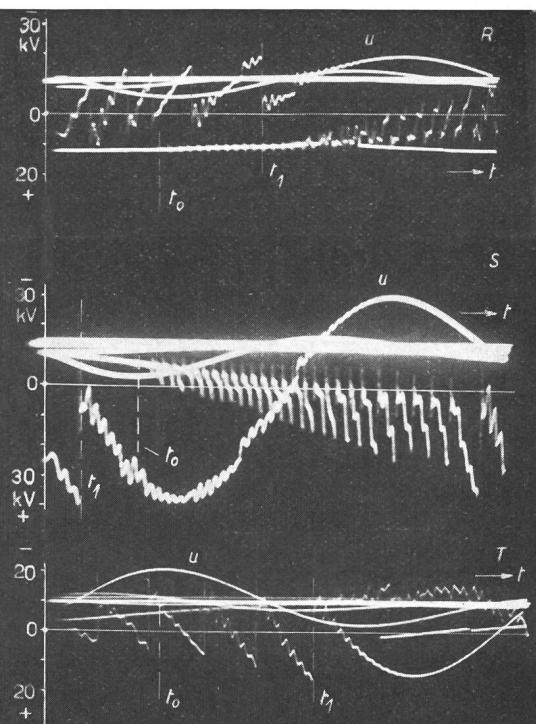
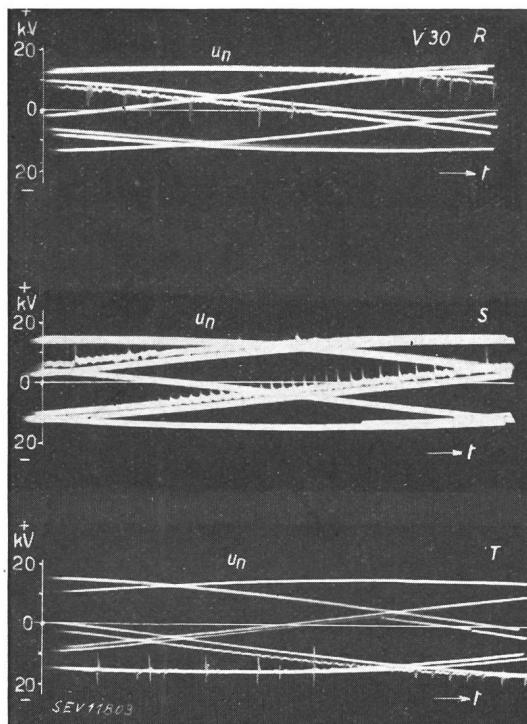


Fig. 3a.

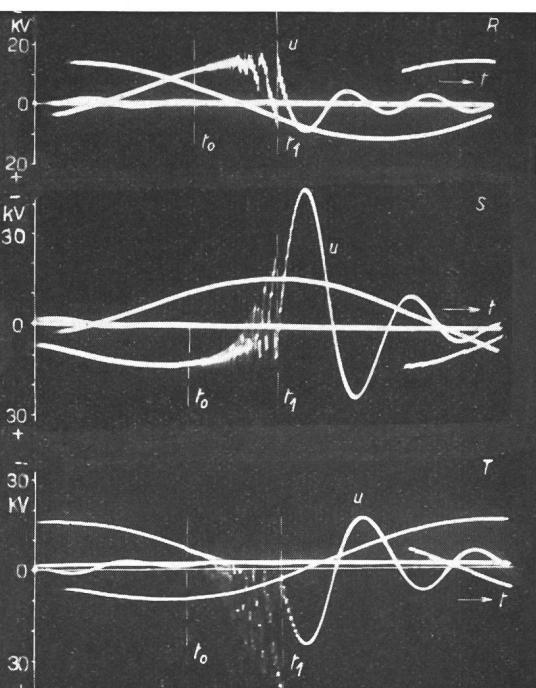
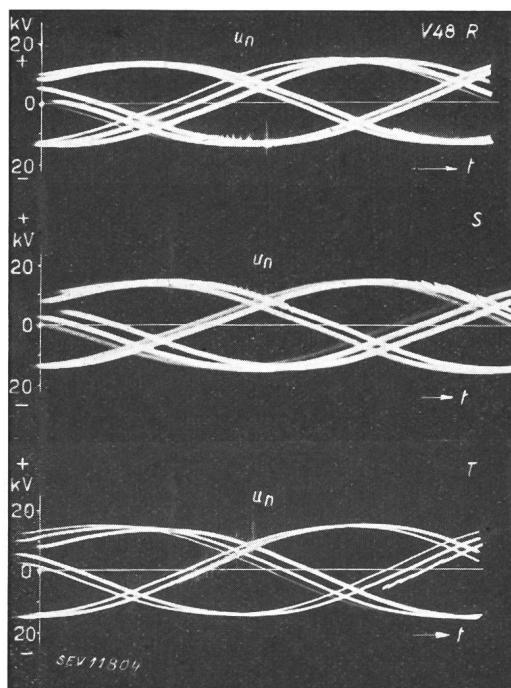


Fig. 3b.

Zwei Oszillogrammbeispiele der dreiphasigen Leer-Abschaltung mit Druckluftschalter (Drehstrom 16 kV, 50 Hz)
Bezeichnungen siehe Fig. 2.
 R , S , T Bezeichnungen der drei Phasen.

die Spannung u_{Sch} über den geöffneten Schalter in ungefähr gleichem Mass, denn die betriebsfrequente Spannung u_n der Sammelschienen ändert in dieser kurzen Zeit nur wenig.

kreises. Damit entlädt sich der Kondensator C_1 stossweise rasch auf die Sammelschienen zurück. Der stromstarke Entladefunke reisst nach der Entladung von C_1 sofort wieder ab. Was weiter folgt,

sind Wiederholungen, nämlich Wiederaufladung von C_1 und weitere Zündungen im Schalter. Das Oszillogramm zeigt eine ganze Menge solcher Zündungen.

