

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 44 (1953)

Heft: 9

Artikel: Überspannungen beim Schalten leerlaufender Transformatoren und Leitungen

Autor: Berger, K.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059933>

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: 22.01.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Überspannungen beim Schalten leerlaufender Transformatoren und Leitungen

Zusammengestellt von K. Berger, Zürich,

unter Mitwirkung eines Ausschusses des Fachkollegiums 17 A (Hochspannungsschalter) des Schweiz. Elektrotechnischen Komitees

621.316.542.027.3 : 621.314.2.015.3 + 621.315.1.015.3

Der Bericht enthält eine Zusammenfassung der Resultate von oszillographischen Messungen über die Grösse der Überspannungen, die beim Ausschalten leerlaufender Transformatoren und Leitungen in Hochspannungsanlagen entstehen. Die Messungen sind zum Teil von der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) in der Schweiz, zum Teil von schweizerischen Fabrikanten von Hochspannungsschaltern in ausländischen Anlagen durchgeführt worden. Die Zusammenstellung aller Messwerte erfolgte durch die FKH im Auftrage des Comité d'Etudes No 17 (Schalter) der CEI; der Bericht wurde diesem in seiner Sitzung von Scheveningen im Herbst 1952 vorgelegt.

Die Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) hat auf Anregung des Fachkollegiums 17A (Hochspannungsschalter) des Schweiz. Elektrotechnischen Komitees (CES) alle verfügbaren Messwerte von Überspannungen beim Schalten von leerlaufenden Transformatoren und Leitungen zusammengestellt. Diese Messungen stammen zum Teil aus Schaltversuchen in schweizerischen Hochspannungsanlagen, welche die FKH im Auftrag von Elektrizitätswerken durchführte. Weitere Messreihen sind von schweizerischen Fabrikationsfirmen für Hochspannungsschalter in ausländischen Anlagen durchgeführt worden. Der Bericht enthält alle diese uns zugänglichen Messwerte. Die Resultate des Berichtes wurden im Herbst 1952 in Scheveningen dem Comité d'Etudes No 17 der Commission Electrotechnique Internationale (CEI), vorgelegt, welches seinerzeit eine solche Information über die Höhe von Schaltüberspannungen gewünscht hatte. Sämtliche Messungen betreffen Hochspannungsschalter schweizerischen Ursprungs¹⁾.

Eine Liste der ausgeführten Messreihen mit Angaben über Anlage, Spannung, Transformatoren und Schalterart zeigt Tabelle I.

Die Resultate jeder Messreihe zeigen die Fig. 1...23, eine Zusammenfassung aller Resultate die Fig. 24 und 25.

Zu den *Figuren* ist zu bemerken, dass infolge der bekanntlich im allgemeinen grossen Streuung der Einzelwerte der Überspannungen es am besten ist, alle Einzelwerte als Messpunkte anzugeben. In den zusammenfassenden Tabellen dagegen ist lediglich der Streubereich der Messungen sowie der Mittelwert der gemessenen Überspannungen angegeben.

Ce rapport récapitule les résultats de mesures oscillographiques sur la grandeur des surtensions de déclenchement de transformateurs à vide et de lignes ouvertes dans des installations à haute tension. Ces mesures ont été exécutées en partie par la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH), en Suisse, et en partie par des fabricants suisses de disjoncteurs à haute tension dans des installations à l'étranger. Toutes ces mesures ont été collationnées par les soins de la FKH, sur demande du Comité d'Etudes no 17 (Appareils d'interruption de la CEI, auquel ce rapport a été présenté, lors de la réunion de Schéveningue, en automne 1952.

Bedeutung der in den Figuren 1...25 benützten Symbole und Bezeichnungen

A. Daten der Versuchsanlage

U_B Effektivwert der verketteten Netzspannung während der Versuche. Falls diese Spannung nicht genau bekannt ist, gilt die Nennspannung des Netzes.

f Netzfrequenz (50, 60 oder $16\frac{2}{3}$ Hz).

Art der Nullpunktserdung (NPE): direkt, isoliert oder über Löschspule.

P_{KS} ungefähre Kurzschlussleistung im speisenden Netzpunkt. Im Fall der Speisung aus einem separaten Transformator gilt die Kurzschlussleistung dieses Transformators.

B. Daten des im Leerlauf abgeschalteten Objektes

a) Transformator

Typ und Herstellungsjahr.

P_n Nennleistung.

$\ddot{u} = \frac{U_{\text{primär}}}{U_{\text{sekundär}}} :$ Leerlaufübersetzung. Im Falle eines Transformators mit Stufenregulierung: Stellung des Stufenschalters.

Transformator-Schaltung: Stern—Stern, Stern—Dreieck oder Dreieck—Stern.

ε Kurzschlußspannung in %.

I_s Magnetisierungsstrom in A für Leerlaufspannung, Effektivwert.

b) Leitungen

L Länge der Leitung in km (Länge des Leiters, wenn die Versuche auf nur einer Phase durchgeführt wurden).

I_c kapazitiver Ladestrom der Leitung in A (bzw. des Leiters, wenn nur einphasiger Versuch), Effektivwert.

¹⁾ Die Zusammenstellung ist im Herbst 1952 abgeschlossen worden; über weitere Messungen soll evtl. später berichtet werden.

Zusammenstellung der im Bericht angeführten Messreihen

1. Messreihen über Schaltüberspannungen beim Ausschalten von Transformatoren

Tabelle Ia

Ort der Messung	Spannung der Anlage kV	Frequenz Hz	Art des verwendeten Schalters	Leistung des ausgeschalteten Transformators MVA	Messresultate in Fig.
Siebnen	50	50	Ölschalter (Kesselschalter) . . .	16,5	1
Siebnen	150	50	Ölschalter (Kesselschalter) . . .	16,5	2
Bickigen	150	50	Ölschalter (Kesselschalter) . . .	3 × 15	3
Bickigen	150	50	Ölstrahlschalter	3 × 15	4
Bickigen	50	50	Ölstrahlschalter	3 × 15	5
Laufenburg	50	50	Druckluftschalter	5,75	6
Laufenburg	6	50	Druckluftschalter	5,75	7
Rempen	50	50	Ölstrahlschalter	16,5	8
Bottmingen	50	50	Ölstrahlschalter	23,3	9
Bottmingen	150	50	Druckluftschalter	23,3	10
Bottmingen	150	50	Ölärmer Schalter	23,3	11
Bottmingen	150	50	Ölärmer Schalter	23,3	12
Bottmingen	50	50	Ölstrahlschalter	23,3	13
Grüze	15	16½/3	Ölstrahlschalter und Ölschalter . .	3...9	14
Stadsforsen	220	50	Druckluftschalter	(2...66 A)	15

2. Messreihen über Schaltüberspannungen beim Ausschalten von Leitungen

Tabelle Ib

Ort der Messung	Spannung der Anlage kV	Frequenz Hz	Art des verwendeten Schalters	Länge der ausgeschalteten Leitung km	Freileitung F oder Kabel K	Messresultate in Fig.
Siebnen	150	50	Ölschalter	8 und 45	F	16
Bickigen	150	50	Ölstrahlschalter und Ölschalter . .	25	F	17
Grand Coulee	230	60	Druckluftschalter	(1...3) × 160	F	18
Fontenay	220	50	Druckluftschalter	136...828	F	19
Fallou	220	50	Ölärmer Schalter	20...240	F	20
Fontenay	220	50	Ölstrahlschalter	18...420	F	21
St. Johann	110	50	Ölstrahlschalter	35 + 16	F + K	22
Stadsforsen	220	50	Druckluftschalter	72 und 480	F	23

C. Daten des Schalters

Typ und Herstellungsjahr.

U_n Nennspannung.

P_{KS} Abschaltleistung.

n Anzahl der Unterbrechungsstellen pro Phase.

p Betriebsdruck der Luft bei Druckluftschaltern.

v Öffnungsgeschwindigkeit der Kontakte bei Öl-schaltern.

R Widerstandswert in Ohm der im Stromkreis liegenden Widerstände der Schalter, die die Löschung in 2 Operationen bewerkstelligen. [Ein Strich (—) bedeutet: Schalter ohne Widerstand.]

