

**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

Sonder-Abdruck
aus dem Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Jahrgang 1944

1944

A.-G. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zürich

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 $16\frac{2}{3}$ Hz durchgeführt. Dabei wurden Druckluft- und Oelschalter verschiedener Fabrikate verwendet. Alle Druckluftschalter ohne Widerstand ergaben grössere Leerschaltüberspannungen als der untersuchte Oelschalter. Die Zahl der Rückzündungen bei der Leerabschaltung war am Oelschalter bedeutend grösser als an den Druckluftschaltern. Die Messungen lassen erkennen, dass Ueberspannungsableiter, die zur Verhinderung zu hoher Schaltüberspannungen dienen sollen, zwischen Druckluftschalter 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 $16\frac{2}{3}$ 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 coupage d'atteindre des valeurs trop élevées doivent être montés entre le disjoncteurs 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 ($16\frac{2}{3}$ 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-Bahnnetz ($16\frac{2}{3}$ 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, $16\frac{2}{3}$ 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.

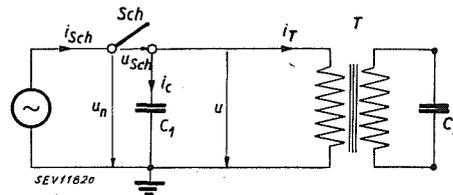


Fig. 1.

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 Oeffnen 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 Transformators 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

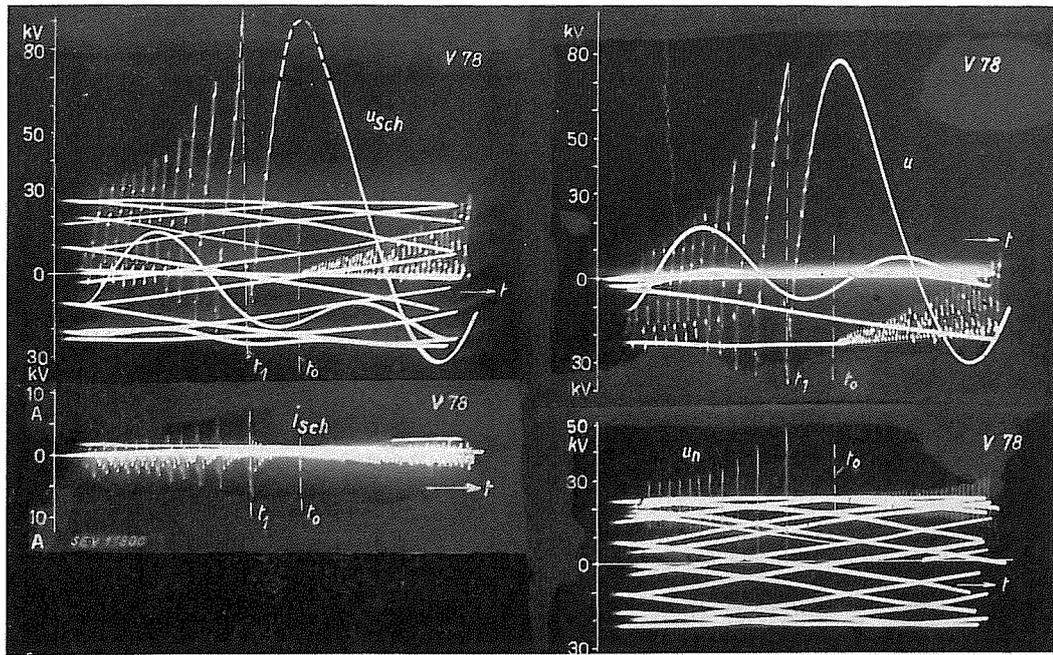


Fig. 2a.

Fig. 2.

Drei Oszillogrammbeispiele der einphasigen Leer-Abschaltung mit Druckluftschalter (Bahnnetz 16 kV, 16 $\frac{2}{3}$ Hz)
 u Spannung am Transformator.
 i_{Sch} Strom im Schalter.
 u_n Spannung des Netzes.
 t_0 Moment der Kontaktöffnung.
 t_1 Ende der Abschaltung.

Fig. 2a und 2b: Schalter ohne Schutz-Widerstand.
 Fig. 2c: Schalter mit Schutz-Widerstand.