Mit jedem Spiel wandert etwas Energie vom magnetischen Speicher L zunächst in die Kapazität C_1 und dann stossweise ins Netz zurück, bis

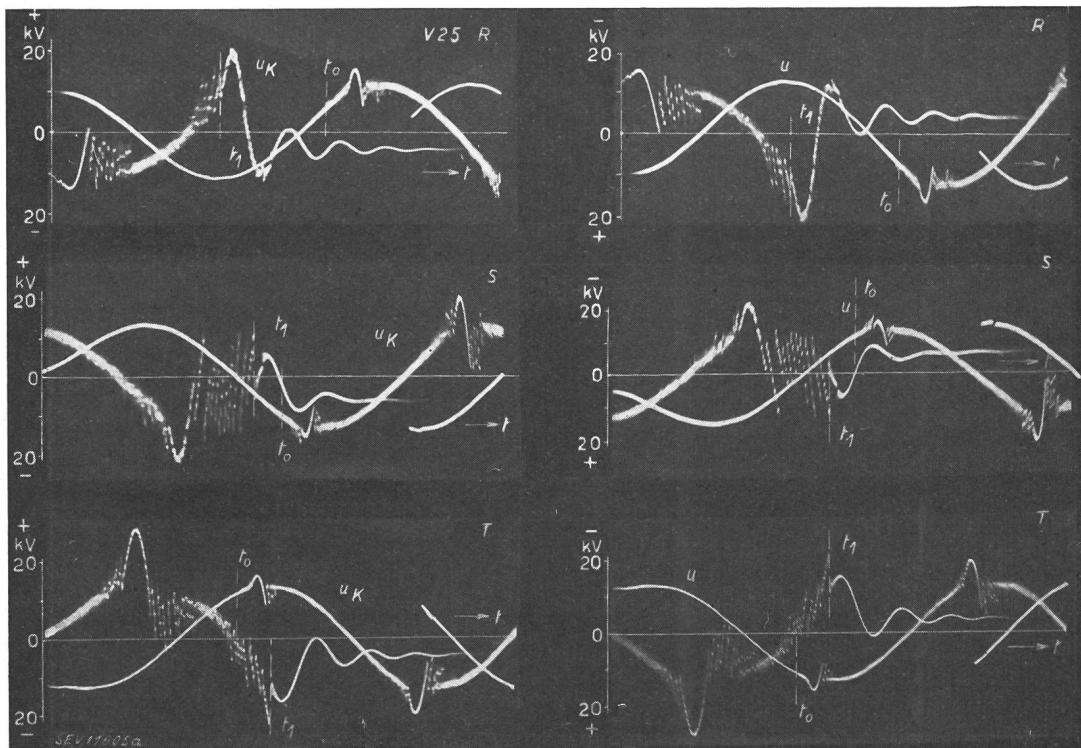


Fig. 4a.

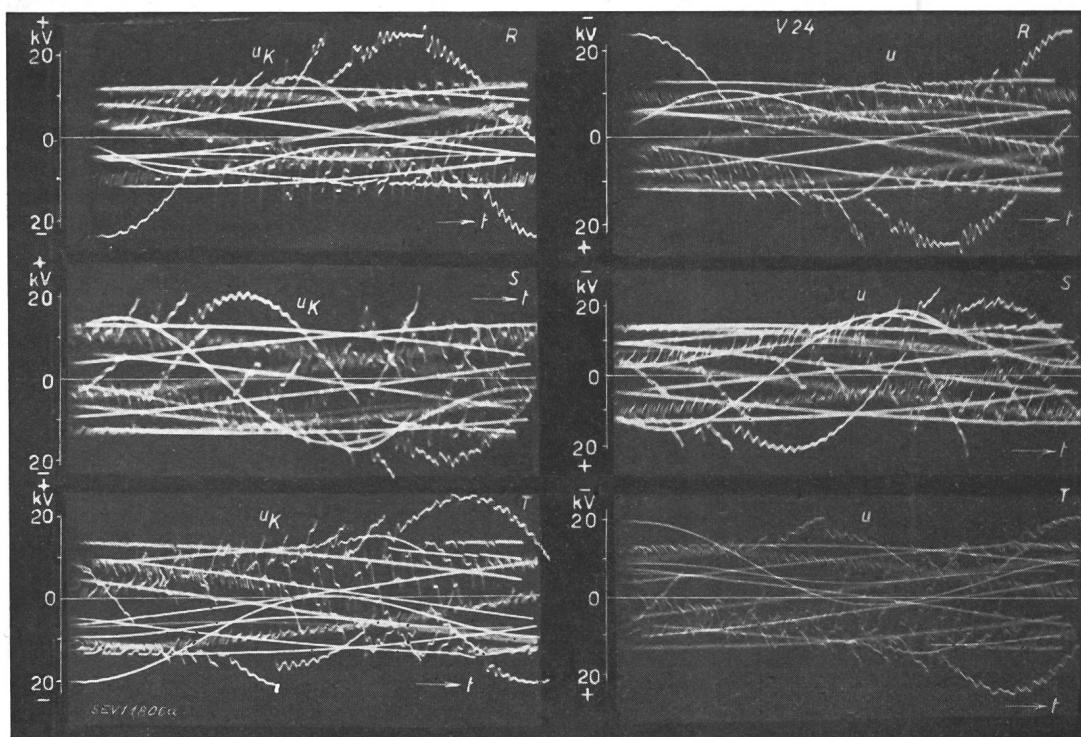


Fig. 4b.

Fig. 4.

Zwei Oszillogrammbeispiele der dreiphasigen Leer-Abschaltung mit Oelschalter (Drehstrom 16 kV, 50 Hz)

u Spannung am Transformator (Meßstelle M_V in Fig. 5). t_0 Moment der Kontaktöffnung.
 u_K Spannung vor dem Kabel zum Transformator (Meßstelle M_W in Fig. 5). t_1 Ende der Abschaltung.

