Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 31 (1940)

Heft: 16

Artikel: Eine neue Ersatzprüfschaltung für Hochleistungsschalter

Autor: Trautweiler, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1061375

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: 09.08.2025

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

réseau. Pour éviter cet inconvénient, un contact de fin de course a été monté sur la chaudière. Ce contact, fermé par le levier de commande des contre-électrodes lorsque celles-ci sont dans la position de charge minimum est monté dans le circuit de la bobine à tension nulle. On ne peut ainsi enclencher la chaudière que lorsque sa charge est minimum, env. 200 kW à 90° C. Dès que le disjoncteur principal est enclenché, un contact auxiliaire monté sur son arbre shunte le contact fin de course qui peut alors être ouvert sans risque de déclenchement, par la mise en marche du levier des contre-électrodes.

D. *Fonctionnement, consommation.*

La chaudière ne travaille pas directement sur les serres mais sur l'accumulateur qu'elle tient constamment à pleine charge, sauf pendant les heures de pointe naturellement.

En période de démarrage de l'installation, elle doit fournir en même temps l'énergie nécessaire à la charge de l'accumulateur et au chauffage des serres, ce qui lui demande une puissance maximum.

Ce n'est qu'après un certain temps de fonctionnement et pour éviter des variations de charge très désagréables pour le réseau que la sonde du régulateur de température, installée primitivement sur le départ d'eau chaude de la chaudière a été placée sur le retour. Dès ce moment ces variations ont disparu.

La consommation de toute l'installation enregistrée du 2 octobre 1939 au 1er juin 1940, a été de 1 905 000 kWh. On arrive ainsi très près des 2 millions de kWh calculés pour la période de chauffage annuelle en négligeant les services auxiliaires dont la consommation est minime.

Toute l'installation électrique a été faite par le Service de l'Electricité de Genève, celle de la partie thermique a été confiée à Calorie S. A. chauffage et ventilation, à Genève.

Eine neue Ersatzprüfschaltung für Hochleistungsschalter.

Von *M. Trautweiler*, Rorschach.

621.316.313 : 621.316.57

Nachdem die bekannten Erscheinungen, welche sich im Hochleistungsschalter abspielen, kurz in Erinnerung gerufen wurden, wird ein Vorschlag zum eindeutigen zahlenmässigen Erfassen des Abschaltvermögens des geprüften Schalters gemacht. Eine Prüfschaltung ist dann einwandfrei, wenn sie diese Zahlenwerte eindeutig zu ermitteln vermag. Daraus werden die Anforderungen an eine brauchbare Prüfschaltung abgeleitet.

Es werden weiter die Hochleistungsprüfung und die Marx-Schaltung untersucht. Es zeigt sich, dass die erste insofern nicht befriedigt, als sie Steilheit und Scheitelwert der wiederkehrenden Spannung nicht beliebig zu ändern gestattet, die zweite, weil bei ihr der Kurzschlußstrom durch den Lichtbogenstrom zu stark verzerrt wird.

Ferner wird eine neue Prüfschaltung beschrieben, bei der der Prüfschalter in einen Schwingungskreis eingeschaltet ist. Dadurch wird die Verzerrung des Kurzschlußstromes vollkommen vermieden und zugleich wird die erforderliche Leistung kleiner als bei der entsprechenden Hochleistungsprüfanlage (ca. 200mal!).

Endlich werden noch einige Versuche erwähnt, welche die Vorteile der neuen Prüfschaltung bestätigen.

Après avoir rappelé brièvement les phénomènes qui se produisent dans l'interrupteur à haute puissance, l'auteur fait une proposition pour fixer exactement par des chiffres la puissance de rupture de l'interrupteur essayé. Un montage d'essai est correct lorsqu'il permet de déterminer sans équivoque ces valeurs numériques. L'auteur en déduit les exigences auxquelles doit satisfaire un montage d'essai pratiquement utilisable.

L'auteur examine ensuite l'essai à haute puissance et le montage de Marx. Il s'avère que le premier n'est pas satisfaisant, principalement parce qu'il ne permet pas de varier à volonté la raideur et l'amplitude de la tension de rétablissement, tandis qu'avec le second le courant de court-circuit est trop fortement perturbé par le courant de l'arc.

Là-dessus, l'auteur décrit un nouveau montage d'essai, dans lequel l'interrupteur à essayer est inséré dans un circuit oscillant. Ceci permet d'éviter complètement la distorsion du courant de court-circuit. Simultanément, la puissance à fournir est bien plus faible que celle exigée d'une installation à haute puissance correspondante (environ 200 fois!).

Finalement, l'auteur signale quelques essais qui confirment les avantages du nouveau montage d'essai.

1. Allgemeine Schalterfragen.

1. Hochleistungsschalter und Sicherungen werden heute ausschliesslich in Hochleistungsprüfanlagen mit einer verfügbaren Leistung in der Grössenordnung von 1000 MVA geprüft. Die Prüfung wird möglichst bei $\cos \varphi = 0$ im Kurzschlusskreis durchgeführt [1]), weil dies die grösste Beanspruchung des Prüflings darstellt. Die tatsächlich erforderliche Wirkleistung ist

$$P = P_v + P_B \tag{1}$$

wo P_v die Verlustleistung der ganzen Versuchsanlage und

$$P_B = \frac{1}{T} \int_0^T i_B \, e_B \, dt \tag{2}$$

die im Lichtbogen während der Schaltzeit T umgesetzte Leistung darstellen. P ist ein Bruchteil der in der Hochleistungsprüfanlage verfügbaren Leistung. Deshalb stellt sich die Frage, ob es möglich ist, die Schalterprüfung mit scheinbarer Leistung durchzuführen, in ähnlicher Weise, wie die Eichung eines Wattmeters mit «Blindeffekt» durch Trennung des Strom- und des Spannungskreises.

2. Bevor sich die Schaltkontakte des Schalters S in Fig. 1 trennen, fliesst durch den Schalter der Betriebsstrom i und bei Kurzschluss der Kurzschlußstrom i_k, der als sinusförmig vorausgesetzt wird. Trennen sich die Schalterkontakte, so entsteht zwischen ihnen im Zeitpunkt A (Fig. 2) ein Lichtbogen.

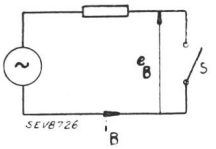

Fig. 1.

Erlöscht der Lichtbogen aus irgendeinem Grunde, so würde an den Schalterklemmen die ebenfalls als sinusförmig vorausgesetzte Klemmenspannung e (in Fig. 2 gestrichelt) auftreten. Der Strom im Lichtbogen i_B weicht nach Eintritt der Schaltertrennung von i_k nur unwesentlich ab, wenn e_B klein ist gegen e. Die Lichtbogenspannung e_B selbst, welche zwischen den Schalterkontakten herrscht, während der Lichtbogen brennt, ist die Spannung, welche nötig ist, um den

[1]) VDE 0670/1937, § 39, und SEV 1924, Richtlinien für die Wahl der Schalter in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen.

dem Strom i_B entsprechenden Ladungstransport zwischen den Kontakten aufrechtzuerhalten. e_B hängt aus diesem Grunde vom Lichtbogenstrom i_B von der Bogenlänge l, vom Druck p und von der Temperatur ϑ des Mediums, in welchem der Bogen brennt, ab. Bogenlänge, Druck und Temperatur werden weitgehend durch die Schalterkonstruktion bestimmt.