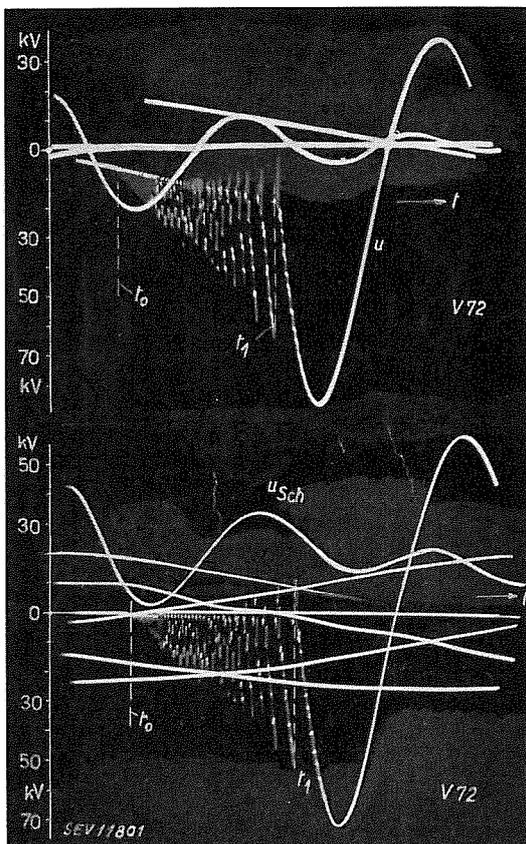


Fig. 2b.

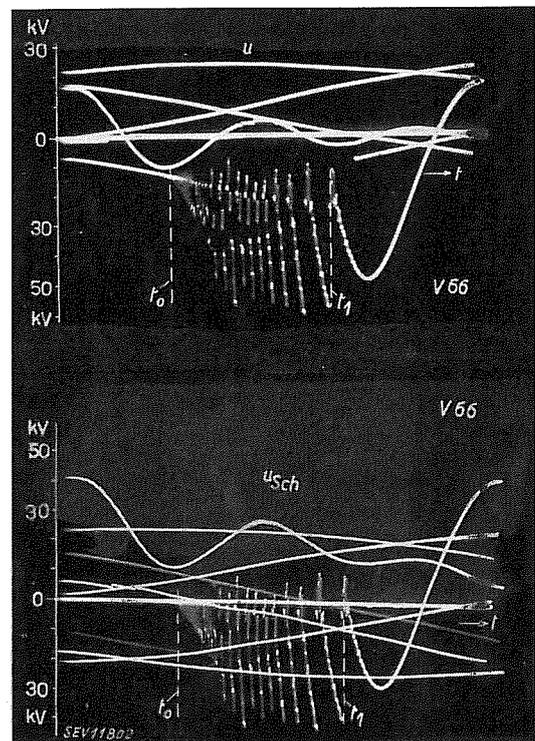


Fig. 2c.