Fig. 4a: Beispiel mit engem Zeitmaßstab. Fig. 4b: Beispiel mit weitem Zeitmaßstab.

schliesslich der Strom i_T durch die mittlere Gegenspannung an C_1 auf Null herunter gebracht und der Energiespeicher geleert ist, oder bis die Ladespannung an C_1 kleiner bleibt als die Festigkeit der Schaltstrecke in Sch . Alsdann schwingt der Kreis L und C_1 aus, wobei die Energie in Eisen- und Kupferverlusten aufgeht. Die Spannung am einpolig geerdeten Transformator wird dabei schliesslich zu Null; die Spannung am Schalter geht in die sinusförmige Betriebs-Wechselspannung u_n über.

Die Oszillogramme zeigen im Spannungsanstieg kleine Buckel oder Oberwellen, die vom Schwingen der Transformatorenstreung mit der Oberspannungskapazität C_2 herühren.

Fig. 3 zeigt zwei Oszillogrammbeispiele der Abschaltung des Transformators mit dem Druckluftschalter aus dem Drehstrombetrieb. Die Löschungen und Rückzündungen der 3 Phasen überlappen sich zum Teil, was das Spiel etwas kompliziert, aber abgesehen von erhöhten Schwingmöglichkeiten nichts wesentlich Neues bringt.

In den Bildern 2 und 3 ist zum Teil auch die Rückwirkung der Rückzündung auf die Sammelschienspannung u_n ersichtlich: Es sind dies im Zeitmaßstab der Oszillogramme scharfe Querstriche, d. h. Spannungssprünge, deren Amplitude einen Bruchteil der Ladespannung von C_1 beträgt. C_1 wirkt gewissermassen wie ein kleiner unge-dämpfter Stossgenerator, der bei jeder Zündung im Schalter Stoßspannungen in der Anlage erzeugt.

Die beiden Oszillogrammbeispiele Fig. 2 und 3 beziehen sich auf Schaltungen mit einem Druckluftschalter. Zum Vergleich sind in Fig. 4 noch zwei Beispiele von Leerabschaltungen mit dem Oelschalter wiedergegeben. Man erkennt daraus den grundsätzlichen Unterschied, dass einmal die Zündungen zum grossen Teil bei kleinerer Spannung erfolgen und dass die Anzahl Zündungen bis zur definitiven Unterbrechung im Schalter um ein Vielfaches grösser ist als beim Luftschafter.

C. Messungen im Drehstrombetrieb 50 Hz

Das *Prinzipschema* der Anlage ist in Fig. 5 dargestellt. Ausser dem untersuchten Transformator ($Tr. 3$) laufen noch 3 Transformatoren von 16-kV an der 16-kV-Sammelschiene. Ferner arbeiteten darauf 2 Generatoren G_2 und G_3 zu je 3400 kVA und 3 kleinere Generatoren $G_6 \dots G_8$ mit Auftransformierung von 4/16 kV zu je 3200 kVA. Generatoren und Transformatoren sind über kurze Kabelstücke von 30 bis 80 m Länge an die 16-kV-Schienen bzw. deren Schalter angeschlossen. Ferner gehen von den gleichen Sammelschienen 5 Freileitungen direkt, 4 weitere über einen «Survolteur» aus. Diese Anlageteile standen während der Messungen an Transformator 3 im normalen Werktagsbetrieb.

Die Meßstellen sind in Fig. 5 mit M_1 bis M_V bezeichnet. Die Spannungsmessung geschah mit kapazitiven Teilstücken, deren Prinzipschema Fig. 6 zeigt.

Jeder Kathodenstrahl misst die Spannung einer Phase gegen Erde. Die meisten Messungen wurden am Messpunkt IV gemacht. Der Vergleich der Spannungen IV und V zeigte aus begreiflichen Gründen keinen merklichen Unterschied. Die Spannun-

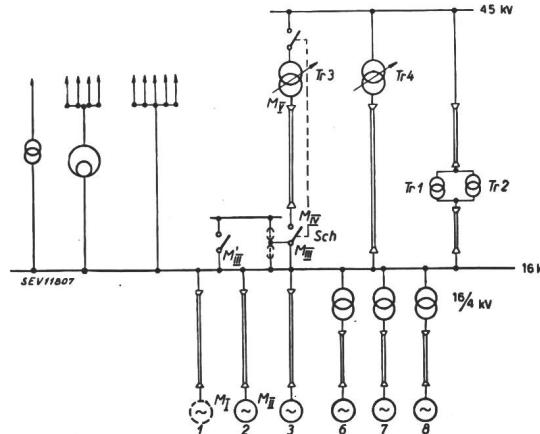


Fig. 5.

Prinzipschema der Versuche in der Drehstromlage 16 kV, 50 Hz
 $Tr. 3$ Versuchstransformator.
 Sch Versuchsschalter.
 $M_1 \dots M_8$ Meßstellen des Kathodenstrahl-Oszillographen.

gen in I, II und III wurden im Hinblick auf die Ueberspannungsgefährdung der Generatoren und der Sammelschiene gemessen; diese Resultate werden in diesem Zusammenhang hier nicht aufgeführt.

Durch Messung mit den 6 Kathodenstrahlen der Spannungen zugleich in III und IV lässt sich durch Differenzbildung rechnerisch auch die Spannung über den öffnenden Schalterpol bestimmen.

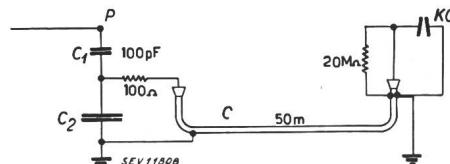


Fig. 6.

Einpoliges Schema der Spannungsteilung zur Messung der Spannung des Punktes P mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen
 C_2 variabel

Zum Leerschalten des Transformators 3 wurden folgende Schalter benutzt:

1. Dreipoliger Druckluftschalter, Fabrikat A, ohne Widerstand, 12...14,5 kg/cm² Betriebsdruck,
2. Dreipoliger Druckluftschalter, Fabrikat B, mit mehrstufigen Widerständen, 3 kg/cm² Betriebsdruck,
3. Dreipoliger Druckluftschalter, Fabrikat C, ohne Widerstand, 12...16 kg/cm² Betriebsdruck,
4. Dreipoliger Oelschalter, Fabrikat D, ohne Widerstand, Jahr 1925.