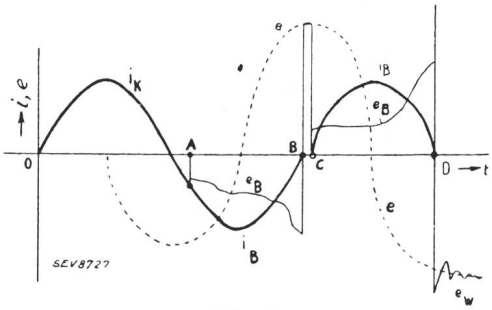

Fig 2.

Im Zeitpunkt B (Fig. 2) geht der Lichtbogenstrom i_B durch Null. Der Lichtbogen erlöscht, die Spannung zwischen den Schalterkontakten steigt auf den momentanen Wert von e an, weil der vom Strom i_B erzeugte Spannungsabfall verschwunden ist. Wird dabei die Durchschlagsfestigkeit der Schaltstrecke überschritten, zündet im Zeitpunkt C ein neuer Lichtbogen. Dieser brennt wieder mit dem Strom i_B und der Lichtbogenspannung e_B. Den eben geschilderten Vorgang bezeichnet man als Wiederzündung.

Im Zeitpunkt D geht der Lichtbogenstrom von neuem durch Null. Der Lichtbogen erlöscht, die Spannung zwischen den Schalterkontakten steigt, wie schon gesagt, auf den momentanen Wert von e an. Wir nehmen an, dass diesmal die Durchschlagsfestigkeit der Schaltstrecke nicht überschritten werde, weil inzwischen die Schalterkontakte weit genug voneinander entfernt sind, oder weil der Schalter auf irgendeine Art diese Durchschlagsfestigkeit genügend erhöht hat. Der Lichtbogen bleibt endgültig erloschen.

Bei ihrem Anstieg im Zeitpunkt D schwingt die Spannung an den Schalterklemmen über den Wert e hinaus, und zwar wegen der infolge der plötzlichen Stromänderung bei Verlöschen des Lichtbogens eintretenden Eigenschwingungen. Diese besonders charakteristische wiederkehrende Spannung e_w pendelt einige Male um den endgültigen Wert $e_w = e$ herum. Frequenz und Verlauf dieses Einschwingungsvorganges sind durch die Induktivitäten und Kapazitäten des Stromkreises und durch die Schalterbauart bestimmt.

Nach Ablauf der beschriebenen Teilvorgänge ist der Abschaltvorgang endgültig beendet, die Kontakte sind elektrisch und mechanisch getrennt.

In den letzten Jahren wurde dieser Abschaltvorgang wegen den ausserordentlich harten Bedingungen, die ein Schalter ertragen muss, eingehend untersucht und beschrieben [2]).

3. Es liegt nun der Gedanke nahe, die Schalterprüfung mit zwei getrennten Anlagen durchzuführen. Die erste würde die Vorgänge von A bis B und von C bis D, welche sich mit grossem Strom und geringer Spannung abspielen, produzieren, die zweite die Vorgänge von B bis C und von D an.

2. Anforderungen, die an eine einwandfreie Prüfschaltung gestellt werden müssen.

1. Die fabrikationsmässige Schalterprüfung hat die Aufgabe, die Leistungsfähigkeit jeden Schaltertyps festzustellen, derart, dass der Käufer auf Grund der ihm gemachten Angaben in der Lage ist, eine zweckmässige Wahl zu treffen.

Die Leistungsfähigkeit eines Schalters kann eindeutig gekennzeichnet werden durch Angabe von:

1. Nennspannung U_n in kV.
2. Nennfrequenz f in Hz.
3. Stosskurzschlußstrom I_s in A.
4. Dauerkurzschlußstrom I_k in A.
5. Steilheit tg α der Einschwingspannung in V/μs.
6. Scheitelwert der Einschwingspannung U_{max} in kV.

Diese Angaben sollen für den rein induktiven Kurzschluss gemacht werden, welcher den schwierigsten Fall darstellt und hier ausschliesslich betrachtet wird. Auf alles andere, wie Prüfung der Schaltfähigkeit usw., soll hier nicht eingetreten werden.

Bevor der eigentliche Abschaltvorgang beginnt, muss der Schalter in der Lage sein, einen einmaligen Kurzschlußstoss von der Amplitude I_S aufzunehmen.

Den Dauerkurzschlußstrom I_k muss der Schalter führen können, bis die Abschaltung beendet ist, ohne mechanisch oder thermisch beschädigt zu werden.

Nach Verlöschen des Lichtbogens wird die elektrische Festigkeit des Dielektrikums zwischen den Schalterkontakten durch den plötzlichen Anstieg der wiederkehrenden Spannung e_w an denselben auf die Probe gestellt. Vom Zeitpunkt des Verlöschens des Lichtbogens wächst die Durchschlagsfestigkeit der Schaltstrecke an. Ihr Verlauf wird bestimmt durch die Temperatur der Gasstrecke beim Verlöschen des Bogens und durch die Schalterbauart. Der Verlauf der wiederkehrenden Spannung e_w wird durch die Schalterbauart und durch die Anlage bestimmt, in welche der Schalter eingebaut ist. Um diesen Vorgang dennoch zahlenmässig

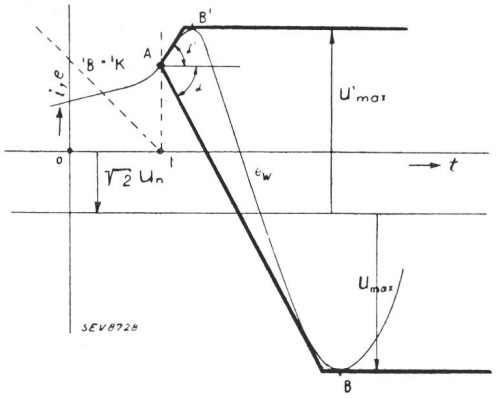

Fig. 3.

erfassen zu können, schlagen wir die Bestimmung der Steilheit tg α und des Scheitelwertes U_{max} der wiederkehrenden Spannung vor, gemäss Fig. 3.

Die dick gezeichneten Geraden sind die Tangenten an die wiederkehrende Spannung e_w im Punkt A, zur Zeit t, wo i_k durch Null geht, und in den beiden ersten Scheitelpunkten B und B' von e_w. Ein Schalter, der durch den in Fig. 3 gezeichneten Verlauf von e_w nicht zum Wiederzünden gebracht wurde, wird es auch sicher nicht durch irgend einen Verlauf von e_w, innerhalb der dick gezeichneten Geraden. Die Lage dieser Geraden ist eindeutig bestimmt durch tg α, tg α', U_{max} und U'_{max}, denn beim Hochleistungsschalter ist die Strecke $At = e_{B\,max}$ klein gegen U_{max}.

[2]) Kesselring, ETZ 1929, S. 1009.
Kesselring, ETZ 1934, S. 116.
Marx, Lichtbogenstromrichter, Springer 1932.
Müller, Zeitschr. f. Tech. Physik 1931, S. 399.

Wie aber kann der Käufer bestimmen, welche Werte tg α und U_{max} er vom Lieferanten verlangen soll? Nach Wanger und Brown [3]) kann die Frequenz der wiederkehrenden Spannung für ein bestehendes Netz ermittelt werden; daraus ergibt sich tg α. U_{max} kann zu 2 $(e_{B\,max} + \sqrt{2}\,U_n)$ angenommen werden, Extremfall eines Netzes ohne Dämpfung.