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

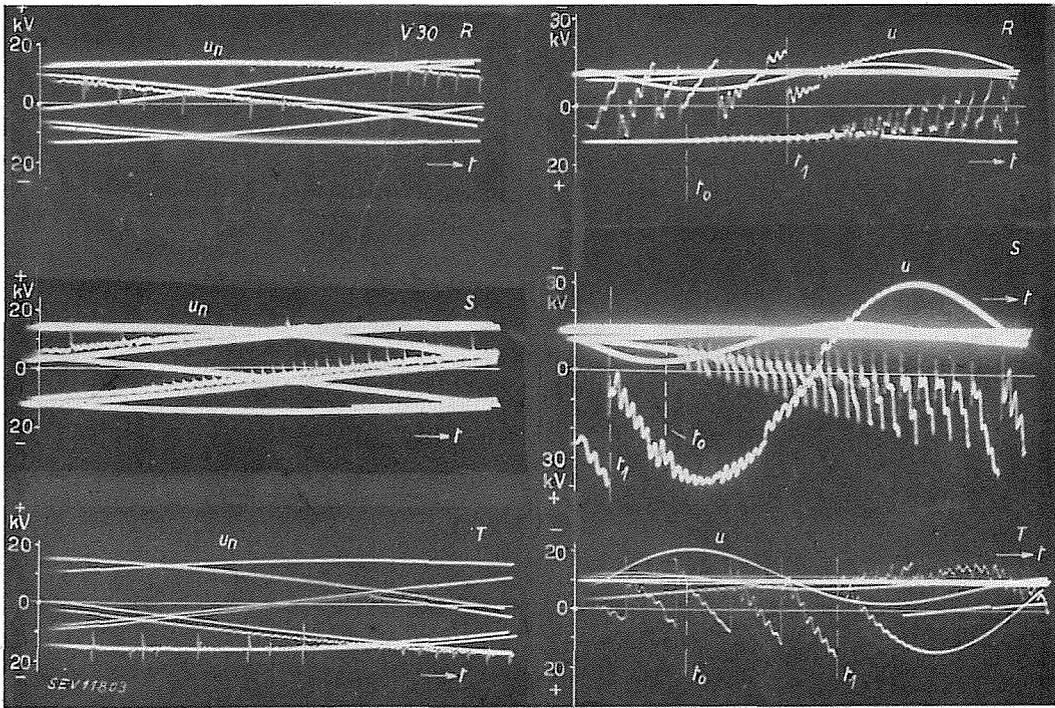


Fig. 3a.

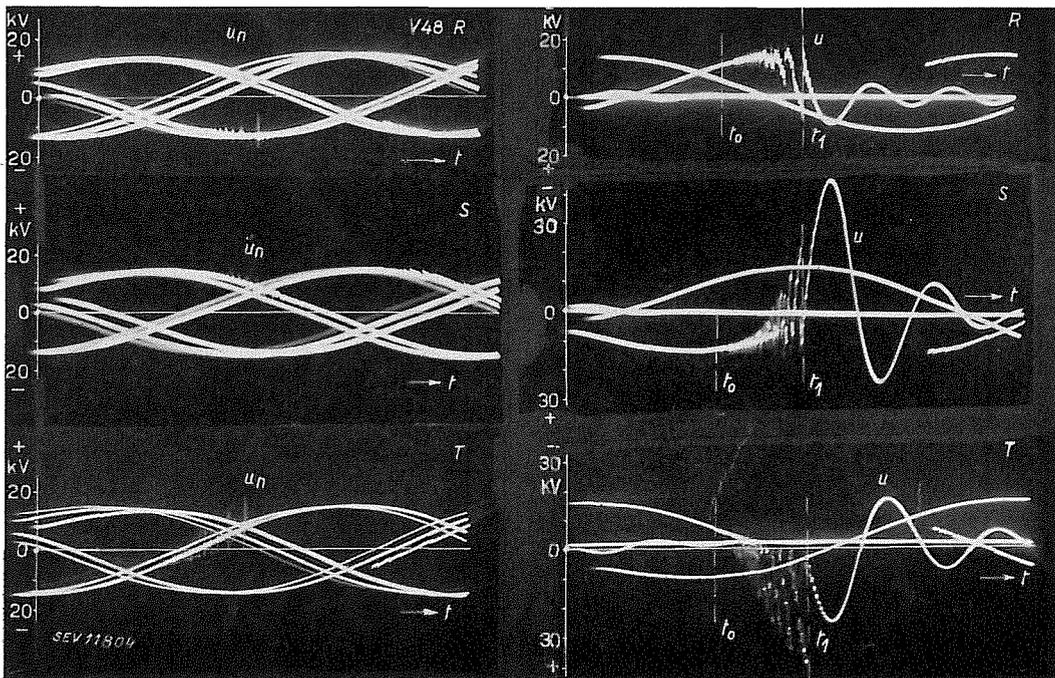


Fig. 3b.