D. Überspannungen

Sofern nicht andere Angaben gemacht werden, sind alle Überspannungen mit dem Kathodenstrahl-Oszillographen mit Hilfe kapazitiver Spannungs-teiler gemessen worden.

Die Ausschaltüberspannung ist die höchste Spannung gegen Erde (u_{max} , momentaner Spitzen- oder Scheitelwert) gemessen im Verlaufe einer vollständigen Ausschaltoperation des Schalters. Der Ausschaltvorgang beginnt mit dem Speisen der Auslösespule des Schalters und ist beendet, wenn die Ausgleichs-spannungen zwischen den drei Phasen verschwunden sind.

In den Fig. 1...25 ist jede Überspannung gra-phisch dargestellt durch ihren Relativwert, bezogen

auf den Scheitelwert der betriebsfrequenten Pol-(Phasen-)Spannung, ausgedrückt durch den Faktor k .

Für jede aufgenommene Abschaltung ist der Faktor k gemessen worden für jede der Phasen R , S und T . Sie sind in den Darstellungen der Fig. 1...23 entsprechend bezeichnet.

Beim Abschalten leerlaufender Transformatoren sind die Überspannungsfaktoren sowohl an den Klemmen der Primär- (k_{Pr}) als auch an denjenigen der Sekundär- (k_{sek}) Spannung bestimmt worden. Beim Abschalten leerlaufender Leitungen sind die Überspannungsfaktoren für die Leitungsseite (k_L) und für die Netzseiten (k_N) (im Falle der direkten Speisung aus dem Netz) bzw. für die Transformator-seite (k_T) (im Falle der Speisung der Leitung durch einen einzelnen Transformator) bestimmt worden.

Die verkettete Netzspannung im Moment der Ausschaltung wurde grösstenteils bestimmt durch Multiplikation des Mittelwertes der drei Spannungen gegen Erde mit $\sqrt{3}$. Die Phasenspannung wurde aus dem Scheitelwert, aufgenommen auf dem Oszillo-gramm vor dem Öffnen der Kontakte, durch Dividieren mit $\sqrt{2}$, bestimmt. Bei nicht sinusförmiger Spannungskurve können die so erhaltenen Werte um einige Prozent vom wirklichen Effektivwert abweichen. Dasselbe gilt für die Ströme.

Die Definitionen der Überspannungsfaktoren und die Symbole, die in den Darstellungen erwähnt wurden, sind die folgenden:

$k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$	Überspannungsfaktor auf der Primärseite des Transformators	bei der Abschaltung eines leerlaufenden Transformators	m	Anzahl der bei gleichen Bedingungen untersuchten Abschaltungen
$k_{Sek} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}} \ddot{u}$	Überspannungsfaktor auf der Sekundärseite des Transformators		•	Überspannung begrenzt durch das Ansprechen eines Überspannungsableiters.
$k_L = \frac{u_{max L}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$	Überspannungsfaktor auf Leitungsseite	bei der Abschaltung leerlaufender Leitungen	•	Überspannung begrenzt durch Überschlag einer Klemme auf Erde
$k_N = \frac{u_{max N}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$	Überspannungsfaktor auf Seite des speisenden Netzes		•	Überspannung ruft einen Überschlag zwischen benachbarten Klemmen her vor
$k_T = \frac{u_{max T}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$	Überspannungsfaktor auf Seite des speisenden Transformators	Polspannung, Scheitelwert Mittel der drei Phasen	•	
$U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}$			•	

Resultate

Die Resultate der Messreihen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Der Vergleich der Tabellen der Fig. 24 und 25 zeigt zunächst, dass die Überspannungen beim Leerschalten von Transformatoren wesentlich grösser sind als jene beim Leerschalten von Leitungen. Die ersten erstrecken sich gemäss Fig. 24 auf 1...6,05-fache geschaltete Phasenspannung. Die grössten Überspannungen beim Leerschalten von Transfor-

Messungen Siebnen, 50 kV

A. Netz

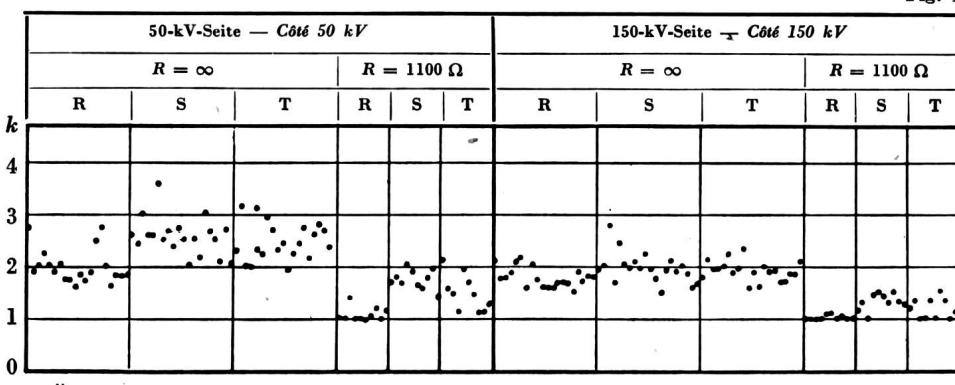
$U_B = 50 \text{ kV}$; $f = 50 \text{ Hz}$
NPE über Löschspule
 $P_{Ks} \approx 1500 \text{ MVA}$

B. Transformator 1925

$P_n = 16,5 \text{ MVA}$
 $\ddot{u} = 50,4/141 \text{ kV}$
Schaltung: \downarrow/\downarrow
 $I_\mu \approx 11 \text{ A}$; $\epsilon = 10,5 \%$

C Schalter 1925

3-Kessel-Ölschalter mit Löschkammern
 $U_n = 50 \text{ kV}$
 $P_{Ks} \approx 1000 \text{ MVA}$; $n = 2$
 $V \approx 2,6 \text{ m/s}$
($V_{Trav.} \approx 1,3 \text{ m/s}$)
 $R = \infty/1100 \Omega/\text{Phase}$



D. Überspannungen
 $m = 20$
 $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$
 $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$



Messungen Siebnen, 150 kV

A. Netz

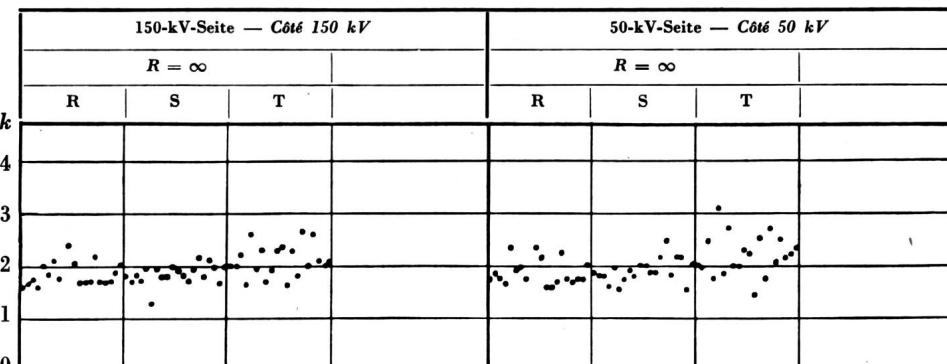
$U_B = 145 \text{ kV}$; $f = 50 \text{ Hz}$
NPE über Löschspule
 $P_{Ks} \approx 1500 \text{ MVA}$

B. Transformator 1925

$P_n = 16,5 \text{ MVA}$
 $\ddot{u} = 141/50,4 \text{ kV}$
Schaltung: \downarrow/\downarrow
 $I_\mu \approx 4 \text{ A}$; $\epsilon = 10,5 \%$

C Schalter 1925

3-Kessel-Ölschalter mit Löschkammern
 $U_n = 150 \text{ kV}$
 $P_{Ks} \approx 1500 \text{ MVA}$; $n = 2$
 $v \approx 3,9 \text{ m/s}$
($V_{Trav.} \approx 1,95 \text{ m/s}$)
 $R = -$