2. Durch die Angabe der 6 erwähnten Zahlenwerte ist das Abschaltvermögen eines Schalters eindeutig bestimmt.

Dass dies bei den zur Zeit geltenden Vorschriften [4]) nicht der Fall ist, ist bekannt, da ja die Steilheit der wiederkehrenden Spannung nicht in Betracht gezogen wird.

3. Was muss nun eine Prüfschaltung für Bedingungen erfüllen, um diese 6 Zahlenwerte eindeutig ermitteln zu können? Auf die Ermittlung von I_s, Stosskurzschlußstrom, d. h. auf die elektrodynamische Prüfung treten wir nicht ein, wohl aber auf die Emittlung von I_k, tg α und U_{max} bzw. tg α' und U'_{max}.

Zunächst wollen wir mit irgendeiner Anlage (Netz, Hochleistungsprüffeld oder Ersatzschaltung) eine Kurzschluss-Abschaltung vornehmen. Das Resultat bekommen wir in der Gestalt von 2 Oszillogrammen: Strom i_k und Spannung e_B, welche in e_w übergeht. Daraus kann man graphisch tg α und U_{max} (bzw. tg α' und U'_{max}) konstruieren. Man bekommt also die gesuchten Werte ohne weiteres mit jeder Anlage, sie sind aber noch *nicht eindeutig*.

Eindeutig werden die Werte dann, wenn sie das grösstmögliche Abschaltvermögen des Schalters darstellen. Einwandfrei wird die Prüfschaltung dann, wenn sie erlaubt, den Schalter in jeder Hinsicht auf das äusserste zu beanspruchen. Das ergibt folgende Bedingungen für die Prüfschaltung:

1. Der Strom i_k muss beliebig gross gemacht werden können.
2. Der Strom i_k muss sinusförmig bleiben, während der Lichtbogen brennt, und darf unter keinen Umständen verfrüht Null werden.
3. Die wiederkehrende Spannung muss in der Steilheit (tg α) ihres ersten Anstieges beliebig gross gemacht werden können, ebenso der Scheitelwert U_{max} der wiederkehrenden Spannung.
4. Lichtbogen und wiederkehrende Spannung müssen sich beliebig oft in der richtigen Reihenfolge ablösen können, damit gegebenenfalls ein beliebig häufiges Wiederzünden möglich ist.

4. Einer Erläuterung bedarf die zweite Bedingung. Der Dauerkurzschlußstrom I_k soll ein Mass sein für die höchste zulässige thermische Beanspruchung des Schalters. Während der Lichtbogen beim Abschalten brennt, wird in demselben die Energie:

$$W_B = \int_0^T i_B\, e_B\, dt \qquad (3)$$

in Wärme umgesetzt. Diese Wärme muss von den Schalterkontakten und vom Löschmittel aufgenommen und abgeführt werden können. Bei gegebenem Schaltertyp ist e_B und W_B vollständig durch i_B bestimmt [5]). Weicht der Strom i_B von der Sinusform ab, in der Weise, dass er früher durch Null geht als i_k, welcher sinusförmig sein soll, so ist (Fig. 4):

$$\text{mit } e'_B = \frac{K \cdot t^{\alpha}}{i_B^{\beta}} \quad \begin{cases} 1/2 < \alpha < 2 \\ 0 < \beta < 3/5 \end{cases} \qquad (4)\ ^{5)}$$

$$p'_B = e'_B \cdot i_B \doteq \frac{K \cdot t^{\alpha}}{i_B^{(\beta-1)}} \qquad (5)$$

$$\frac{p'_B}{p_B} = \left(\frac{i_k}{i_B}\right)^{(\beta-1)} = \left(\frac{i_B}{i_k}\right)^{(1-\beta)} \qquad (6)$$

Da $1 > (1-\beta) > 0{,}4$ und ferner

$$\frac{i_B}{i_k} < 1$$

so ist $p'_B < p_B$

Der Augenblickswert der in Wärme umgesetzten Arbeit ist bei sinusförmigem Strom i_k während der ganzen Brenndauer des Lichtbogens grösser. Die Erwärmung der Kontakte, der Löschmittelverbrauch

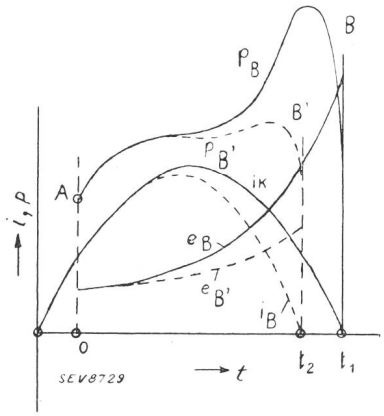

Fig. 4.

und die Temperatur der zu entionisierenden Gasstrecke beim Verlöschen des Lichtbogens sind bei sinusförmigem Strom i_k ebenfalls grösser als bei nicht sinusförmigem Strom. *Eine Abweichung des Lichtbogenstromes von der Sinusform ist bei einer Schalterprüfung unzulässig*, weil sie in jeder Hinsicht die Prüfung erleichtern würde.

5. Abschliessend sei noch bemerkt, dass, sobald der Schalterlichtbogen bei der Prüfung vor seiner endgültigen Löschung n-mal wiederzündet, das für den Schalter n-mal grössere thermische Beanspruchung bedeutet. Wird er aber dadurch nicht beschädigt, so war er dieser grösseren Beanspruchung gewachsen, und das drückt sich aus durch die in diesem Fall unter Umständen grossen Werte von tg α und U_{max} (grosser Kontaktabstand) nach dem endgültigen Erlöschen des Bogens. Selbstverständlich darf der Fabrikant nicht verschweigen,

[3]) Brown-Boveri-Mitt. 1937, S. 283.

[4]) Zusammenstellung von W. Kaufmann ETZ 1938, S. 553.

[5]) Trautweiler, Diss.: «Ueber die Möglichkeit der Prüfung von Hochleistungsschaltern und Sicherungen mit von einander unabhängigen Spannungs- und Stromquellen, Zürich 1940, 2. Die Lichtbogenspannung.

dass der Schalter erst nach n Halbwellen die angegebene Beanspruchung beherrscht.

3. Die bisherigen Prüfverfahren.

1. Schalter werden heute noch beinahe ausschliesslich mit einer Hochleistungsprüfanlage geprüft. Hier wird die im rotierenden Teil des Motor-Generator-Aggregates aufgespeicherte Energie herangezogen, um die bereits erwähnte Prüfleistung [Gl. (1)] zu erzeugen.

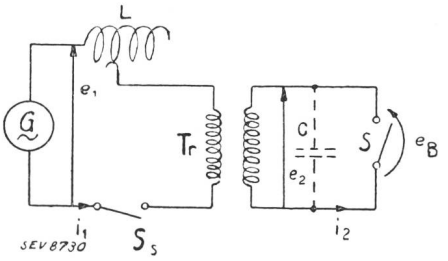

Fig. 5.

Fig. 5 zeigt die prinzipielle Anordnung einer Hochleistungsprüfschaltung: Der Generator G liefert den Kurzschlußstrom und die wiederkehrende Spannung über einen Schutzschalter S_S und eine veränderliche Drosselspule L auf einen Transformator Tr. Der zu prüfende Schalter S liegt an der Sekundärseite dieses Transformators.

Inwieweit erfüllt nun diese Hochleistungsprüfanlage die eben aufgestellten Forderungen an eine einwandfreie Prüfschaltung?