Fig. 3.
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 Zün-

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

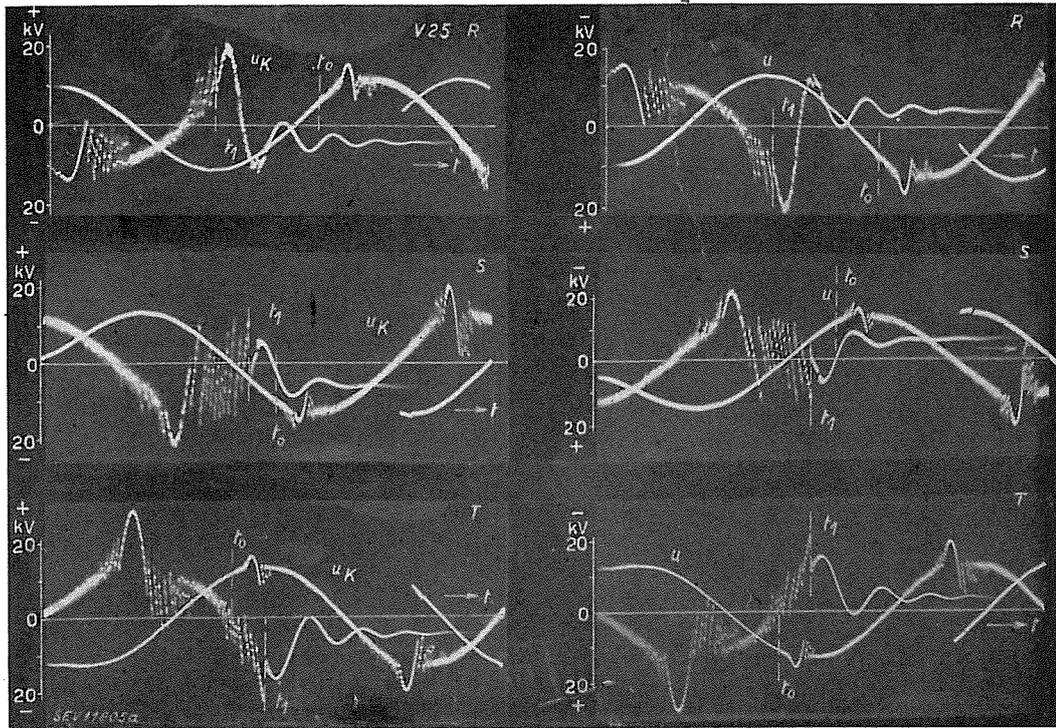


Fig. 4a.

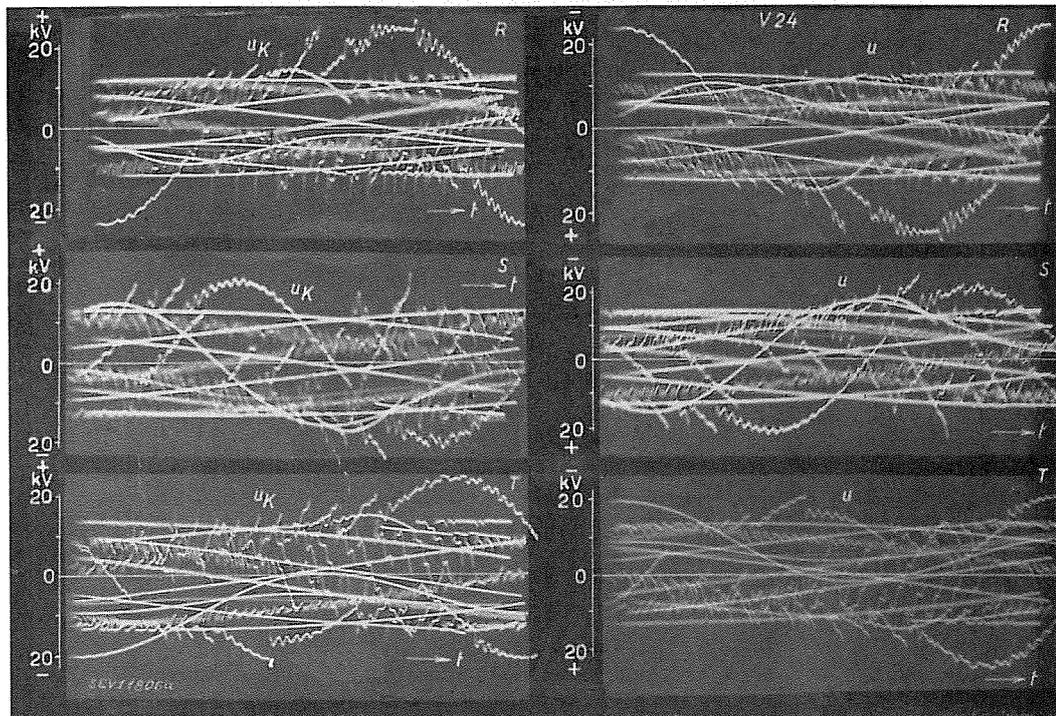


Fig. 4b.