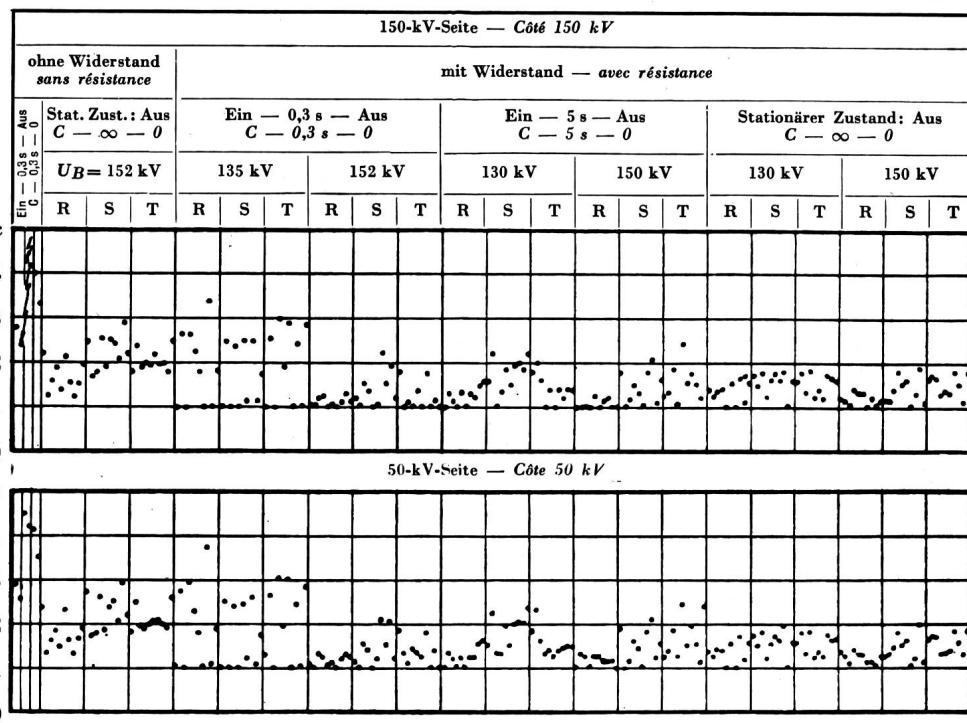
D. Überspannungen
 $m = 20$
 $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$
 $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$



Messungen Bottmingen, 150 kV

Fig. 10

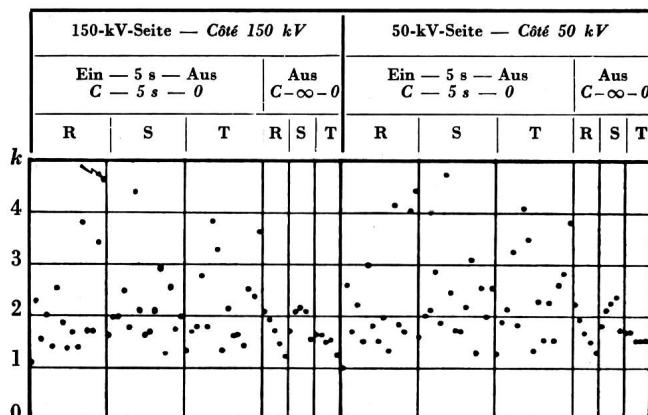
A.	Netz $U_B \approx 130/150 \text{ kV}$ $f = 50 \text{ Hz}$ NPE Löschspule, isoliert $P_{Ks} \approx 750/200 \text{ MVA}$
B.	Transformator 1947 $P_n = 23,3 \text{ MVA}$ Stufe 24: 167/64,1 kV Stufe 23: 167/63,28 kV Stufe 15: 167/56,7 kV Schaltung: $\epsilon = 10\%$ $I_\mu \approx 4 \text{ A} (5,5\%)$
C.	Schalter 1948 Druckluft-Schalter $U_n = 150 \text{ kV}$ $P_{Ks} = 2500/3500 \text{ MVA}$ $n = 4$ $R = \infty/\text{veränderlich}$ $p = 15 \text{ kg/cm}^2$
D.	Überspannungen $m = 2 \dots 10$ $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$ $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$



Messungen Bottmingen, 150 kV

Fig. 11

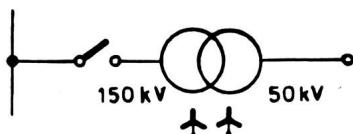
A.	Netz $U_B = 143/156 \text{ kV}$ $f = 50 \text{ Hz}$ NPE über Löschspule $P_{Ks} \approx 750 \text{ MVA}$
B.	Transformator 1947 $P_n = 23,3 \text{ MVA}$ $\ddot{u} = \text{Stufe 15: } 167/56,7 \text{ kV}$ Schaltung: $I_\mu \approx 4 \text{ A}; \epsilon = 10\%$
C.	Schalter 1949 Ölarmer Schalter $U_n = 150 \text{ kV}$ $P_{Ks} = 1500 \text{ MVA}$ $n = 1; R = -$
D.	Überspannungen $m = 5 \dots 15$ $k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$ $k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$



matoren erscheinen stets an den Klemmen dieser Transformatoren nach ihrer Abtrennung vom Netz. Demgegenüber können die grössten Überspannungen beim Ausschalten von leerlaufenden Leitungen in besondern Fällen, nämlich beim Speisen aus einem einzelnen Transformator ohne Nullpunktterdung, am speisenden Transformator selber erscheinen. Diese Überspannungen variieren zwischen 1...4,5-facher Phasenspannung. Die Überspannungen an der ausgeschalteten Leitung selber sind wesentlich kleiner als an ausgeschalteten Transformatoren; sie bleiben gemäss Fig. 25 stets innerhalb 1...2,5facher Phasenspannung. Diese Unterschiede sind verständlich, weil der physikalische Vorgang beim Ausschalten von Transformatoren und Leitungen ganz verschieden ist. Beide Fälle lassen sich nicht in einen Tiegel werfen; sie werden nachstehend getrennt besprochen.

a) Die *Überspannungen beim Ausschalten leerlaufender Transformatoren* oder allgemein bei der Unterbrechung kleiner induktiver Ströme entstehen infolge des vorzeitigen Abreissens des labilen Schalterlichtbogens vor dem stationären Nulldurchgang des Stromes. Die Grösse der Überspannungen ist, abgesehen von den Daten der Netzteile beidseitig des Schalters (Transformator, Drosselpulen usw.), bedingt durch die Art und Weise der elektrischen Verfestigung der Lichtbogenstrecke im Verlauf des Spiels rasch aufeinander folgender Rückzündungen im Schalter, ohne welche die Überspannung im Transformator unzulässige Werte erreichen würde [1]¹⁾. Diesen rasch aufeinander folgenden Rückzündungen im Schalter kommt hier eine durchaus erwünschte Wirkung im Sinne einer Begrenzung der Überspannungen zu. In der Tat kann man sich die Über-

¹⁾ siehe Literatur am Schluss.