Die Resultate der Messung der bei insgesamt 40 Abschaltungen des leerlaufenden Drehstromtransformatoren bei 50 Hz entstehenden Ueberspannungen sind in Fig. 7..10 dargestellt. Diese Figuren zeigen Häufigkeitskurven des Vorkommens verschieden hoher Abschaltüberspannungen. Da zugleich alle 3 Phasen mit dem KO kontrolliert werden konnten, lassen sich 2 Darstellungen geben, nämlich:

- a) Die Häufigkeit der bei jedem Schaltvorgang gemessenen grössten Ueberspannungen, die im allgemeinen nur in einer Phase zugleich auftreten (pro Schaltvorgang nur 1 grösste Ueberspannung),

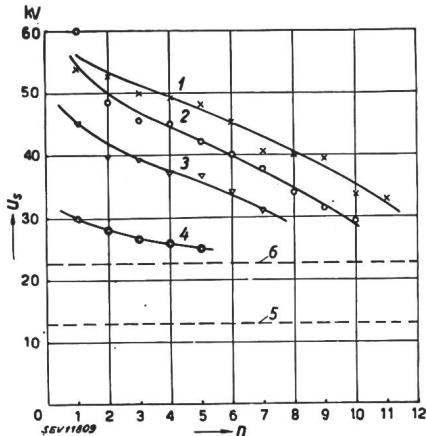


Fig. 7.

Häufigkeit verschieden hoher Abschalt-Ueberspannungen am Drehstrom-Transformator bei 16,5 kV Betriebsspannung, 50 Hz

- 1 Dreipoliger Druckluftschalter, Fabrikat A, ohne Widerstand, 12...14,5 kg/cm² Betriebsdruck.
 - 2 Dreipoliger Druckluftschalter, Fabrikat B, mit mehrstufigem Widerstand, 3 kg/cm² Betriebsdruck.
 - 3 Dreipoliger Druckluftschalter, Fabrikat C, ohne Widerstand, 12...16 kg/cm² Betriebsdruck.
 - 4 Dreipoliger Oelschalter, Fabrikat D, ohne Widerstand, Jahrgang 1925.
 - 5 Scheitelwert der Betriebs-Sternspannung (Phasenspannung).
 - 6 Scheitelwert der verketteten Betriebsspannung.
- n Anzahl Schaltungen, die Ueberspannungen gleich oder grösser als Ordinatenwert ergaben.

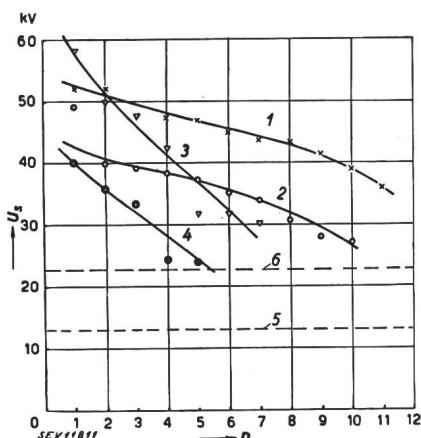


Fig. 9.

Häufigkeit verschieden hoher Abschalt-Ueberspannungen über den öffnenden Schalterpol, bei Drehstrom 16,5 kV, 50 Hz
n Anzahl Schaltungen, die Ueberspannungen gleich oder grösser als Ordinatenwert ergaben.
Kurvenbezeichnung wie Fig. 7.

- b) Die Häufigkeit aller in allen Phasen beim Schalten festgestellten Ueberspannungen (pro Schaltvorgang im allgemeinen 3 Ueberspannungen in den 3 Phasen, die hier alle berücksichtigt sind).

Fig. 7 und 8 zeigen die Häufigkeit der zwischen einer Klemme des abgeschalteten Transformators und Erde gemessenen Ueberspannungen, Fig. 9 und 10 dagegen die Häufigkeit der zwischen Eingang und Ausgang eines Schalterpols gemessenen Ueberspannungen. Die in Fig. 7 und 8 dargestellten Ueberspannungen geben ein Mass für die Beanspruchung der Isolation des Transformators gegen Erde beim Abschalten im Leerlauf. Dazu kommt nun allerdings im Moment jeder Rückzündung im Schalter eine stossweise bzw. sprungwellenartige Beanspruchung der Wicklung. Außerdem ist durch

spruchung der Isolation des Transformators gegen Erde beim Abschalten im Leerlauf. Dazu kommt nun allerdings im Moment jeder Rückzündung im Schalter eine stossweise bzw. sprungwellenartige Beanspruchung der Wicklung. Außerdem ist durch

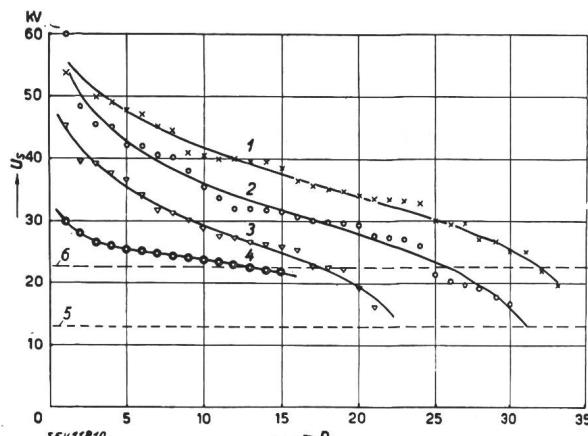


Fig. 8.

Häufigkeit verschieden hoher Abschalt-Ueberspannungen am Drehstrom-Transformator bei 16,5 kV Betriebsspannung, 50 Hz

- n Anzahl Ueberspannungen aller drei gemessenen Phasen, die den Ordinatenwert erreichten oder überstiegen.
Kurvenbezeichnung wie Fig. 7.