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). i_0 Moment der Kontaktöffnung.
 u_K Spannung vor dem Kabel zum Transformator (Meßstelle M_{IV} 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 Ladenspannung 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 Transformatorenstreuung mit der Oberspannungskapazität C_2 herrühren.

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 Sammelschienenspannung 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 ungedämpfter 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 Luftschalter.

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 16/49 kV an der 16-kV-Sammelschiene. Ferner arbeiteten darauf 2 Generatoren G_2 und G_3 zu je 3400 kVA und 3 kleinere Generatoren $G_6...G_8$ 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 Anlagenteile 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 Teilern, 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 begrifflichen Gründen keinen merklichen Unterschied. Die Spannungen

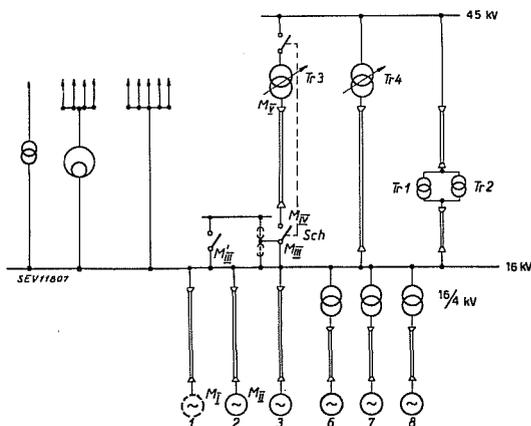


Fig. 5.

Prinzipschema der Versuche in der Drehstromlage 16 kV, 50 Hz
Tr. 3 Versuchstransformator.
Sch Versuchsschalter.
M₁ ... M_v 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.

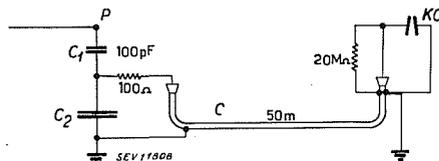


Fig. 6.

Einpoleiges 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 benützt:

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 Drehstromtransformators 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),

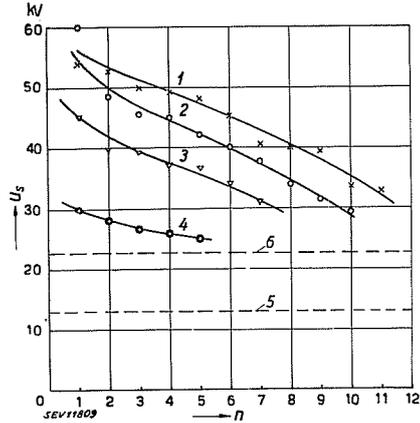


Fig. 7.

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 Oeischalter, 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.

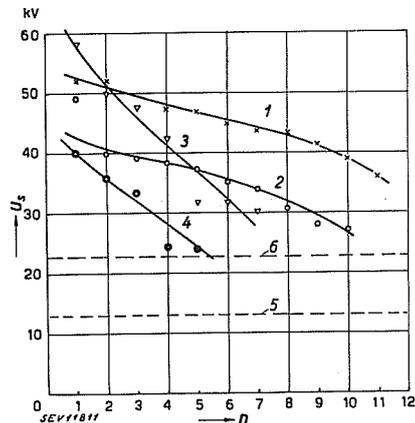


Fig. 9.

