

Prom. Nr. 2045

Über den Verlauf der Verfestigung von Lichtbogenstrecken

VON DER
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE IN ZÜRICH
ZUR ERLANGUNG DER WÜRDE EINES
DOKTORS DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
GENEHMIGTE
PROMOTIONSARBEIT

VORGELEGT VON

Paul Wildi
dipl. El.-Ing. ETH.
von Reinach (Aargau)

Referent: Herr Prof. Dr. K. Berger

Korreferent: Herr Prof. Dr. B. Bauer

LEBENS LAUF

Ich wurde am 15. Februar 1921 in Genf geboren. Nach einem vierjährigen Aufenthalt in Le Hâvre siedelten meine Eltern nach Zürich über, wo ich die Primar- und Sekundarschule und anschliessend die Kantonale Oberrealschule besuchte.

Vom Jahre 1940 an studierte ich an der ETH Elektrotechnik. Wegen Aktivdienst und Werkstattpraxis musste ich das Studium zweimal unterbrechen. Im Dezember 1946 wurde mir das Diplom als Elektroingenieur erteilt.

Während des Jahres 1947 arbeitete ich im Hochspannungslaboratorium der Maschinenfabrik Oerlikon. Anschliessend kehrte ich als Assistent für Hochspannungstechnik an die ETH zurück, wo ich von Anfang 1948 bis Ende 1950 neben meiner Assistententätigkeit die vorliegende Arbeit ausführte.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
Kap. I Einleitung	3
Kap. II Apparatur und Messtechnisches	
A. Allgemeines	4
1. Aufgabestellung	
2. Uebersicht über die wichtigsten in der Literatur angegebenen Lösungen	
3. Begründung der gewählten Lösung	
B. Steuerschaltung	8
1. Prinzip	
2. Konstruktiver Aufbau des Gerätes	
a) Wandler	
b) Nullpunktanzeiger	
c) Auslösegerät	
C. Versuchseinrichtung	12
1. Anlage Gösgen	
2. Messung	
3. Eichung, Genauigkeit	
Kap. III Durchgeführte Messungen	
A. Messung an einem Lichtbogen in freier Luft	20
1. Allgemeines	
2. Messungen an der kalten Lichtbogenstrecke	
a) Ueberschlagsspannung bei Industriefrequenz	
b) Ueberschlagspannung bei Gleichspannung	
c) Stosskennlinien für Ansprechen während der Front	
3. Messungen an einem erlöschenden Lichtbogen	
a) Interpretation der Oszillogramme	
b) Verlauf der Wiederverfestigung	
c) Streuung der Messungen	
d) Diskussion der Ergebnisse	
B. Versuch einer indirekten Schalterprüfung	31
1. Allgemeines	
2. Messanordnung	
3. Messungen	
4. Diskussion der Messungen	
Literaturverzeichnis	39

Kap. I

EINLEITUNG

Der Verlauf der Verfestigung einer Lichtbogenstrecke, unmittelbar nachdem der Strom zu Null geworden ist, bestimmt im Falle des Schalterlichtbogens weitgehend die Abschaltleistung des Schalters. Weiter hängt z.B. die minimale Unterbrechungszeit in Netzen mit Schnellwiedereinschaltung von der Entjonierungszeit des Erdschlusslichtbogens ab.

Dementsprechend gibt es eine grosse Zahl von Untersuchungen über das Gebiet. Sie betreffen vor allem den Verlauf der wiederkehrenden Spannung bei Ausschaltungen; einige befassen sich auch mit dem Verlauf der wiederkehrenden Verfestigung. Diese wurde bei Schalterlichtbogen meistens durch Variation der Eigenfrequenz des Kurzschlusskreises gemessen. Marx und seine Schüler haben vor allem überlagerte Tesla- und Stossspannungen für ihre Untersuchungen verwendet. Andere Autoren (lit. 11, 26) versuchten mit überlagerten Hochfrequenzströmen den Verlauf des Widerstandes des Restgases zu messen und aus diesem auf die Festigkeit zu schliessen.

Die Resultate über Luftlichtbogen wurden meines Wissens alle durch Variieren der stromlosen Pause auf mechanischem Wege gewonnen.