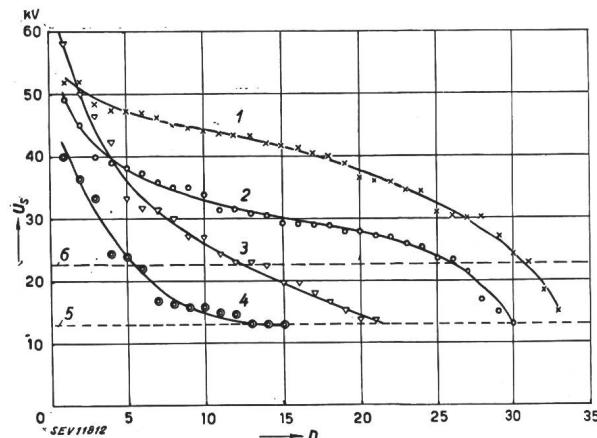


Fig. 10.

Häufigkeit verschieden hoher Abschalt-Ueberspannungen über den öffnenden Schalterpol, bei Drehstrom 16,5 kV, 50 Hz
n Anzahl Ueberspannungen aller drei gemessenen Phasen, die den Ordinatenwert erreichten oder überstiegen.
Kurvenbezeichnung wie Fig. 7.

die häufige Wiederholung dieser Rückzündung in rascher Folge eine Art stossweise mittelfrequente Erregung der Wicklung möglich.

D. Messungen im Einphasenbetrieb 16^{2/3} Hz

Das Prinzipschema dieser Messungen geht aus Fig. 11 hervor. Derselbe Transformator 3 wird auf seiner 49-kV-Seite mit 16 kV, 16^{2/3} Hz einphasig gespiesen. Auf die Schienen arbeiten 3 Generatoren zu je 2500 kVA; an den gleichen Sammelschienen befinden sich die beiden abgehenden Speiseleitungen nach Thun (SBB) und Spiez (BLS). Phase «grün» ist erst in diesen Bahnhöfen an das Geleise geerdet. Die Meßstellen befinden sich transformator- und sammelschienenseitig des Versuchsschalters. Außerdem wurde die Spannung über die Schalterpole direkt mit dem KO gemessen. Da

sich die Spannung der am Bahngleise geerdeten Phase «grün» als nicht interessant erwies, wurde an deren Stelle der Leerlaufstrom mit dem KO registriert. Für die Spannungsmessungen fanden die gleichen kapazitiven Spannungsteiler wie für 50 Hz Verwendung; für die Strommessung wurde der für Ableiteruntersuchungen gebaute Strom-

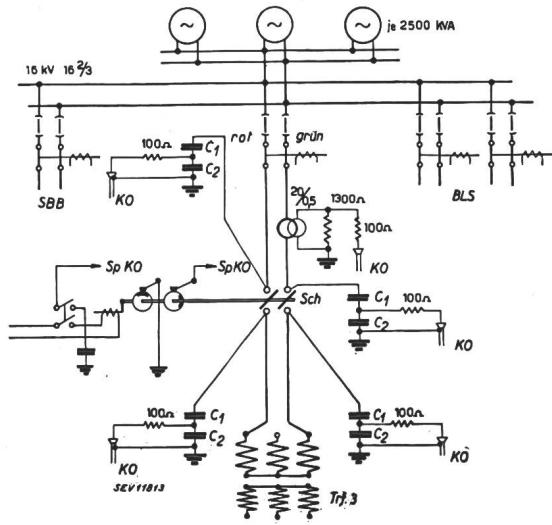


Fig. 11.

Prinzipschema der Versuche in der Einphasenstrom-Bahnanlage
16 kV, 16⅔ Hz

Trf. 3 Versuchstransformator.

Sch Versuchsschalter.

KO Zuleitungen zum Kathodenstrahl-Oszillographen.

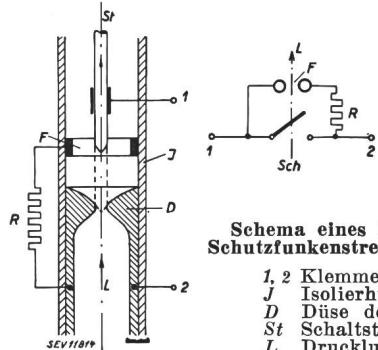


Fig. 12.

Schema eines Druckluftschalters mit Schutzfunkenstrecke *F* und Widerstand *R*

- 1, 2 Klemmen des Schalters.
- J Isolierhüle.
- D Düse des Schalters.
- St Schaltstift.
- L Druckluft.

wandler 20/0,5 A der FKH benutzt. Für die Versuche wurden folgende Schalter verwendet:

- la Einpoliger Druckluftschalter, Fabrikat A, ohne Widerstand, 7...9 kg/cm².
- lb Zweipoliger Druckluftschalter, Fabrikat A, ohne Widerstand, 7...9 kg/cm².
- 2a Einpoliger Druckluftschalter, Fabrikat B, ohne Widerstand, 12...16 kg/cm².
- 2b Zweipoliger Druckluftschalter, Fabrikat B, ohne Widerstand, 12...16 kg/cm².
- 3a Einpoliger Druckluftschalter, Fabrikat C, mit ca. 30 Ohm Widerstand, 7...9 kg/cm².
- 3b Zweipoliger Druckluftschalter, Fabrikat C, mit ca. 30 Ohm Widerstand, 7...9 kg/cm².

Das Schema des Schalters mit Widerstand (Fabrikat C) ist in Fig. 12 gezeichnet. Die Funkenstrecke *F* ist in der Dämpfungskammer des Schalters eingebaut.

Die Resultate der insgesamt 30 Messungen beim Leerabschalten des Transformators aus dem Ein-

phasenbetrieb 16⅔ Hz sind in Fig. 13...16 dargestellt. Als Abszisse ist stets die Anzahl Schaltungen gewählt, als Ordinate die grösste Schaltüberspannung gegen Erde (Fig. 13 und 14) oder die grösste Ueberspannung über einen Schalterpol (Fig. 15 und 16). Da die Ueberspannungen beträchtliche Werte erreichen, musste die Anzahl Schaltungen beschränkt werden.