Messungen Bottmingen, 150 kV**A. Netz**

$$U_B = 150 \text{ kV}; f = 50 \text{ Hz}$$

NPE über Löschspule

$$P_{Ks} \approx 750 \text{ MVA}$$

B. Transformator 1947

$$P_n = 23,3 \text{ MVA}$$

 \ddot{u} = Stufe 15:

$$167/56,7 \text{ kV}$$

Schaltung: \downarrow/\downarrow

$$I_\mu \approx 4 \text{ A}; \epsilon = 10 \%$$

C. Schalter 1949

Ölarmer Schalter

$$U_n = 150 \text{ kV}$$

$$P_{Ks} = 1500 \text{ MVA}$$

$$n = 1$$

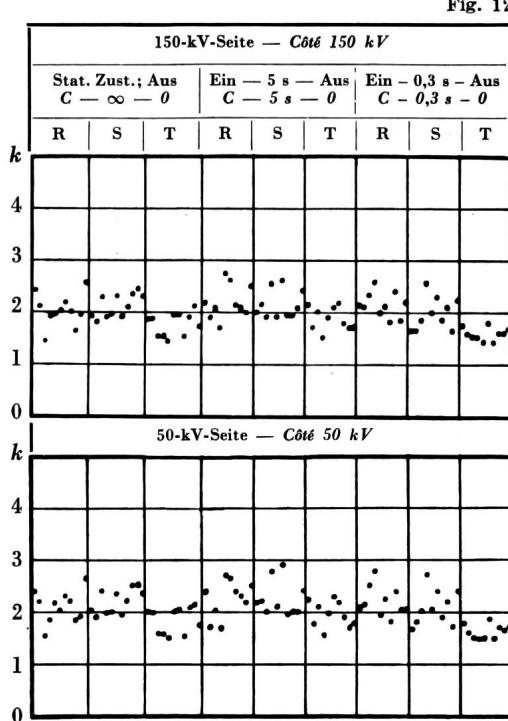
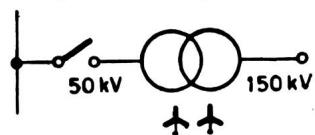
$$R = 10000 \Omega$$

D. Überspannungen

$$m = 10 \dots 11$$

$$k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$$

$$k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$$

**Messungen Bottmingen, 50 kV****A. Netz**

$$U_B = 47 \text{ kV}; f = 50 \text{ Hz}$$

NPE isoliert

$$P_{Ks} \approx 500 \text{ MVA}$$

B. Transformator

$$P_n = 23,3 \text{ MVA}$$

$$\ddot{u} = \text{Stufe } 15: 56,7/167 \text{ kV}$$

$$\ddot{u} = \text{Stufe } 3: 46,8/167 \text{ kV}$$

Schaltung \downarrow/\downarrow

$$I_\mu \approx 12 \text{ A}; \epsilon = 10 \%$$

C. Schalter 1952

Ölstrahl-Schalter

$$U_n = 60 \text{ kV}$$

$$P_{Ks} = 435 \text{ MVA}; n = 1$$

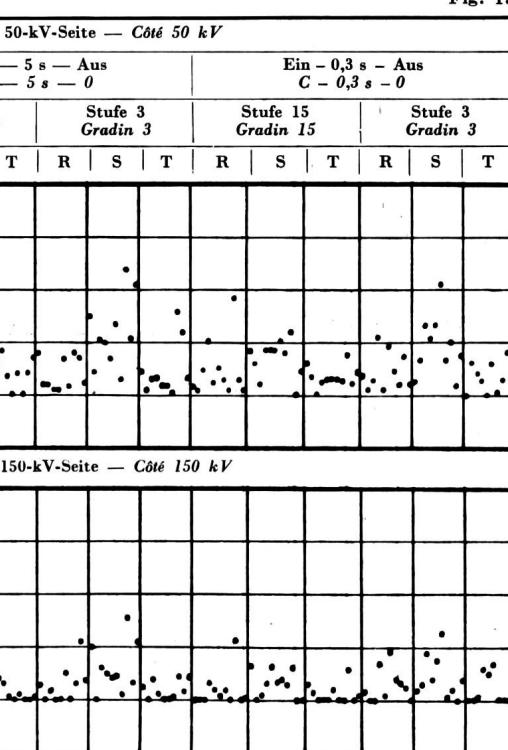
$$R = 2000 \Omega$$

D. Überspannungen

$$m = 10 \dots 11$$

$$k_{Pr} = \frac{u_{max}}{U_B \sqrt{2} / \sqrt{3}}$$

$$k_{Sek} = k_{Pr} \ddot{u}$$



spannung am Transformator stets zusammengesetzt denken als Spannung des Netzes plus oder minus Spannung über den Schalter.

Für ein sehr starkes speisendes Netz begrenzt die höchstmögliche Spannung über den Schalter, das heisst entweder die Rückzündspannung des Schalters, oder die Restspannung an Überbrückungswiderständen die Überspannung am Transformator. Für ein «weiches», das heisst nicht starres speisendes Netz kann bei diesen Rückzündungen auch die

speisende Netzspannung etwas von ihrer normalen Form abweichen, so dass in diesem Fall auch das speisende Netz einen gewissen Einfluss auf die Höhe der Überspannung am Transformator ausüben kann [2; 3]. Es handelt sich hier nicht ausschliesslich um ein Schalterproblem, sondern um ein Schalter- und Netzproblem.

Für den Schalter ist ferner in Betracht zu ziehen, dass er im Betrieb nicht nur kleine induktive Ströme, sondern auch grosse Kurzschlußströme oder leer-

Messungen Grüze, 15 kV

Fig. 14

Messungen Stadsforsen, 220 kV

Fig. 15

Versuchsserie Nr. — Série d'essai		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Verbindung zwischen Transformator - Stern- punkt und Erde <i>Neutre - Terre</i>	Speisende Seite <i>Côte alimentation</i>	dir.	dir.	Lösch- spule <i>bob. d'ext.</i>	dir.	dir.	Lösch- spule <i>bob. d'ext.</i>	dir.	dir.	dir.	dir.	dir.	dir.	dir.	Lösch- spule <i>bob. d'ext.</i>	dir.	dir.	Lösch- spule <i>bob. d'ext.</i>	Lösch- spule <i>bob. d'ext.</i>			
	Abgeschalt. Seite <i>Côté transformat.</i>	dir.	dir.	Lösch- spule <i>bob. d'ext.</i>	dir.	dir.	Lösch- spule <i>bob. d'ext.</i>	frei <i>libre</i>	frei <i>libre</i>	dir.	dir.	dir.	dir.	dir.	Lösch- spule <i>bob. d'ext.</i>	frei <i>libre</i>	frei <i>libre</i>	Lösch- spule <i>bob. d'ext.</i>	frei <i>libre</i>			
Induktiver Effektiv-Strom <i>Courant inductif (effectif)</i>		A	61	66	61	66	25	25	25	25	23	25	25	25	25	25	23	25	≈2	≈2	≈2	≈2
Mit 72-km-Leitung auf d. speisenden Seite <i>Avec ligne 72 km côté alimentation</i>		nein <i>non</i>	ja <i>oui</i>	nein <i>non</i>	ja <i>oui</i>	nein <i>non</i>	ja <i>oui</i>	nein <i>non</i>	ja <i>oui</i>	nein <i>non</i>	ja <i>oui</i>	nein <i>non</i>	ja <i>oui</i>	ja <i>oui</i>	ja <i>oui</i>	nein <i>non</i>	ja <i>oui</i>	nein <i>non</i>	ja <i>oui</i>	nein <i>non</i>	ja <i>oui</i>	
Widerstandscharakteristik <i>Caractéristique des résistances</i>		A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	B	B	B	B	B	A	A	A	A	A	
Anzahl Unterbrechungsstellen pro Phase <i>Nombre d'intervalles disruptifs en série</i>		6	6	6	6	6	6	6	6	6	4	6	4	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Anzahl Schaltungen — Nombre de déclench.		3	2	2	2	5	5	3	6	4	4	6	6	10	10	11	6	10	2	2	1	2
$P_{Ks} = 110 \text{ MVA}$		k_N									⋮											
$k_N = \frac{u_{max\ N}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$		3																				
$k_T = \frac{u_{max\ T}}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$		2	⋮											
		1	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		k_T									⋮											
		4									⋮											
		3									⋮											
		2	⋮								⋮											
		1	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
		0																				
<p>Spulen Bobines</p> <p>Versuchsschalter Disj. d'essai</p> <p>△</p>		<p>Mittelwert — Valeur moyenne</p>																				

Messungen Siebnen, 150-kV-Leitung, Siebnen-Grynaus-Töss

Fig. 16

A. Netz

$U_B = 50 \text{ kV}$
 $f = 50 \text{ Hz}$
 NPE 150 kV isoliert
 Trsf. 16,5 MVA
 $50/150 \text{ kV}$
 $U_{BT_r} = 140 \text{ kV}$

B. Leitung
 Siebnen-Grynaus 8 km
 Siebnen-Töss 48 km

C. Schalter 1925
 3-Kessel-Ölschalter
 $U_n = 150 \text{ kV}$
 $P_{Ks} = 600 \text{ MVA}$
 $n = 2; R = -$

D. Überspannungen
 $m = 7$
 $k_N = \frac{u_{max\ N}}{U_{BT_r}\sqrt{2}/\sqrt{3}}$
 $k_L = \frac{u_{max\ L}}{U_{BT_r}\sqrt{2}/\sqrt{3}}$