Punkt 1 ist erfüllt. Zu Punkt 2 ist zu bemerken, dass der Kurzschlußstrom i_k durch den Lichtbogen nicht verzerrt wird, weil E_1 gross ist gegen $e_{B\,max}$ [6]. Durch Entnahme von kinetischer Energie aus dem rotierenden Generator wird dieser jedoch abgebremst; es tritt eine Abnahme der Frequenz und innerhalb einer Halbperiode eine Verzerrung des Stromes i_k auf, in dem Sinn, dass er früher durch Null geht, als wenn er sinusförmig bleiben würde.

Punkt 3 wird von der Hochleistungsprüfanlage in keiner Weise erfüllt. Veränderlich sind nur die Drosselspule L (Fig. 5), das Uebersetzungsverhältnis des Transformators und, in wenigen Stufen, die Spannung des Generators. Nach Einstellen des Stromes I_k und der Spannung E_2 ist im allgemeinen keine Veränderung der Einschwingfrequenz der wiederkehrenden Spannung mehr möglich. Auch die Dämpfung und damit der Scheitelwert U_{max} der wiederkehrenden Spannung ist unveränderlich gegeben.

Punkt 4 ist erfüllt.

Die *Hochleistungsprüfung ist demnach keineswegs eine einwandfreie Prüfmethode.*

2. Es würde zu weit führen, alle in der Literatur angegebenen Ersatzschaltungen zu untersuchen. Marx ist der erste, der eine Ersatzprüfschaltung ausprobiert hat, welche «ganz allgemein zur Untersuchung aller Arten von Lichtbogen-Löscheinrichtungen anwendbar ist» [7]. Fig. 6 zeigt diese Ersatzschaltung im Prinzip. Die angegebenen Werte sind die von Verse verwendeten; sie sollen hier nur die Grössenordnung der einzelnen Schaltelemente veranschaulichen. Der dick gezeichnete Kreis führt den Kurzschlußstrom, wobei die Spannung E_1 höchstens die 2—5fache Lichtbogenspannung e_B beträgt. Der auf die Spannung E aufgeladene Kondensator C_2 entlädt sich über R_2 und R_3 im Augenblick, wo die Funkenstrecke F_2 zum Ansprechen gebracht

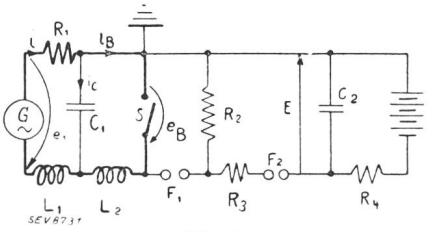

Fig. 6.
$R_1 = 0{,}2\ \Omega$; $L_1 = 86 \cdot 10^{-3}$ H; $L_2 = 76 \cdot 10^{-3}$ H;
$C_1 = 0{,}2\ \mu$F; $R_2 = 4300\ \Omega$; $R_3 = 800\ \Omega$; $C_2 = 9000$ pF.

wird und erzeugt einen Spannungsstoss an den Klemmen des Prüflings S. F_2 wird vom Spannungsabfall am Widerstand R_1 gesteuert und spricht mit einer einstellbaren Verzögerung nach dem Nullwerden von i, beim Löschen des Abschalt-Lichtbogens in S an. Diese Vorrichtung ist auf Fig. 6 nicht eingezeichnet. Es soll nun untersucht werden, wie diese Prüfschaltung die aufgestellten Bedingungen erfüllt.

Punkt 1 ist ohne weiteres erfüllt. Punkt 2 dagegen nicht. Es ist selbstverständlich, dass bei einer Generatorspannung E_1, von nur 2- bis 5mal $e_{B\,max}$, diese Lichtbogenspannung den Strom entscheidend beeinflusst, d. h. verzerrt, so dass er bedeutend früher durch Null geht, als wenn er sinusförmig wäre. Dies wurde bereits von Kesselring bemerkt [8]. Die Berechnung dieser Abweichung gibt ein früheres Durchnullgehen um die Zeit:

$$\Delta t \cong \frac{e_{B\,max}}{E_1 \sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\omega} \qquad (7)$$

was gegen eine Halbperiode $\frac{\pi}{\omega}$ nicht unbedeutend ist.

Nun Punkt 3. Die Spannungsprüfung wird nach den Angaben von Verse in der Weise durchgeführt, dass nach einer einstellbaren veränderlichen Zeit nach dem Verlöschen des Lichtbogens ein sehr steiler Spannungsstoss auf den Schalter gegeben wird mit ebenfalls einstellbarem Scheitelwert. Es wird festgestellt, bei welchem Scheitelwert E der Stossspannung die Wiederzündung eingeleitet wird, zur eingestellten Zeit T. Auf diese Weise ist es möglich, den zeitlichen Verlauf der wiederkehrenden dielektrischen Festigkeit an den Klemmen des Schalters aufzunehmen (Fig. 7). Dieses Verfahren ist sehr geeignet für die physikalische Erforschung der wiederkehrenden dielektrischen Festigkeit; es

[6]) Trautweiler, Diss. Kap.: «Die Schalterprüfung im Hochleistungsprüffeld.»

[7]) Verse. Diss. «Eine neue Ersatz-Prüfschaltung für Lichtbogen-Löscheinrichtungen.» Braunschweig 1935.

[8]) ETZ 1937, S. 725.

ist aber viel zu umständlich für die fabrikationsmässige Prüfung von Schaltern. Es soll jedoch auf diesen Nachteil der Marxschen Ersatzschaltung nicht näher eingetreten werden, weil er sich ohne prinzipielle Aenderung vermeiden lässt, nämlich durch Wahl eines einzigen zweckmässig festgelegten Prüfspannungsstosses. Es würde sich dann nur noch darüber streiten lassen, ob es wirklich vorteilhaft ist, den Stromnulldurchgang zur Auslösung des Stosses zu verwenden, ob sich dadurch der Anfangspunkt A (Fig. 7) wirklich genügend genau erfassen lässt.

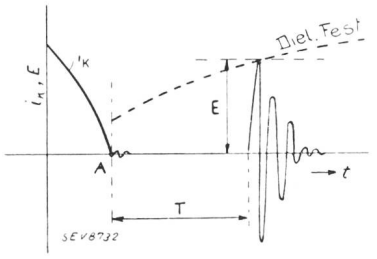

Fig. 7.