E. Diskussion der Resultate, Folgerungen

Aus den insgesamt 40+30 Leerschaltungen, bzw. den zugehörigen Oszillogrammen ergeben sich folgende wichtigsten Resultate:

1. Die Höchstwerte der gemessenen Abschaltüberspannungen bei den 40 Schaltungen bei 50 Hz und 30 Schaltungen bei 16⅔ Hz betragen:
 - a) bei 50 Hz und Schaltung mit Oelschalter ca. 30 kV Scheitelwert am Transformator und 40 kV über den Schalterpol,
 - b) bei 50 Hz und Schaltung mit Druckluftschalter ohne Widerstand ca. 45...60 kV Scheitelwert am Transformator und 50...60 kV über den Schalterpol,
 - c) bei 50 Hz und Schaltung mit Druckluftschalter mit Widerstand ca. 54 kV Scheitelwert am Transformator und 40 kV über den Schalterpol,
 - d) bei 16⅔ Hz und Schaltung mit Druckluftschalter ohne Widerstand ca. 68...105 kV Scheitelwert am Transformator und 70...100 kV über den Schalterpol,
 - e) bei 16⅔ Hz und Schaltung mit Druckluftschalter mit Widerstand ca. 61...74 kV Scheitelwert am Transformator und 65...68 kV über den Schalterpol,

oder in Vielfachen des Scheitelwertes der mittleren Betriebsspannung (Effektivwert $U_B = 16,5 \text{ kV}$, Scheitelwert $u_{SB} = 16,5 \sqrt{2} \text{ kV}$):

- a) bei 50 Hz und Schaltung mit Oelschalter ca. 1,3 u_{SB} am Transformator und 1,7 u_{SB} über den Schalterpol,
- b) bei 50 Hz und Schaltung mit Druckluftschalter ohne Widerstand ca. (1,9...2,6) u_{SB} am Transformator und (2,1...2,6) u_{SB} über den Schalterpol,
- c) bei 50 Hz und Schaltung mit Druckluftschalter mit Widerstand ca. 2,3 u_{SB} am Transformator und 1,7 u_{SB} über den Schalterpol,
- d) bei 16⅔ Hz und Schaltung mit Druckluftschalter ohne Widerstand ca. (2,9...4,5) u_{SB} am Transformator und (3,0...4,3) u_{SB} über den Schalterpol,
- e) bei 16⅔ Hz und Schaltung mit Druckluftschalter mit Widerstand ca. (2,6...3,2) u_{SB} am Transformator und (3,0...4,3) u_{SB} über den Schalterpol.

Diese Höchstwerte würden sehr wahrscheinlich mit vermehrter Anzahl Versuche noch steigen, weil die Anzahl Versuche pro Schalttyp recht klein ist und nur schon durch die zufällige Lage des Momentes der Kontaktöffnung bezüglich der

Phase der Wechselspannung eine beträchtliche Streuung der Zahlenwerte zu erwarten ist (siehe Kurvendarstellungen).

2. Alle Druckluftschalter ohne Widerstand ergeben grössere Leerschaltüberspannungen als der untersuchte Oelschalter¹⁾.

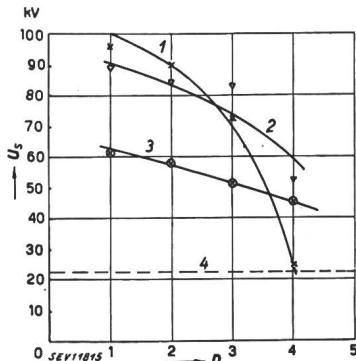


Fig. 13.

Fig. 13. Häufigkeit verschieden hoher Abschalt-Ueberspannungen am Transistor im Einphasennetz 16 kV, 16⅔ Hz

- 1 Einpoliger Druckluftschalter, Fabrikat A, ohne Widerstand, 7...9 kg/cm² Betriebsdruck.
 - 2 Einpoliger Druckluftschalter, Fabrikat B, ohne Widerstand, 12...16 kg/cm² Betriebsdruck.
 - 3 Einpoliger Druckluftschalter, Fabrikat C, mit ca. 30 Ω Widerstand, 7...9 kg/cm² Betriebsdruck.
 - 4 Scheitelwert der Betriebsspannung.
- n Anzahl Schaltungen, welche Ueberspannungen gleich oder grösser als Ordinatenwert ergaben.

Fig. 14. Wie Fig. 13, aber mit zweipoligen Druckluftschaltern gemessen

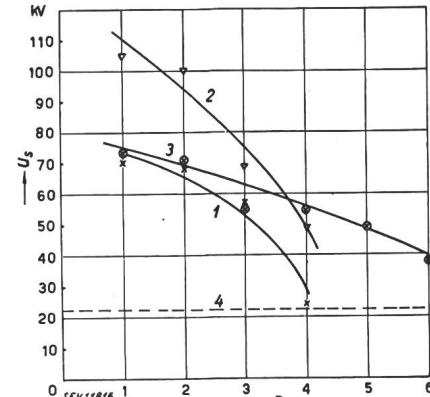


Fig. 14.

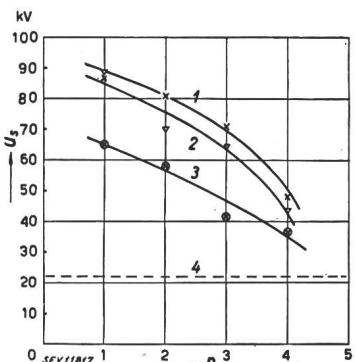


Fig. 15.

Fig. 15. Häufigkeit verschieden hoher Abschalt-Ueberspannungen zwischen den Kontakten eines Schalterpols, bei der Transistor-Abschaltung im Einphasennetz 16 kV, 16⅔ Hz

- 1 Einpoliger Druckluftschalter, Fabrikat A, ohne Widerstand, 7...9 kg/cm² Betriebsdruck.
 - 2 Einpoliger Druckluftschalter, Fabrikat B, ohne Widerstand, 12...16 kg/cm² Betriebsdruck.
 - 3 Einpoliger Druckluftschalter, Fabrikat C, mit ca. 30 Ω Widerstand, 7...9 kg/cm² Betriebsdruck.
 - 4 Scheitelwert der Betriebsspannung.
- n Anzahl Schaltungen, welche Ueberspannungen gleich oder grösser als Ordinatenwert ergaben.