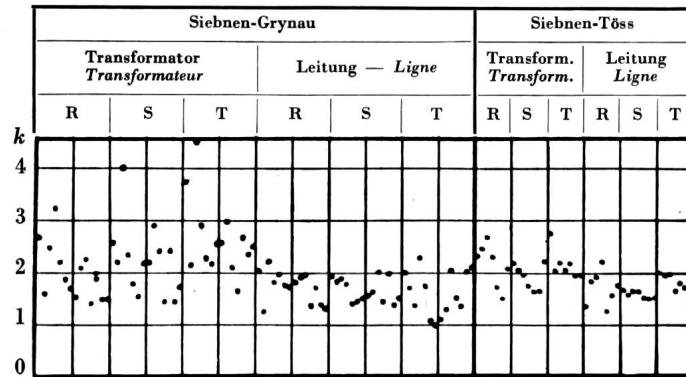
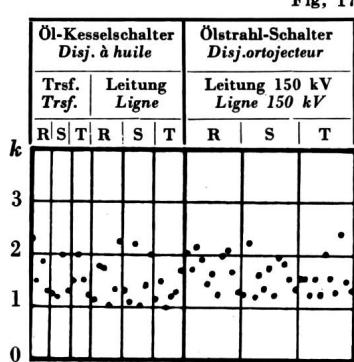
**Messungen Bickigen, 150-kV-Leitung, Bickigen-Bern**

Fig. 17



A. Netz
 $U_B = 50 \text{ kV}$
 $f = 50 \text{ Hz}$
 NPE direkt
 Trsf. $3 \times 15 \text{ MVA}$
 $50/150 \text{ kV}$,
 Stufe 24
 $U_{BT_r} = 138 \text{ kV}$

B. Leitung
 Bickigen-Bern 24,5 km

C. Schalter
 a) Öl-Kesselschalter,
 ca. 1930
 $U_n = 150 \text{ kV}$
 $P_{Ks} = 800 \text{ MVA}$
 $n = 6; R = -$
 b) Ölstrahl-Schalter,
 ca. 1940
 $U_n = 150 \text{ kV}$
 $P_{Ks} = 1500 \text{ MVA}$
 $n = 1; R = -$

D. Überspannung
 $m = 4 \dots 11$
 $k_N = \frac{u_{max\ N}}{U_{BT_r}\sqrt{2}/\sqrt{3}}$
 $k_L = \frac{u_{max\ L}}{U_{BT_r}\sqrt{2}/\sqrt{3}}$

Messungen Fontenay, 220-kV-Leitungen

Fig. 19

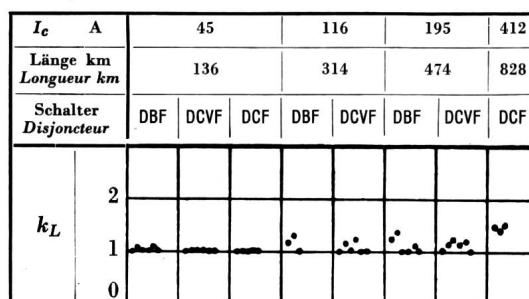
**Messungen Grand Coulee, 220-kV-Leitungen**

Fig. 18

A. Netz
 $U_B = 235 \text{ kV}/\sqrt{3}$
 $f = 60 \text{ Hz}$
 NPE direkt
 $P_{Ks} \approx 6800 \text{ MVA}$

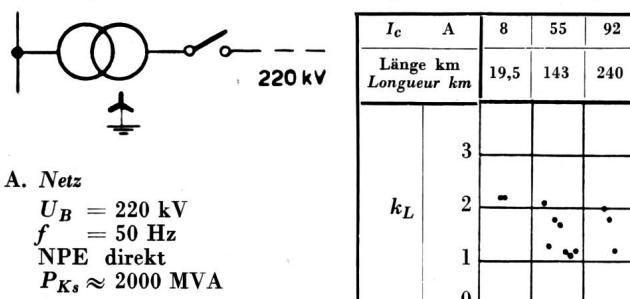
B. Leitungen
 $I_c = 62, 115, 156 \text{ A}$
 1 2 3 Leiter
 zu 160 km

C. Schalter 1951
 Druckluft-Schalter,
 DCVF
 $U_n = 220 \text{ kV}$
 $P_{Ks} = 6000 \text{ MVA}$
 $n = 8$
 $p = 15 \text{ kg/cm}^2$
 R spannungsabhängig

D. Überspannungen
 $m = 4$
 $k_L = \frac{u_{max\ L}}{U_B\sqrt{2}}$

Messungen Fallou, 220-kV-Leitungen

Fig. 20

**A. Netz**

$U_B = 220 \text{ kV}$
 $f = 50 \text{ Hz}$
 NPE direkt
 $P_{Ks} \approx 2000 \text{ MVA}$

B. Leitungen

$L = 19,5, 143, 240 \text{ km}$
 $I_c = 8, 55, 92 \text{ A}$
 $C_{Ph} = 0,19, 1,31, 2,25 \mu\text{F}$

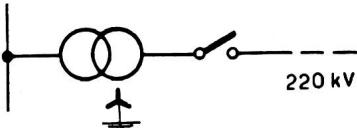
C. Schalter

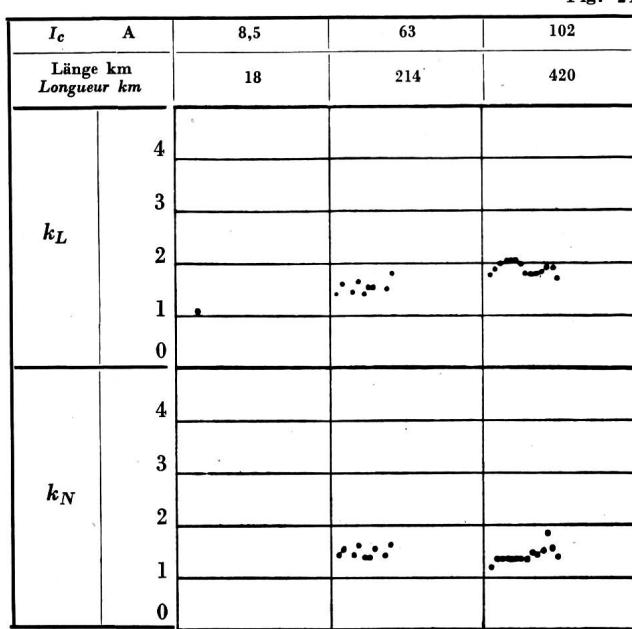
Ölarmer Schalter, TOF
 $U_n = 220 \text{ kV}$
 $P_{Ks} = 5000 \text{ MVA}$
 $n = 1; R = -$

D. Überspannungen

$m = 2 \dots 7$
 $k_L = \frac{u_{max\ L}}{U_B\sqrt{2}/\sqrt{3}}$

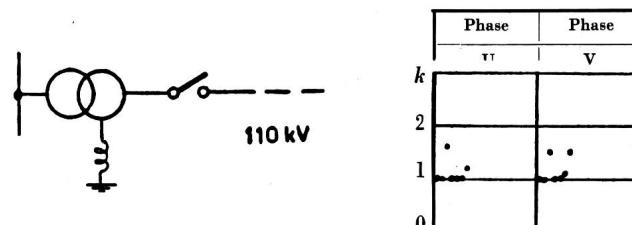
Messungen Fontenay, 220-kV-Leitungen

	A. Netz $U_B = 220 \text{ kV}$; $f = 50 \text{ Hz}$ NPE direkt	C. Schalter Ölstrahlschalter HPF-14
B. Leitungen $L = 18, 214, 420 \text{ km}$ $I_c = 8,5, 63, 102 \text{ A}$	D. Überspannungen $m = 1 \dots 14$ $k_L = \frac{u_{\max} L}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$ $k_N = \frac{u_{\max} N}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$	