Zu Punkt 4. Es ist wohl möglich, durch den Spannungsstoss den Lichtbogen zum Wiederzünden zu bringen, denn der Generator ist jederzeit bereit, Strom abzugeben. Nach abermaligem Verlöschen des Lichtbogens muss aber auch der Kondensator C_2 (Fig. 6) bereits wieder aufgeladen sein, um einen neuen Spannungsstoss abgeben zu können. Um das zu erreichen, muss man über eine sehr ergiebige Gleichspannungsquelle verfügen. *Auch die Marx-Schaltung ist keine einwandfreie Prüfschaltung.*

4. Das Prinzip der neuen Prüfschaltung.

1. Ist der Schalter S eingeschaltet, so fliesst im dick gezeichneten Kreis der Kurzschlußstrom I_k (Fig. 8). Dieser wird vom Generator G im Resonanzkreis L, C, welcher auf die Generatorfrequenz ω_1 abgestimmt ist, erzeugt. cos φ ist im dick aus-

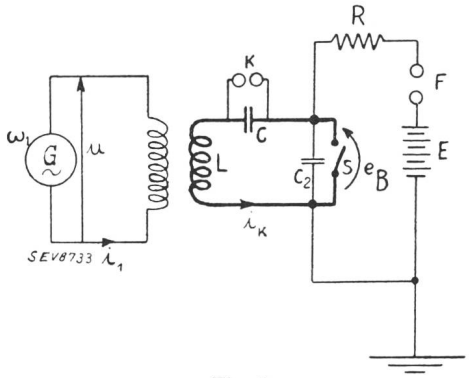

Fig. 8.

gezogenen Kreis beinahe $= 0$. Die Spannung U ist in der Grössenordnung der Lichtbogenspannung des Schalters, während der Strom $I_1 = \frac{I_k}{\varrho}$ ist, wenn ϱ die Resonanzüberhöhung des Kreises L, C ist und das Uebersetzungsverhältnis des Transformators $\ddot{u} = 1$ ist. Man sieht, dass der Generator G nur einen kleinen Bruchteil der Leistung, welche ein Hochleistungsgenerator für den gleichen Schalter haben müsste, hergeben muss. Die Kugelfunkenstrecke K ist so eingestellt, dass sie bei der Spannung U nicht anspricht.

Schaltet S aus, so entsteht zunächst ein Lichtbogen. Reisst der Lichtbogen beim Stromnulldurchgang ab, so tritt plötzlich eine Spannung $u' > e_B$ an den Schalterklemmen auf (u' = Spannung der Löschspitze). Diese Spannung veranlasst über einen hier nicht gezeichneten Auslösekreis die Funkenstrecke F zum Zünden. Dadurch wird der Kondensator C_2 auf die Spannung E aufgeladen. Die Geschwindigkeit des Anstieges des Spannungsstosses an den Klemmen des Prüflings ist im wesentlichen bestimmt durch $R \cdot C_2$. Tritt Wiederzündung ein, so ist der alte Schwingungskreis von neuem geschlossen und der Strom I_k setzt wieder ein, während die Spannung an den Schalterkontakten auf die Lichtbogenspannung zusammenbricht.

2. Dieser Kurzschlußstrom ist leicht aus der Transformatorentheorie zu ermitteln.

$$\frac{\mathfrak{U}_1}{\mathfrak{J}_1} = \mathfrak{Z}_1 = r_1 + j\,\omega\,(L + \lambda_{11}) + \frac{\omega^2 L^2}{r_2 + j\,\omega\,(L + \lambda_{22}) - j\,\dfrac{1}{\omega C}} \tag{8}$$

In Fig. 9 ist das Uebersetzungsverhältnis des Transformators $\ddot{u} = 1$ angenommen.

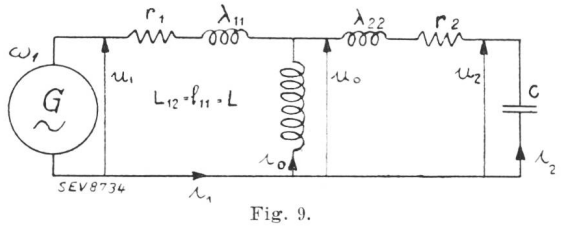

Fig. 9.

$$0 = \mathfrak{J}_2\, r_2 + \mathfrak{J}_2\, j\left(\omega\,\lambda_{22} - \frac{1}{\omega C}\right) - \mathfrak{J}_0\, j\,\omega\, L \tag{9}$$

$$\mathfrak{J}_0 = \mathfrak{J}_1 - \mathfrak{J}_2 \tag{10}$$

$$0 = \mathfrak{J}_2\, r_2 + \mathfrak{J}_2\, j\left[\omega\,(L + \lambda_{22}) - \frac{1}{\omega C}\right] - \mathfrak{J}_1\, j\,\omega\, L \tag{11}$$

$$\frac{\mathfrak{J}_1}{\mathfrak{J}_2} = \frac{r_2 + j\left[\omega\,(L + \lambda_{22}) - \dfrac{1}{\omega C}\right]}{j\,\omega\, L} \tag{12}$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\sqrt{r_2^2 + \left[\omega\,(L + \lambda_{22}) - \dfrac{1}{\omega C}\right]^2}}{\omega L} = \frac{1}{\varrho} \tag{13}$$

ϱ wird am grössten für die Resonanzbedingung:

$$\omega\,(L + \lambda_{22}) - \frac{1}{\omega C} = 0 \tag{14}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{(L + \lambda_{22})\, C}} \tag{15}$$

Damit wird

$$\varrho = \frac{\omega L}{r_2} \tag{15a}$$

und

$$\mathfrak{Z}_1 = r_1 + \frac{\omega^2 L^2}{r_2} + j\,\omega\,(L + \lambda_{11}) \tag{15b}$$

daraus

$$\mathfrak{J}_1 = \frac{\mathfrak{U}_1}{\mathfrak{Z}_1}$$

Fig. 10 stellt das Vektordiagramm für die Schaltung dar. Man sieht, es müssen die Verlustfaktoren der Spulen, insbesondere $\frac{r_2}{\omega L}$, klein gehalten werden, ferner muss $\mathfrak{J}_0 = \mathfrak{J}_1 - \mathfrak{J}_2 \cong \mathfrak{J}_2$ gross sein, d. h. man verwendet am besten einen eisenlosen Transformator mit grossem Kupferquerschnitt. Die Streuung spielt eine untergeordnete Rolle. Sobald der Schwingungskreis geöffnet wird, muss $\mathfrak{J}_1 = \mathfrak{J}_0$ sein.

3. Betrachten wir nochmals Fig. 8, so können wir sofort die gezeichnete Batterie E durch einen Hochspannungstransformator ersetzt denken, dessen Primärwicklung auch vom Generator G gespeist

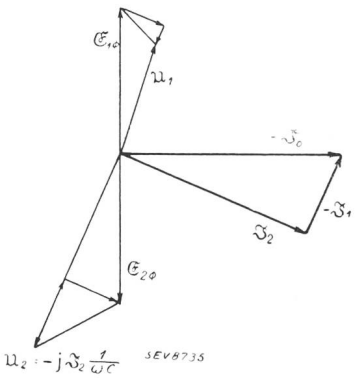

Fig. 10.

wird. Der Stromnulldurchgang von I_k, d. h. das Verlöschen des Lichtbogens und das Ansprechen der Funkenstrecke F geschehen zwangsläufig in der Nähe des Maximums der Spannung $\mathfrak{U}$ (siehe auch $\sphericalangle\, \mathfrak{J}_2, \mathfrak{U}_1 \cong 90°$ in Fig. 10).

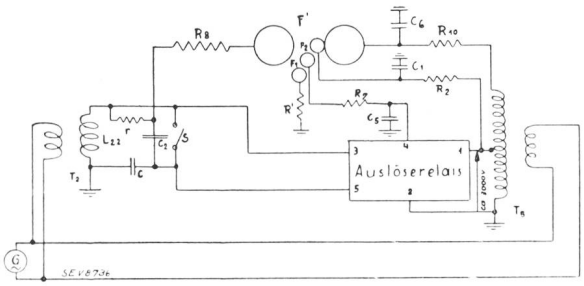

Fig. 11.

Die Schaltung sieht dann nach Fig. 11 aus. Das Auslöserelais muss so gebaut sein, dass seine Eigenzeit nur wenige Mikrosekunden beträgt.

5. Die technische Beurteilung der neuen Schaltung.

Wir wollen wieder die Prüfschaltung nach den 4 aufgestellten Gesichtspunkten beurteilen.