Fig. 16. Wie Fig. 15, aber mit zweipoligem Druckluftschalter gemessen

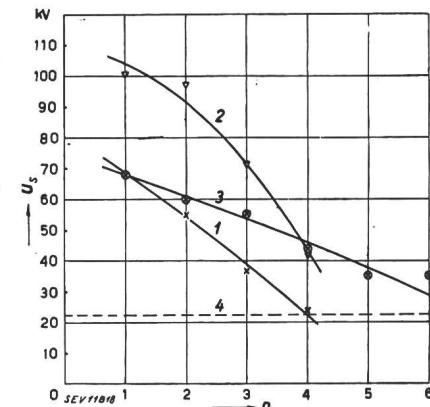


Fig. 16.

3. Die Ueberspannungen wachsen unter sonst gleichen Verhältnissen bei ein und demselben Druckluftschalter mit dem angewendeten Blasdruck. Dagegen ist bei verschiedenen Fabrikaten, die für verschiedene Betriebsdrücke gebaut sind, die Schaltüberspannung nicht wesentlich verschieden.

4. Beim Leerschalten mit Druckluftschalter bei 16⅔ Hz entstehen wesentlich grössere Ueberspannungen als bei 50 Hz. Bei 16⅔ Hz erreichen die grössten Schaltüberspannungen gerade die Stossüberschlagsspannung der in der 16-kV-Anlage verwendeten Isolatoren (ca. 106 kV Scheitelwert).

5. Die Anzahl Rückzündungen bei der Leerabschaltung ist beim Oelschalter viel grösser als bei den Druckluftschaltern. Einmal folgen sich die Rückzündungen rascher und bei kleinerer Rückzündspannung; ferner ziehen sie sich über mehrere Halbperioden der Betriebsfrequenz hin. Beim Luftschalter vollzieht sich die Abschaltung innert

¹⁾ Ueber das Verhalten der Druckluftschalter ohne Widerstand erlauben obige Versuche genauere Schlüsse als der während der Durchführung der vorliegenden Arbeit erschienene Aufsatz von W. Luchsinger in den Brown Boveri Mitt. vom August 1942, S. 196...197.

der Zeit einer Halbperiode (0,01 bzw. 0,033 s), welche Zeitspanne allerdings auf 2 Halbperioden des Leerlaufstroms verteilt sein kann.

6. Die Höhe der Rückzündspannung steigt beim Luftschalter vom Moment der Kontaktöffnung an ungefähr proportional mit der Zeit, und zwar mit

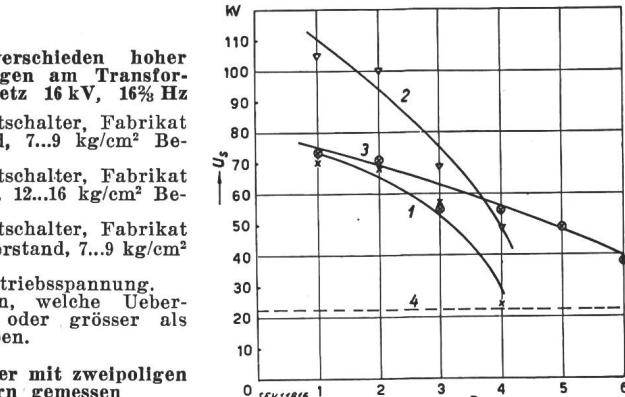


Fig. 14.

Fig. 15. Häufigkeit verschieden hoher Abschalt-Ueberspannungen zwischen den Kontakten eines Schalterpols, bei der Transistor-Abschaltung im Einphasennetz 16 kV, 16⅔ Hz

- 1 Einpoliger Druckluftschalter, Fabrikat A, ohne Widerstand, 7...9 kg/cm² Betriebsdruck.
 - 2 Einpoliger Druckluftschalter, Fabrikat B, ohne Widerstand, 12...16 kg/cm² Betriebsdruck.
 - 3 Einpoliger Druckluftschalter, Fabrikat C, mit ca. 30 Ω Widerstand, 7...9 kg/cm² Betriebsdruck.
 - 4 Scheitelwert der Betriebsspannung.
- n Anzahl Schaltungen, welche Ueberspannungen gleich oder grösser als Ordinatenwert ergaben.

Fig. 16. Wie Fig. 15, aber mit zweipoligem Druckluftschalter gemessen

einem Tempo a , das bei den untersuchten Schaltern folgende Werte aufweist:

- beim Druckluftschalter mit 3...16 kg/cm² Betriebsdruck $a = 5...20 \text{ kV/ms}$, bzw. $5...20 \text{ V/}\mu\text{s}$,
- beim Oelschalter $a = 0,5...1 \text{ kV/ms}$ bzw. $0,5...1 \text{ V/}\mu\text{s}$.

7. Beim einpoligen Schalter des Fabrikates C hat der am Schalter angebaute Widerstand eine wesentliche Reduktion der Schaltüberspannung zur Folge. Diese Eigenschaft kommt in den Oszillogrammen noch deutlicher zum Ausdruck als in den Ueberspannungshöhen. Sie hängt weniger mit der Grösse des Schutzwiderstandes als mit der Einstellung der dem Widerstand vorgeschalteten, in der Dämpferkammer des Druckluftschalters angebrachten Schutzfunkenstrecke zusammen. Diese begrenzt die Spannung zwischen den Schalterklemmen auf einen vom Druck und der Blasung in der Dämpferkammer abhängigen Höchstwert der Rückzündspannung. Die Spannung am Transformator, als Summe der Sammelschienenspannung plus der Spannung über den Schalter, kann höchstens um die Betriebsspannung grösser sein als die Ansprechspannung dieser inneren Schutzfunkenstrecke.