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

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

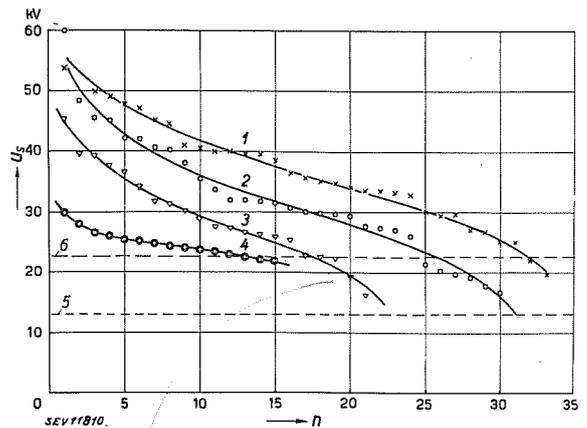


Fig. 8.

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.

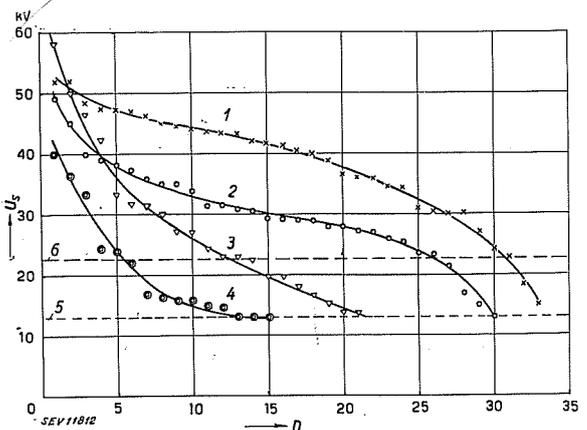


Fig. 10.

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 16²/₃ Hz

Das *Prinzipschema* dieser Messungen geht aus Fig. 11 hervor. Derselbe Transformator 3 wird auf seiner 49-kV-Seite mit 16 kV, 16²/₃ Hz einphasig gespeisen. 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 Bahngeleise 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-

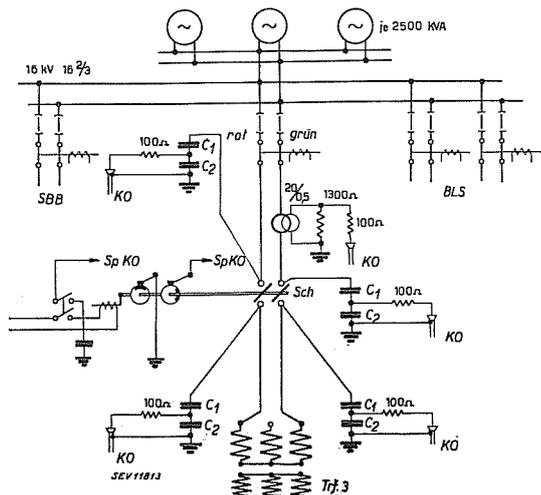


Fig. 11.

Prinzipisches Schema der Versuche in der Einphasenstrom-Bahnanlage
16 kV, 16 2/3 Hz

Trf. 3 Versuchstransformator.

Sch Versuchsschalter.

KO Zuleitungen zum Kathodenstrahl-Oszillographen.

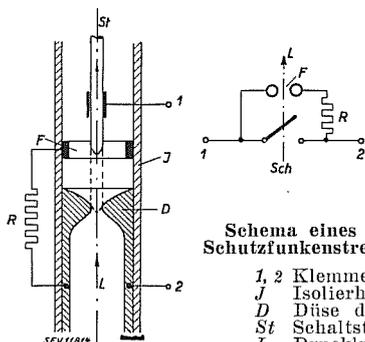


Fig. 12.

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

1, 2 Klemmen des Schalters.

J Isolierhülle.

D Düse des Schalters.

St Schaltstift.

L Druckluft.

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

- 1a Einpoliger Druckluftschalter, Fabrikat A, ohne Widerstand, 7...9 kg/cm².
- 1b 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 16 2/3 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 16 2/3 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 16 2/3 Hz und Schaltung mit Druckluftschalter ohne Widerstand ca. 68...105 kV Scheitelwert am Transformator und 70...100 kV über den Schalterpol,
- e) bei 16 2/3 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 $U_B = 16,5$ kV, Scheitelwert $u_{SB} = 16,5 \sqrt{2}$ 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 16 2/3 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 16 2/3 Hz und Schaltung mit Druckluftschalter mit Widerstand ca. $(2,6...3,2) u_{SB}$ am Transformator und $(2,8...3,9) u_{SB}$ über den Schalterpol.