Punkt 1, beliebig grosser Kurzschlußstrom, ist sofort erfüllbar.

Zur Beurteilung von Punkt 2, sinusförmiger Lichtbogenstrom, müssen wir eine Rechnung anstellen: Fig. 12 zeigt das ausführliche Ersatzschema

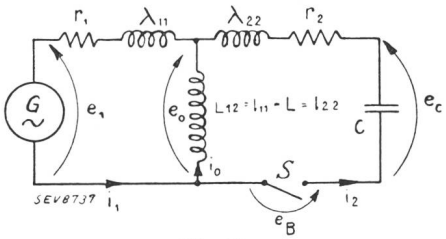

Fig. 12.

für den Kurzschlußkreis (dick gezeichnet in Fig. 8, $\ddot{u} = 1$ angenommen).

Die Gleichungen lauten:

$$\left.\begin{aligned} e_1 &= L\,\frac{di_0}{dt} + \lambda_{11}\,\frac{di_1}{dt} + i_1\,r_1 \\ e_0 &= e_B + \frac{1}{C}\int i_2\,dt + i_2\,r_2 + \lambda_{22}\,\frac{di_2}{dt} \end{aligned}\right\} \tag{16}$$

$$\left.\begin{aligned} e_1 &= -\,E_1\,\sqrt{2}\cos\omega t \\ i_1 &= i_0 + i_2 \end{aligned}\right\} \tag{17}$$

Die Kapazität C_2 (Fig. 8) muss so gewählt werden, dass sie die Lichtbogenspannung nicht verändert, wenigstens in den Grenzen, die es erlauben, diese Spannung noch als

$$e_B = \gamma \cdot \varepsilon^{\delta\,(t-t_0)} \tag{18}$$ [9]

darzustellen.

Aus diesen Gleichungen entsteht die Differentialgleichung für die Schaltung:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{1-\sigma}{L}\,\frac{d^2 e_1}{dt^2} - \frac{\omega\,\delta_1}{L_{22}}\,\frac{de_B}{dt} - \frac{1}{L_{22}}\,\frac{d^2 e_B}{dt^2} = \sigma\,\frac{d^3 i_2}{dt^3} \\ &+ (\delta_1 + \delta_2)\,\omega\,\frac{d^2 i_2}{dt^2} + \left(\delta_1\,\delta_2 + \frac{1}{\omega^2 L_{22} C}\right)\omega^2\,\frac{di_2}{dt} \\ &\qquad + \frac{\omega^3\,\delta_1}{\omega^2 L_{22}\,C}\,i_2 \end{aligned}\right\} \tag{19}$$

Mit den Bezeichnungen:

$$L_{11} = l_{11} + \lambda_{11} \qquad L_{22} = l_{22} + \lambda_{22}$$

$$\sigma = \frac{L_{11}\,L_{22} - L^2}{L_{11}\,L_{22}} \qquad \delta_1 = \frac{r_1}{\omega\,L_{11}} \qquad \delta_2 = \frac{r_2}{\omega\,L_{22}} \tag{20}$$

ω = Kreisfrequenz des Generators.

Es soll kurz die Lösung besprochen werden. Wir lösen zunächst:

$$\left.\begin{aligned} 0 &= \sigma\,\frac{d^3 i_2}{dt^3} + (\delta_1 + \delta_2)\,\omega\,\frac{d^2 i_2}{dt^2} \\ &+ \left(\delta_1\,\delta_2 + \frac{1}{\omega^2 L_{22} C}\right)\omega^2\,\frac{d\,i_2}{dt} + \frac{\omega^3\,\delta_1}{\omega^2 L_{22}\,C}\,i_2 \end{aligned}\right\} \tag{21}$$

Das kommt auf die Lösung einer Gleichung dritten Grades heraus:

[9]) Trautweiler, Diss. 2. Die Lichtbogenspannung.

$$\left.\begin{aligned} 0 = \sigma x^3 + (\delta_1 + \delta_2)\,\omega\, x^2 \\ + \left(\delta_1 \delta_2 + \frac{1}{\omega^2 L_{22} C}\right) \omega^2 x + \frac{\omega_1^3 \delta_1}{\omega^2 L_{22} C} \end{aligned}\right\} \quad (22)$$

oder auch:

$$\left.\begin{aligned} -\frac{\sigma}{z} = (\delta_1 + \delta_2)\,\omega + \left(\delta_1 \delta_2 + \frac{1}{\omega^2 L_{22} C}\right) \omega^2 z \\ + \frac{\omega^3 \delta_1}{\omega^2 L_{22} C} z^2 \quad \text{mit: } z = \frac{1}{x} \end{aligned}\right\} \quad (23)$$

d. h. wir suchen den Schnitt einer Hyperbel mit einer Parabel. Wir können Angaben machen über die Grössenordnung der Koeffizienten, welche durch die praktischen Werte der Schaltelemente gegeben ist:

$$\begin{aligned} \sigma \leqq 1 \qquad & \omega = 314 \\ \omega^2 L_{22}\, C = 1 \qquad & \delta_1 \text{ und } \delta_2 \leqq 0{,}1 \end{aligned} \quad (24)$$

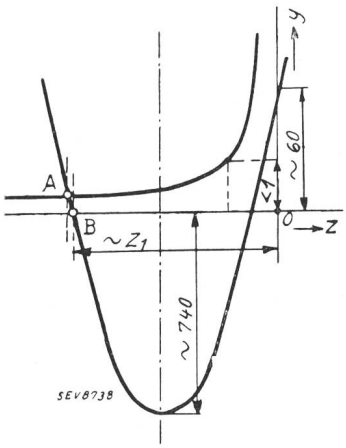

Fig. 13.

Daraus können wir nus die gegenseitige Lage unserer Kegelschnitte vorstellen (Fig. 13). Man sieht aus diesem Bild, dass wir keinen grossen Fehler begehen, wenn wir als Abszisse $O\,B$ statt $O\,A$ bestimmen, weil die Tangente an die Parabel durch B sehr steil verläuft und weil die Hyperbel sehr nahe an der x-Axe verläuft.

Wir finden so $O\,B = z_1$:

$$z_1 = -\frac{\delta_1 \delta_2 \omega^2 L_{22}\, C + 1}{\omega\, \delta_1} \cong -\frac{1}{\omega\, \delta_1} = -\frac{L_{11}}{r_1} \quad (25)$$

Nun kennen wir eine Lösung der Gl. (22). Man kann diese auf eine Gleichung zweiten Grades reduzieren und findet die beiden Lösungen z_2 und z_3 ohne weiteres.

$$z_{2,3} = \omega^2 \frac{\delta_1 + \delta_2}{2} L_{22} C \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4}{\omega^3 \delta_1}}\right] \quad (26)$$

Man sieht, dass der Ausgleichvorgang aperiodisch ist und dass z_2 bzw. z_3 gegen z_1 vernachlässigt werden kann.