8. Die Abschaltüberspannung tritt stets nur transformatorseitig des Schalters und über den Schalter, nie sammelschienenseitig desselben auf. Sie kann somit im schlimmsten Fall einen Ueberschlag des Transformators während der Leerabschaltung erzeugen, der diesen auf höchstmögliche Stoßspannung beansprucht. Ein Kurzschluss wird jedoch im allgemeinen nicht entstehen.

9. Wenn zur Verhinderung zu hoher Schaltüberspannungen Ableiter verwendet werden, so müssen diese transformatorseitig des Schalters eingebaut sein und die magnetische Energie des Transformators aufnehmen können. Diese betrug im vorliegenden Fall ($A = \frac{1}{2} i_0^2 \cdot L$) bei normaler Sättigung:

bei 50 Hz: $i_0 \simeq 10\sqrt{2}$ A, $L \simeq 6,1$ H, $A = 610$ Ws
bei $16\frac{2}{3}$ Hz: $i_0 \simeq 3,5\sqrt{2}$ A, $L \simeq 51$ H, $A = 610$ Ws.

10. Aus den Versuchen ergibt sich, dass der Frage der Schaltüberspannungen beim Abschalten kleiner induktiver Ströme erhöhte Bedeutung kommt für Schalter mit Fremdbeblasung, d. h.

solcher, bei denen die Lichtbogenlöschung unter Verwendung stromunabhängiger Fremdenergie, wie Druckluft, Drucköl usw. erzwungen wird. Dies gilt insbesondere bei tiefer Betriebsfrequenz, d. h. in Bahnstromnetzen.

Für den Betriebsleiter folgt daraus erneut die grosse Bedeutung reichlicher Isolation für den Betrieb. Für den Konstrukteur stellt sich anderseits die Frage, durch welche Mittel und in welchem Mass die Vermeidung dieser Ueberspannungen sich wirtschaftlich erreichen lässt, wobei vor allem an die Reduktion des Wertes a bei Leerschaltungen oder an die günstigste Einstellung und kleinste Streuung von Schalter-Schutzfunkenstrecken mit Widerstand zu denken ist. Gelingt dies nicht, so muss für solche Schalter zur Verwendung von Ableitern Zuflucht genommen oder mit dem gelegentlichen Auftreten von Ueberschlägen transformatorseitig um so eher gerechnet werden, je kleiner die Betriebsfrequenz und je grösser Betriebsspannung und Leerlaufstrom sind.

Eine rechnerische Bearbeitung der Vorgänge beim Abschalten wird folgen.

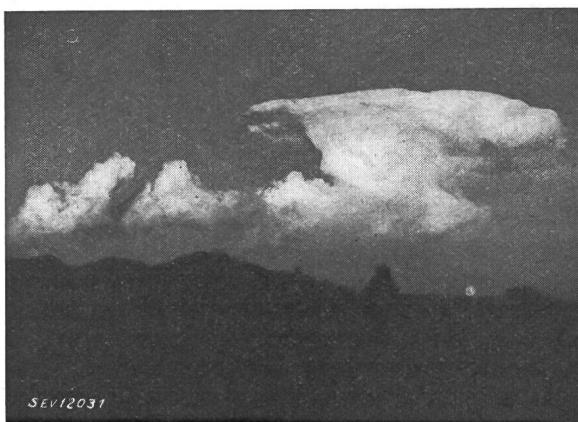


Fig. 1.

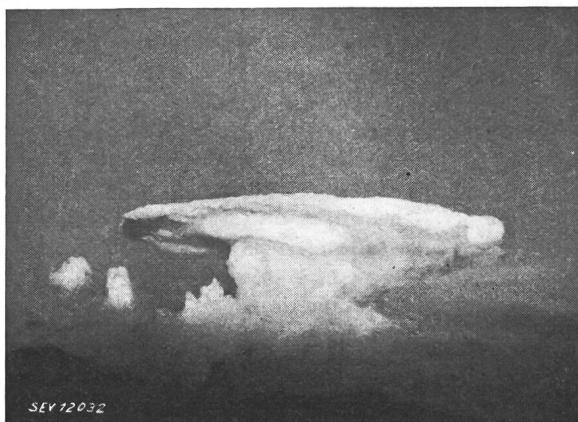


Fig. 2.

Gewittererscheinungen

551.515.4

Aus Anlass eines Vortrages über Gewitter und Blitze vor der Technischen Gesellschaft Zürich mit Bericht in der NZZ vom 14. Juni 1944 sind dem Unterzeichneten von Dr. R. G. Legler in Zürich in freundlicher Weise 3 Photographien zugestellt worden, die mit kaum zu übertreffender Deutlichkeit die Bildung eines pilzförmigen Gewitter-Cumulus zeigen. Es handelt sich um eine abendliche Gewitterwolke am ca. 400 m hohen Monte Misma zwischen Iseosee und Bergamo in Oberitalien. Im Stiel des Pilzes liegt nach der Theorie von Lenard-Simpson bei genügend starkem Aufwind der Kern der atmosphärischen «Dynamomaschine». *K. Berger.*

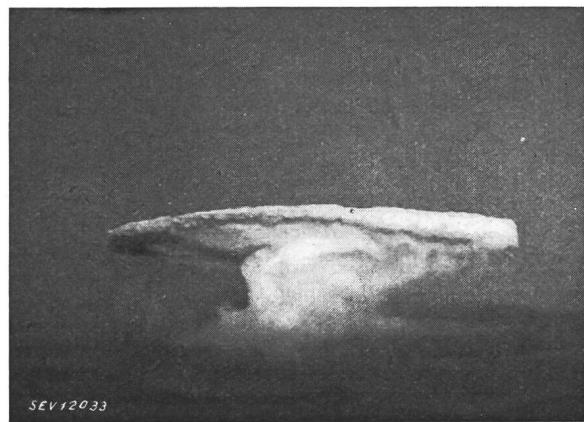


Fig. 3.