Diese Höchstwerte würden sehr wahrscheinlich mit vermehrter Anzahl Versuche noch steigen, weil die Anzahl Versuche pro Schaltertyp 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 ergaben grössere Leerschaltüberspannungen als der untersuchte Oelschalter¹⁾.

der Zeit einer Halbperiode (0,01 bzw. 0,033 s), welche Zeitdauer 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

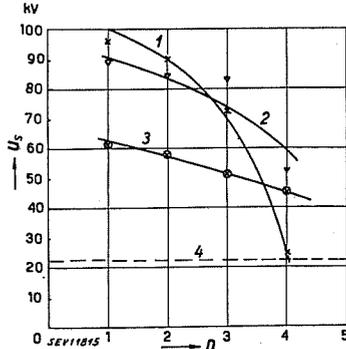


Fig. 13.

Fig. 13. Häufigkeit verschieden hoher Abschalt-Ueberspannungen am Transformator im Einphasennetz 16 kV, 16 $\frac{2}{3}$ 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.

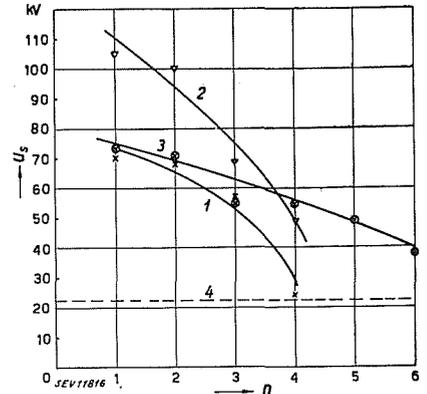


Fig. 14.

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

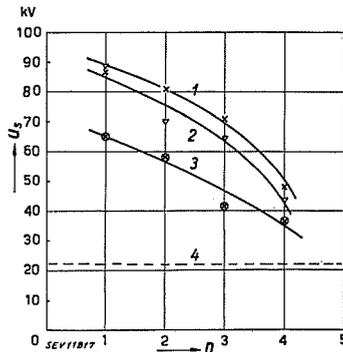


Fig. 15.

Fig. 15. Häufigkeit verschieden hoher Abschalt-Ueberspannungen zwischen den Kontakten eines Schalterpols, bei der Transformator-Abschaltung im Einphasennetz 16 kV, 16 $\frac{2}{3}$ 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 zweipoligen Druckluftschaltern gemessen

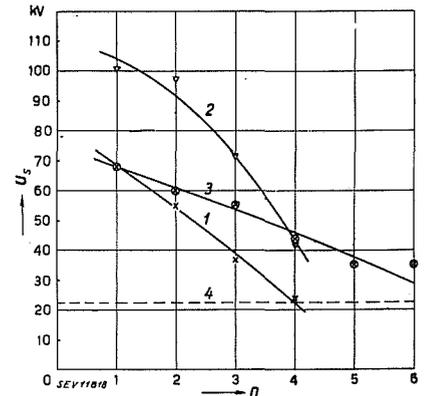


Fig. 16.

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 Betriebsdrucke gebaut sind, die Schaltüberspannung nicht wesentlich verschieden.

4. Beim Leerschalten mit Druckluftschalter bei 16 $\frac{2}{3}$ Hz entstehen wesentlich grössere Ueberspannungen als bei 50 Hz. Bei 16 $\frac{2}{3}$ Hz erreichen die grössten Schaltüberspannungen gerade die Stossüberschlagspannung 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

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

- a) beim Druckluftschalter mit 3...16 kg/cm² Betriebsdruck $\alpha = 5...20$ kV/ms, bzw. $5...20$ V/ μ s,
- b) beim Oelschalter $\alpha = 0,5...1$ kV/ms bzw. $0,5...1$ V/ μ 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.

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.

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: $i_0 \simeq 10 \sqrt{2} \text{ A}$, $L \simeq 6,1 \text{ H}$, $A = 610 \text{ Ws}$

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

10. Aus den Versuchen ergibt sich, dass der Frage der Schaltüberspannungen beim Abschalten kleiner induktiver Ströme erhöhte Bedeutung zukommt 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 Leerabschaltungen 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.