Damit ist die allgemeine Lösung der Differentialgleichung (16) gefunden. Die partikuläre Lösung ist einfach der Dauerkurzschlußstrom, nach Abklingen des Ausgleichsvorgangs, verzerrt durch die Lichtbogenspannung e_B. Das Resultat lautet:

$$i_2 = I_2 \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_1) + A\, \varepsilon^{-\frac{r_1}{L_{11}}(t - t_0)} + k \cdot e_B \quad (27)$$

$$\left.\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_1 = \delta_1 \\ I_2 = \frac{1 - \sigma}{\sqrt{1 + \left(\frac{r_2}{\omega L}\right)^2} \cdot \omega L} E_1 \cong \frac{E_1}{\omega L} \end{aligned}\right\} \quad (28)$$

$$\left.\begin{aligned} k = -\frac{(r + L_{11} \cdot \delta)\,\delta}{\left\{\begin{aligned}(L_{11} L_{22} - L^2)\,\delta^3 + (r_1 L_{22} + r_2 L_{11})\,\delta^2 \\ + r_1 r_2\, \delta + \frac{L_{11}}{C}\delta + \frac{r_1}{C}\end{aligned}\right\}} \\ k \cong -C \cdot \delta \end{aligned}\right\} \quad (29)$$

vorausgesetzt, dass $C < L_{11}, L_{22}, r_1, r_2$.

Zur Zeit $t = t_0$ wird der Schalter geöffnet. Vorher war der Strom:

$$i_2 = I_2 \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_1) \quad (30)$$

Der Strom i_2 muss für $t = t_0$ gleich gross sein. Ebenso müssen der Strom i_1 und die Spannung e_0 zur Zeit t_0 vor und nach dem Oeffnen des Schalters gleich gross sein. Dadurch ist die Integrationskonstante bestimmt. Rechnet man diese aus, so findet man:

$$i_2 = I_2 \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi_1) + k \left(e_B - \gamma\, \varepsilon^{-\frac{r_1}{L_{11}}(t - t_0)}\right) \quad (31)$$

Daraus kann man nun berechnen, wie gross die Generatorspannung mindestens sein muss, damit

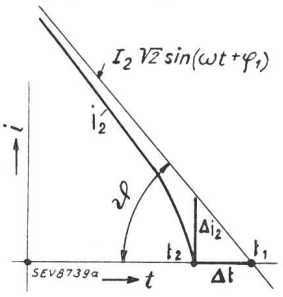

Fig. 14.

der Einfluss der Lichtbogenspannung auf den Stromverlauf vernachlässigt werden darf. Auf Fig. 14 ist

$$\Delta i_2 = \left[1 - \frac{\varepsilon^{-\frac{r_1}{L_{11}} \frac{\pi}{\omega}}}{\varepsilon^{\delta \frac{\pi}{\omega}}}\right] e_{B_{max}} \cdot C \cdot \delta \quad (32)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta i_2}{\operatorname{tg} \vartheta} = -\frac{\Delta i_2}{\omega I_2 \sqrt{2}} \quad (33)$$

Vorausgesetzt ist, dass der Schalter unmittelbar beim vorigen Nulldurchgang ausgelöst wurde; das ist der schlimmste Fall, weil dann $1 - \frac{\varepsilon^{-\frac{r_1}{L_{11}}(t - t_0)}}{\varepsilon^{\delta (t - t_0)}}$ seinen grössten Wert annimmt.

$$\Delta t = -\left[1 - \frac{\varepsilon^{-\frac{r_1}{L_{11}} \frac{\pi}{\omega}}}{\varepsilon^{\delta \frac{\pi}{\omega}}}\right] C L \cdot \frac{e_{B\,max}}{E_1 \sqrt{2}} \cdot \delta \quad (34)$$

$$\Delta t \leqq \frac{e_{B\,max}}{E_1 \sqrt{2}} \cdot \frac{\delta}{\omega^2} \qquad C L \cong \frac{1}{\omega^2} \quad (35)$$

Das heisst, dass wenn auch e_B die gleiche Grössenordnung wie E_1 hat, so kann Δt gegen $\frac{\pi}{\omega}$ jederzeit vernachlässigt werden.

Bei einer konstanten Lichtbogenspannung $e_B =$ konst. ($\delta = 0$) wäre Δt sogar 0, d. h. der Lichtbogenstrom wäre vollkommen sinusförmig. Die Schaltung genügt somit den Anforderungen an eine brauchbare Prüfschaltung in bezug auf den Lichtbogenstromverlauf, im Gegensatz beispielsweise zur Marxschen Ersatzschaltung.

Punkt 3. Die Form des Spannungsstosses lässt sich ohne weiteres regulieren durch geeignete Wahl von R_s und r (Fig. 11). Die Höhe von U_{max} wird am Transformator T_5 eingestellt. Wie schon erwähnt, können Steilheit tg α und Scheitelwert U_{max} der wiederkehrenden Spannung aus einem Oszillogramm, welches den Spannungsverlauf an den Schalterklemmen beim Abschalten zeigt, konstruiert werden.

Punkt 4. Nach Wiederzündung ist der Stromschwingungskreis wieder geschlossen, und der Kurzschlußstrom setzt ohne weiteres wieder ein (Fig. 20). Das Vorbereiten für den nächsten Spannungsstoss in einer Halbperiode bietet mit dem Hochspannungstransformator als Stromquelle keine Schwierigkeit, weil dieser leicht für die dazu nötige Leistung gebaut werden kann, im Gegensatz zu dem bei Marx nötigen Gleichrichter.

Man sieht, *dass diese neue Ersatzschaltung durchwegs als einwandfrei bezeichnet werden darf im Sinne der in Abschnitt 2 aufgestellten Bedingungen.*

6. Die wirtschaftliche Beurteilung und die praktische Ausführung der neuen Schaltung.

1. Man kann den bei den drei besprochenen Prüfschaltungen nötigen Leistungsaufwand leicht vergleichen, wenn man annimmt, dass die Lichtbogenspannung e_B durchschnittlich $\frac{1}{20}$ der Schalternennspannung U_n betrage. Dann wird die Prüfleistung

a) bei der Hochleistungsprüfanlage:

$$P_1 = I_k \cdot U_n \tag{36}$$

b) bei der Marx-Schaltung:

$\frac{E_1}{e_B} = 5$ E_1 Spannung des Prüfgenerators

$$P_2 = \frac{5 \cdot U_n}{20} I_k = \frac{1 \cdot P_1}{4} \tag{37}$$

c) bei der neuen Schaltung:

$$\frac{E_1}{e_B} = 2 \qquad \varrho = \frac{I_k}{I} = 20$$

I: Strom des Prüfgenerators

$$P_3 = \frac{2 \cdot U_n}{20} \cdot \frac{I_k}{20} = \frac{1}{200} P_1 \tag{38}$$

Diese Verhältnisse sind in Fig. 15 dargestellt.

Man sieht, dass die neue Schaltung bezüglich der aufzuwendenden Prüfleistung einen so gewaltigen Vorteil bietet, dass es sich erübrigt, genauere Annahmen über das Verhältnis $\frac{U_n}{e_B}$ zu machen.

Auch die zusätzliche Leistung für den Hochspannungstransformator wird nicht wesentlich ins Gewicht fallen. Dazu kommen die Vorteile eines unverzerrten Lichtbogenstromes und einer vollständig mit Wechselstrom betriebenen Anlage.

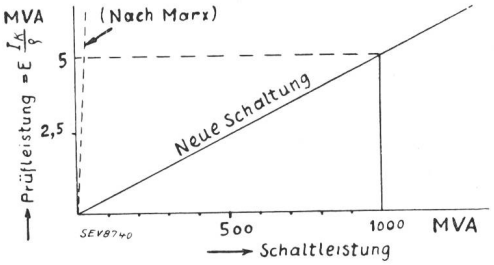

Fig. 15.