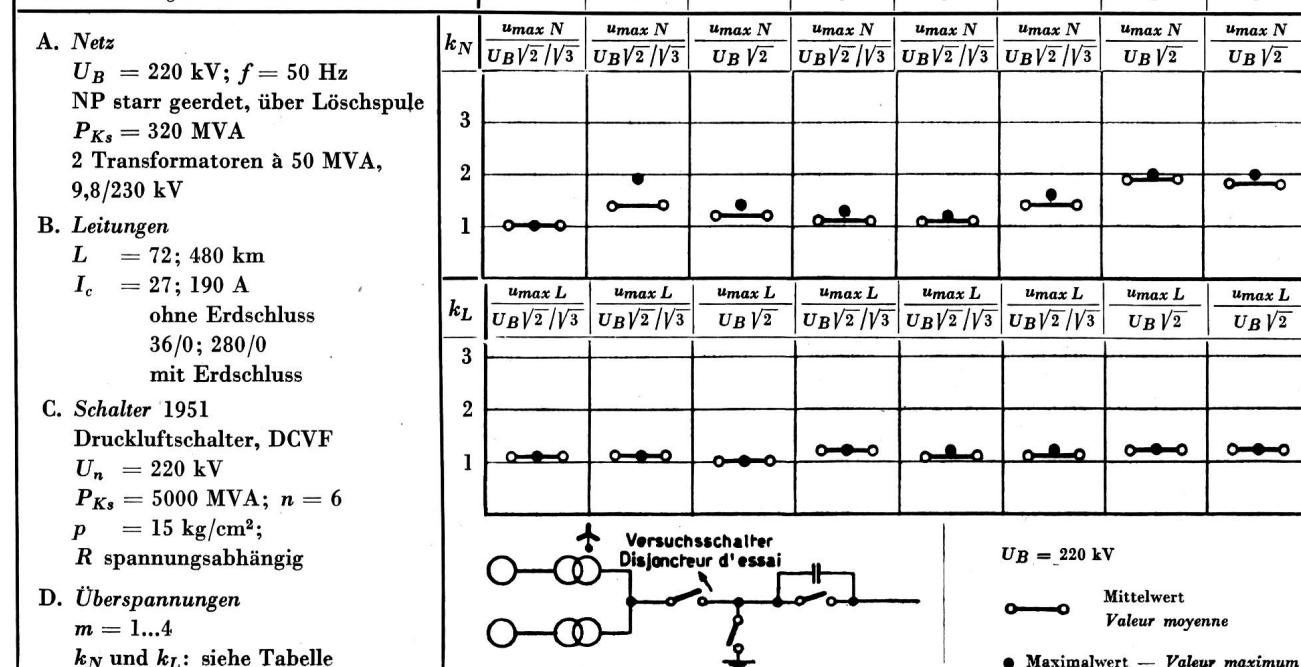
Messungen St. Johann, 110-kV-Leitung St. Johann—Mallnitz

A. Netz $U_B = 110 \text{ kV}$ $f = 16^{2/3} \text{ Hz}$ NPE über Löschspule	C. Schalter Ölstrahl-Schalter, HPF 11
B. Leitung St. Johann—Mallnitz $L = 35,2 \text{ km}$ Freileitung + 15,7 km Kabel	D. Überspannungen $m = 8$ $k_L = \frac{u_{\max} L}{U_B \sqrt{2}/\sqrt{3}}$
$I_c = 60 \dots 78 \text{ A}$	



Messungen Stadsforsen, 220 kV

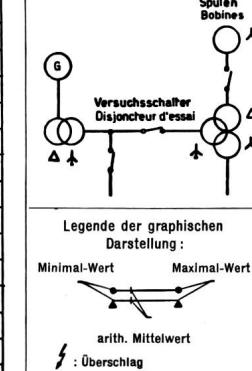
Verbindung zwischen Transformator-Sternpunkt und Erde Neutre — Terre	direkt direct	über Löschspule par bobine d'extinction	über Löschspule par bobine d'extinction	direkt direct	direkt direct	über Löschspule par bobine d'extinction	über Löschspule par bobine d'extinction	über Löschspule par bobine d'extinction
Mit Serie-Kondensator 31000 kVA ungefähr Mitte Leitung — Avec condensateur 31000 kVA en série env. au milieu de la ligne	nein non	nein non	nein non	nein non	ja oui	ja oui	ja oui	nein non
Leitungslänge — Longueur de la ligne km	72	72	72	480	480	480	480	480
Mit Erdschluss einer Phase Avec mise à terre d'une phase	nein non	nein non	ja oui	nein non	nein non	nein non	ja oui	ja oui
Effektiver Strom — Courant (eff.) A	27	27	36/0	190	190	190	280/0	280/0
Anzahl Schaltungen — Nombre de déclenchements	4	4	4	4	3	1	2	2