Als Nachteil könnte auf den ersten Blick der grosse erforderliche Kondensator C erscheinen ($C > 1000$ μF). Dieser Kondensator ist aber nur während dem Bestehen des Kurzschlußstromes unter Spannung, d. h. während einigen Halbperioden. Er braucht deshalb gar nicht sehr verlustfrei zu sein und es ist sehr wohl denkbar, einen Elektrolytkondensator zu verwenden.

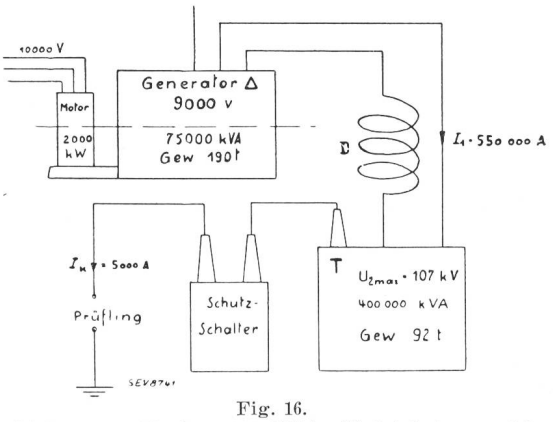

Fig. 16.
Hochleistungsprüfanlage 500 MVA. Maßstab 1 cm = 2,5 m.

2. Es soll nun eine Prüfanlage nach dieser Ersatzschaltung neben eine Hochleistungsprüfanlage gleicher Leistungsfähigkeit gestellt werden (Fig. 16 und 17).

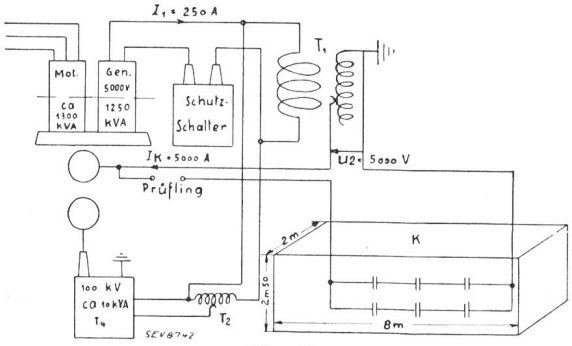

Fig. 17.
Ersatzprüfschaltung 500 MVA. Maßstab 1 cm = 2,5 m.

Bei der Hochleistungsprüfanlage wird die Prüfspannung U_2 durch Anzapfungen am Transformator T (Fig. 16) reguliert, während der Kurzschlußstrom I_k durch Verändern der Drosselspule D eingestellt wird.

Bei der Ersatzschaltung (Fig. 17) wird zunächst die Spannung

$$U_2 = 2 \times \text{Nennspannung des Prüflings}$$

durch Anzapfungen am Transformator T_1 eingestellt. Dann wird durch geeignete Serie- und Parallelschaltung der Kapazitätselemente des Kondensators K dafür gesorgt, dass dieser einerseits mit Sicherheit die Spannung U_2 erträgt (300 Volt pro Element) und anderseits die dem Strom I_k entsprechende Kapazität C erhält.

$$C = \frac{I_k}{\omega U_2} \tag{39}$$

Am Transformator T_2 wird die Primärspannung U_3 so eingestellt, dass T_3 sekundärseitig die gewünschte Stoßspannung U_4 hergibt.

7. Bericht über die angestellten Versuche.

Am Elektrotechnischen Institut der Eidg. Techn. Hochschule wurden Versuche mit einer solchen neuen Prüfschaltung durchgeführt. Das geschah zwar in bescheidenem Rahmen im Vergleich zu den Leistungen grosser Schalter. Die Versuche zeigten aber recht gute Uebereinstimmung der Rechnung mit den wirklichen Verhältnissen. Die Anlage [10]) wurde von einem Dreiphasensynchron-Generator, dessen einphasige Leistung 2,31 kW betrug, gespeist. Es wurden einphasige Abschaltungen vorgenommen, mit 200 A Kurzschlußstrom und 2800 V Scheitelspannung. Das stellt eine Abschaltleistung von 560 kVA dar (gegen 2,31 kW Leistung des Prüfgenerators!).

1. Es wurde der Einfluss des Verhältnisses $\frac{E}{e_B}$ auf den Verlauf des Kurzschlußstromes nachgeprüft. Dies wurde in einer Reihe von Oszillogrammen durchgeführt. Die Beschriftung derselben entspricht Fig. 18. Das eine dieser Oszillogramme ist hier wiedergegeben (Fig. 19).

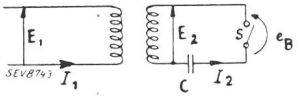

Fig. 18.

In keinem Fall wurde ein messbar früherer Nulldurchgang Δt des Kurzschlußstromes unter dem Einfluss der Lichtbogenspannung festgestellt für $\frac{E}{e_B} \cong 2$. Die maximale Lichtbogenspannung $e_{B\,max}$ änderte dabei um maximal 5 %. Die Abweichung des Scheitelwertes I_a bzw. I_b von I_2 war in keinem Fall grösser als 4 %.

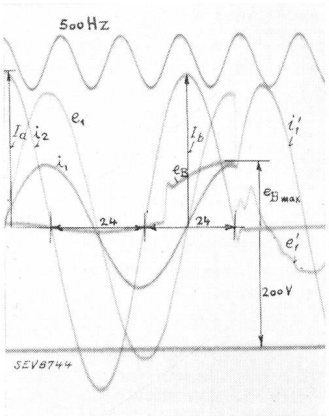

Fig. 19.

2. Um dem Einwand zu begegnen, dass bei Wiederzündung unser Stromkreis nicht in der Lage sei, sofort wieder Kurzschlußstrom herzugeben, weil er sich zuerst einschwingen müsse, sei hier noch

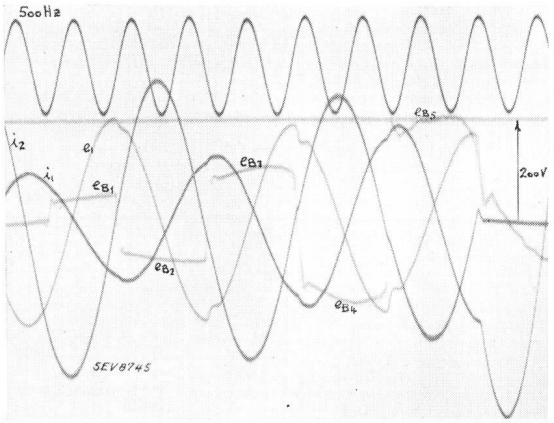

Fig. 20.

Osz. Fig. 20 angeführt, bei welchem mit der neuen Prüfschaltung 4 Wiederzündungen erzwungen wurden.

8. Schlusswort.

Wenn es uns gelungen ist, das Problem der Ersatzprüfschaltung seiner Lösung näher zu bringen, so haben wir unsern Zweck erreicht. Dieses Problem wurde vielerorts aufgegeben, weil es sich zeigte, dass, wo eine einwandfreie Prüfung gewährleistet wird, keine sehr grosse Leistungsersparnis erzielt werden kann. Wir glauben aber gezeigt zu haben, dass die neue Schaltung mit Schwingungskreis eine so grosse Ersparnis erlaubt, dass es wieder interessant wird, sich mit dem Problem der Ersatzprüfschaltung zu befassen.

[10]) Diss. Trautweiler, Abschnitt «Die ausgeführte Ersatzschaltung».