Überspannungen beim Abschalten leerlaufender Transformatoren

Fig. 24

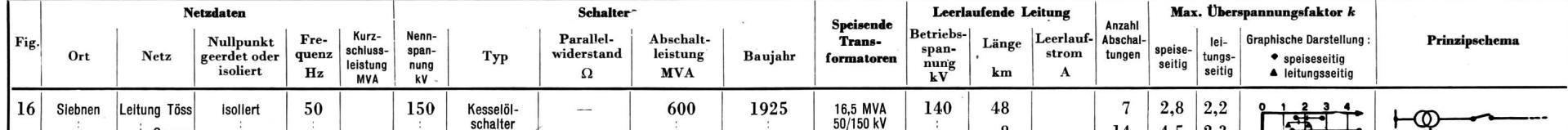
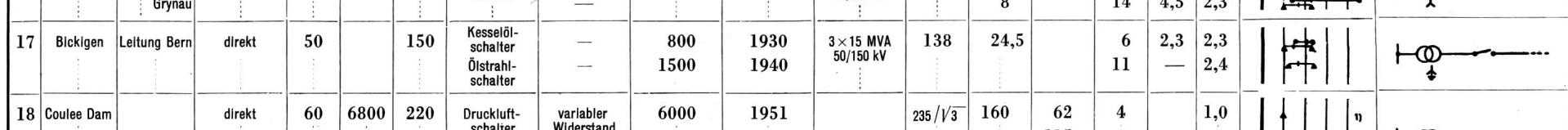
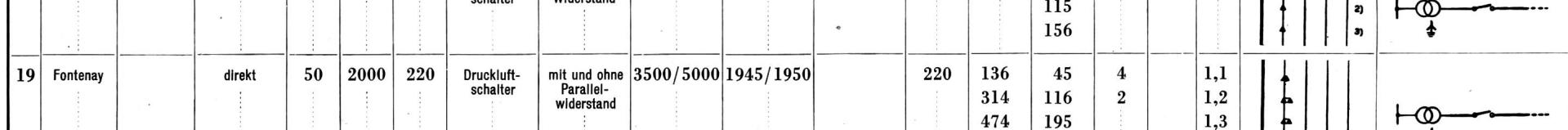
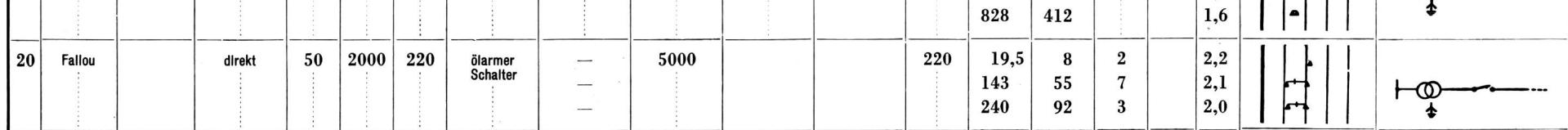
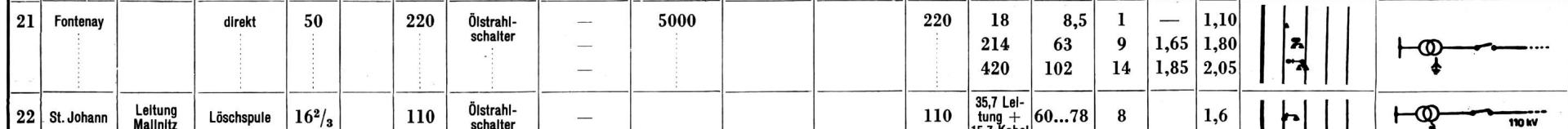
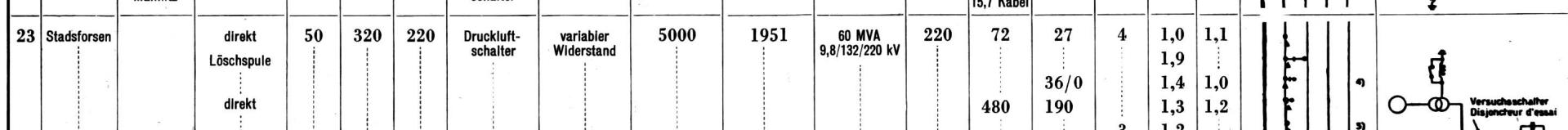
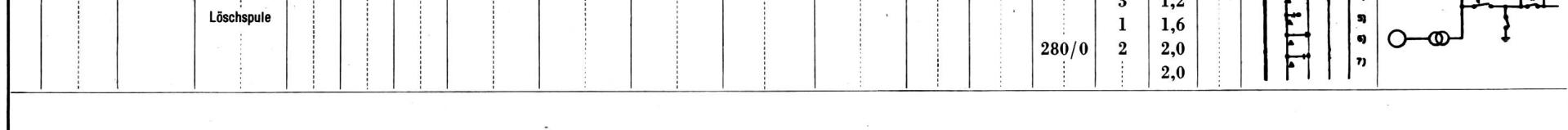
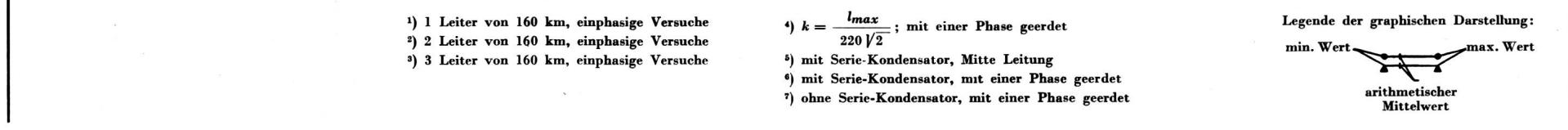
Fig.	Ort	Netz	Netzdaten			Schalter	Abgeschaltete Transformatoren	Abschaltungen	Überspannungen			Schema								
			Sternpunkt geerdet oder isoliert	Mit Leitg. von 72 km speise- seitig	Fre- quenz Hz				Max. Überspannungsfaktor leitungs- seitig transformator- seitig primär sekund.	Graphische Darstellung										
									• primär ▲ sekundär ♦ leitungsseitig											
1	Siebnen	AKW/NOK	Löschspule		50	1500	50	Kesselölschalter	1000	1925	16,5		10,5	141/50,4	50	11	20	C-∞-0	3,60 2,80 2,12 1,50 2,65 3,10	
2							150		1100						1500		10			
3	Blickigen	BKW	direkt		50	1500	150	Kesselölschalter	1500	1930	3x15		11,9	141/48,1	140	5	6	C-∞-0	2,09 1,90	
4									1940										3,28 2,80	
5			isoliert			1000	45	Östrahlenschalter	1000				9,7/11,9		46	15,5	13		2,40 2,40	
6	Laufenburg	ATEL	Löschspule		50	500	50	Druckluftschalter	600	1946	5,75		3,43	48,2/6,3	48	3	13	C-∞-0	2,85 4,50	
7			isoliert				11		700										4,66 3,65	
8	Rempen	AKW	Löschspule		50	500/200	60	Östrahlenschalter	750	1940	16,5		9,3	50/8,8-9,6	50	6,7	35	C-∞-0	4,42 7,05 2,85 3,02	
									5000/10000											
9	Bottmingen	ATEL	isoliert		50	500	60	Östrahlenschalter	435	1940	23,3		10	167/45,56	46/53	12	9	C-∞-0	4,15 2,88	
			Löschspule			750/200	150		2500	1948									5,15 3,60	
10									3500										6,05 4,34	
						750													2,90 2,95	
11																			4,30 4,50	
12																			1,90 2,00	
13			isoliert			500	60	Östrahlenschalter	10000										2,45 2,45	
																			3,42 3,75	
14	Grüze	SBB			16 ² / ₃	70/15	30	Östrahlenschalter	2000	435	1952									2,15 2,38
							70	Kesselölschalter	250			3		9,35	64/15	10/17	63			
												3x3							4,65 4,75	
																			2,58 2,65	
15	Stadtforsen	Kniglig Vattenfallsstyrelsen	direkt	nein	50	110	220	Druckluftschalter	5000	1951	60	3x9,8 kV; 10 MVA	21,4 (9,8/220 kV)	9,8/ ₁₃₂ /220	220	61	3	C-∞-0	3,80 3,95 3,45 3,79 3,80 4,00	
			Löschspule	nein															1,60 2,60	
			direkt	nein															2,30 2,00	
			Löschspule	nein															1,00 2,60	
			frei	nein															2,10 2,80	
			Löschspule	nein															1,05 4,50	
			frei	nein															1,70 2,50	
			Löschspule	nein															1,05 4,30	
			frei	nein															3,30 4,50	
			Löschspule	nein															2,60 3,80	
			frei	nein															1,00 1,00	



Überspannungen beim Abschaltversuchen leerlaufender Leitungen in Hochspannungsnetzen

Fig. 25

408

Fig.	Ort	Netz	Netzdaten				Schalter			Speisende Transformatoren	Leerlaufende Leitung			Max. Überspannungsfaktor k			Prinzipschema	
			Nulpunkt geerdet oder isoliert	Frequenz Hz	Kurzschlussleistung MVA	Nennspannung kV	Typ	Parallelwiderstand Ω	Abschaltleistung MVA		Betriebsspannung kV	Länge km	Leerlaufstrom A	Anzahl Abschaltungen	speise- seitig	leitungs- seitig		
16	Siebnen	Leitung Töss Grynau	Isoliert	50		150	Kesselölschalter	—	600	1925	16,5 MVA 50/150 kV	140	48	7	2,2	2,3		
17	Bickigen	Leitung Bern	direkt	50		150	Kesselölschalter Ölstrahlschalter	—	800 1500	1930 1940	3 x 15 MVA 50/150 kV	138	24,5	6	2,3	2,3		
18	Coulee Dam		direkt	60	6800	220	Druckluftschalter	variabler Widerstand	6000	1951	—	235 / $\sqrt[3]{3}$	160 115 156	4	1,0	1,0		
19	Fontenay		direkt	50	2000	220	Druckluftschalter	mit und ohne Parallelwiderstand	3500/5000	1945/1950	—	220	136 314 474 828	45 116 195 412	1,1 1,2 1,3 1,6	1,1 1,2 1,3 1,6		
20	Fallou		direkt	50	2000	220	ölarmer Schalter	—	5000	—	—	220	19,5 143 240	8 55 92	2	2,2 2,1 2,0	2,2 2,1 2,0	
21	Fontenay		direkt	50		220	Ölstrahlschalter	—	5000	—	—	220	18 214 420	8,5 63 102	1	— 1,65 1,80 2,05	1,10 1,80 2,05	
22	St. Johann	Leitung Mallnitz	Löschspule	16 $\frac{2}{3}$		110	Ölstrahlschalter	—	—	—	35,7 Leitung + 15,7 Kabel	110	60...78	8	1,6	1,6		
23	Stadsforsen		direkt Löschspule	50	320	220	Druckluftschalter	variabler Widerstand	5000	1951	60 MVA 9,8/132/220 kV	220 480	72 36/0 190	27 1,4 1,3	1,0 1,9 1,2	1,1 1,0 1,2		

¹⁾ 1 Leiter von 160 km, einphasige Versuche

²⁾ 2 Leiter von 160 km, einphasige Versuche

³⁾ 3 Leiter von 160 km, einphasige Versuche

$$\text{4) } k = \frac{l_{\max}}{220 \sqrt{\frac{3}{2}}} ; \text{ mit einer Phase geerdet}$$

⁵⁾ mit Serie-Kondensator, Mitte Leitung

⁶⁾ mit Serie-Kondensator, mit einer Phase geerdet

⁷⁾ ohne Serie-Kondensator, mit einer Phase geerdet

Legende der graphischen Darstellung:



laufende Leitungen oder in Opposition befindliche Netze schalten muss. Die sich daraus ergebenden Forderungen widersprechen sich besonders hinsichtlich der wünschbaren Verfestigung der Lichtbogenstrecke [4; 5]. Werden daher Schalter so gebaut, dass sie einer Anforderung gut entsprechen, so werden sie dafür gegenüber andern Anforderungen, die betrieblich ebenso wichtig sein können, vielleicht verschlechtert. Ein Beispiel dafür bildet der unter b) noch zu besprechende Vorgang beim Ausschalten leerlaufender Leitungen. Während dort die Unterdrückung hoher Überspannungen in erster Linie von der *Vermeidung* von Rückzündungen, das heisst von der möglichst raschen Verfestigung der Lichtbogenstrecke bedingt ist, gilt bei der Ausschaltung leerlaufender Transformatoren gerade das Gegenteil.

Aus diesem Grunde muss eine gewisse Überspannung zugelassen werden. Die Frage ist lediglich die nach der zulässigen Höhe. Mit Hilfe von Widerständen im Schalter ist es möglich, in jenen Fällen, wo der widerstandslose Schalter zu hohe Überspannungen am leergeschalteten Transformator ergibt, diese Überspannungen auf unschädliche Werte zu reduzieren. Die Messungen zeigen, dass die gefährlichsten Überspannungen beim Ausschalten induktiver Ströme der Grössenordnung von effektiv 5...40 A entstehen. Die Tatsache, dass die Abreissströme im Schalter bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten, macht es auch möglich, die Leerschaltüberspannungen mit Hilfe üblicher Überspannungsableiter zu begrenzen, welche am Transformator gegen Erde angeschlossen werden. Hinsichtlich der aus dem Magnetfeld des Transformators aufzunehmenden Energie werden diese Ableiter nicht höher beansprucht als durch jene Energie, die sie beim Ansprechen im Betrieb infolge atmosphärischer Überspannungen aufzunehmen imstande sein müssen.

b) Die *Überspannungen beim Ausschalten leerlaufender Leitungen* entstehen infolge von Schwingungen, die zwischen speisendem Netz und offener Leitung im Moment von Rückzündungen im Schalter einsetzen. Die Amplitude dieser Schwingungen ist gegeben durch die Differenz der Spannungen zu beiden Seiten des Schalters im Moment einer Rückzündung. Die eine dieser Spannungen ist die speisende Netzspannung, die andere die Spannung der noch geladenen Leitungskapazität. Diese Spannungsdifferenz ist am grössten jeweils eine halbe Periode nach einem Nulldurchgang des stationären Ladestromes. Der Schalter soll einen solchen Verlauf seiner wiederkehrenden Festigkeit aufweisen, dass dieses spezielle Rückzündungstempo äusserst unwahrscheinlich wird, oder dass überhaupt keine Rückzündungen auftreten. Die Messungen zeigen, dass diese Bedingungen im allgemeinen erfüllt werden können. Für die untersuchten schweizerischen Schalter und alle, selbst recht beträchtliche Leitungslängen, sind die gemessenen Überspannungen durchaus bescheiden. Auf diese Überspannungen kommt es aber an, nicht auf die Anzahl Rückzündungen.

Im Vergleich zu den Überspannungen beim Ausschalten kleiner induktiver Ströme sind jedenfalls

die Überspannungen beim Ausschalten von Leitungen beträchtlich kleiner. Sie bleiben bei allen durchgeföhrten Messungen durchaus gefahrlos.

c) Bei den unter a) und b) aufgeföhrten Versuchen ist sodann nicht ausser acht zu lassen, dass bei allen Schaltüberspannungen die Streuung und damit die Wahrscheinlichkeit des Auftretens hoher Werte eine grosse Rolle spielt. Es handelt sich durchwegs um ein *statistisches Problem*; Überspannungen sind um so seltener, je höher sie sind. Aus diesem Grunde spielt auch die Anzahl Messungen bei einer und derselben Anordnung eine ganz beträchtliche Rolle hinsichtlich des Maximalwertes der gemessenen Überspannungen: Je mehr Messungen, um so höher wird die grösste gemessene Überspannung irgend einer Messreihe sein [6].

Ferner ist bei den Messreihen a) bezüglich der Leerschaltüberspannungen an Transformatoren zu bemerken, dass die angeführten Versuche zum Teil Anlagen betrafen, in welchen im Betrieb bereits Überspannungen oder Überschläge infolge von Überspannungen beobachtet worden waren. Es mag viele Stellen geben, wo die Überspannungen beim Schalten kleiner bleiben als in den hier gemessenen Anlagen, und bei der Verallgemeinerung der Resultate ist deshalb auch hier eine gewisse Vorsicht nötig.

Schliesslich ist darauf aufmerksam zu machen, dass in den Fig. 1...25 ausschliesslich die *Höhe der Überspannungen* dargestellt wird, nicht aber die *Steilheit* der Spannungsänderungen. Letztere hängt in erster Linie von der Grösse des Spannungssprunges (Δu) und von der Zeitkonstante oder Eigenzeit des Stosskreises in unmittelbarer Umgebung des Schalters ab (Kapazität des Transformators und seiner Zuleitungen, Distanz der Nullpunktserdung usw.). Im Gegensatz hierzu wird diese Steilheit der Spannungsänderung vom Schalter selber kaum beeinflusst, mindestens, solange er keine Widerstände enthält.

Literatur

- [1] Berger, K. und R. Pichard: Die Berechnung der beim Abschalten leerlaufender Transformatoren, insbesondere mit Schnellschaltern, entstehenden Überspannungen. Bull. SEV Bd. 35 (1944), Nr. 20, S. 560...570.
- [2] Baltensperger, P.: Surtensions lors du déclenchement de faibles courants inductifs. CIGRE Bd. 2 (1950), rap. 116.
- [3] Meyer, H.: Die grundlegenden Probleme der Hochspannungsschalter. Brown Boveri Mitt. Bd. 37 (1950), Nr. 4/5, S. 108...123.
- [4] Vogelsanger, E.: Etude des courants et tensions maxima pouvant solliciter un disjoncteur dans un réseau monophasé ou polyphasé lors de la coupe de courts-circuits. CIGRE Bd. 1 (1946), rap. 119.
- [5] Meyer, H.: Compte-rendu des essais sur réseau exécutés avec un nouveau type de disjoncteur pneumatique à très haute tension. CIGRE 1952, rap. 115.
- [6] Pichard, R.: Comparaison des surtensions survenant lors du déclenchement d'une ligne ouverte alimentée par un transformateur dont le neutre est isolé ou mis directement à la terre. CIGRE 1952, rap. 114.
- [7] Baltensperger, P.: Abschaltung eines leerlaufenden Transformatoren mit einem modernen 150-kV-Brown Boveri Druckluftschalter im Unterwerk Bottmingen der ATEL. Brown Boveri Mitt. Bd. 39 (1952), Nr. 8/9, S. 335...340.
- [8] Baltensperger, P.: Abschaltung leerlaufender Leitungen und kleiner induktiver Ströme mit einem modernen 220-kV-Brown Boveri Druckluftschalter im schwedischen Kraftwerk Stadsforsen. Brown Boveri Mitt. Bd. 38 (1951), Nr. 12, S. 391...410.
- [9] Killgore, C. L. und W. Wanger: Essais d'un disjoncteur pneumatique Brown Boveri à la centrale de Grand Coulee 230 KV 10 000 MVA. CIGRE 1952, rap. 137.
- [10] Amstutz, A. und H. Meyer: Netzversuche mit Druckluftschaltern. Brown Boveri Mitt. Bd. 37 (1950), Nr. 4/5, Seite 136...143.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. K. Berger, Versuchsleiter der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen, Seefeldstrasse 301, Zürich 8.