Um eindeutige Versuchsbedingungen zu erhalten, schien es nötig, vom Moment, an dem der Strom zu Null wird bis zum Moment der Messung, die am Lichtbogenrest liegende Spannung auf Null zu halten und den Prüfstoss plötzlich anzulegen. Dies ist bei der Methode der Variation des Verlaufes der wiederkehrenden Spannung nicht der Fall. Es ist hier bei einer Wiederezündung oft nicht möglich zu entscheiden, ob es sich um einen rein elektrischen Durchschlag (Stossjonisation) oder um einen Wärmedurchschlag handelt. Darauf ist schon frühzeitig hingewiesen worden (lit. 17). Dass in einem Restlichtbogen ein Strom von mehreren Ampères bestehen kann, bevor es zur Wiederezündung kommt, geht aus den Messungen von Cassie und seinen Mitarbeitern (lit. 11, 26) und von Berger (noch unveröffentlichte Messungen der FKH) hervor.

Ferner schien es wünschbar, den Prüfstoss vom Stromverlauf aus zu steuern, da besonders im Falle einer Ausschaltung der Schalter auf die Stromquelle zurückwirkt. Dadurch treten bei einer spannungssynchronen Prüfanlage Ungenauigkeiten in Bezug auf den Moment des Prüfstosses auf.

Im ersten Teil dieser Arbeit wird eine elektronische Steuerschaltung beschrieben, welche erlaubt, den letzten Nulldurchgang eines Wechselstromes festzustellen und von diesem ausgehend mit einer einstellbaren Verzögerung einen Stossgenerator auszulösen, dessen Stoss auf den Lichtbogenrest gegeben wird.

Im zweiten Teil werden Messungen an einem freibrennenden Wechselstromlichtbogen von $700 A_{\text{eff}}$ beschrieben und für diesen Fall der Verlauf der

wiederkehrenden dielektrischen Festigkeit gegeben. Weiter werden einige Versuche beschrieben, die Steuerschaltung zu indirekten Schalterprüfungen zu verwenden und die bei günstigen Voraussetzungen vermutlich erreichbaren Grenzen diskutiert.

Herrn Prof. Dr. K. Berger, der den Anstoss zu dieser Arbeit gab und mir auch in vielen Schwierigkeiten mit wertvollem Rat geholfen hat, möchte ich an dieser Stelle herzlich danken, ebenso der Forschungskommission für Hochspannungsfragen (FKH), die mir erlaubte, die Messungen mit grosser Leistung in ihrer Versuchsstation in Gösigen durchzuführen. Dank schulde ich auch den Herren Ing. E. Seylaz und H. Petér-Contesse von der FKH, sowie meinem Kollegen Herrn Ing. J.J. Broccard, die mir in zahllosen kleinen Schwierigkeiten geholfen haben. Herr Dir.-Adjunkt Gantenbein von der Maschinenfabrik Oerlikon stellte mir in freundlicher Weise einen Druckluftschalter mit Kompressor zur Verfügung. Auch ihm sei dafür bestens gedankt. Schliesslich möchte ich noch dem Aluminiumfonds Neuhausen, der weitere Mittel zur Verfügung stellte, meinen Dank aussprechen.

Kap. II

APPARATUR UND MESSTECHNISCHES

A. Allgemeines

1. Aufgabestellung

Wir haben uns die Aufgabe gestellt, die wiederkehrende dielektrische Festigkeit einer Lichtbogenstrecke, nachdem der Strom zu Null geworden ist, durch einen Prüfstoss zu messen.

Dazu sind folgende Teilaufgaben zu lösen:

- a) Es muss der Moment, in dem der Strom abreisst, mit möglichst grosser Genauigkeit festgestellt werden können.
- b) Es ist ein Zeitrelais mit Verzögerungszeiten von 0 - 100 μ s, 0,1 - 5 ms und 5 - 60 ms zu entwickeln, welches im Moment des Nulldurchganges anlaufen soll.
- c) Nach Ablauf der eingestellten Verzögerungszeit soll der Stossgenerator, welcher den Prüfstoss erzeugt, ausgelöst werden.

Zuerst sollen die Lösungen ähnlicher Probleme, die sich in der Literatur finden, kurz besprochen werden.

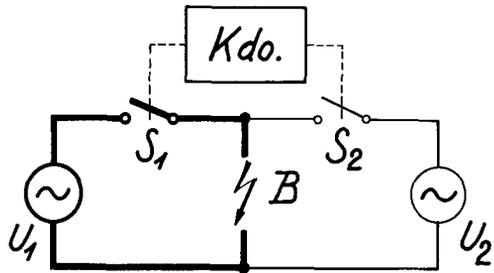
2. Uebersicht über die wichtigsten in der Literatur angegebenen Lösungen.

Im Zusammenhang mit der minimalen Unterbrechungszeit bei der Schnell-

wiedereinschaltung nach Kurzschlüssen wurden von verschiedenen Schalterfirmen Untersuchungen angestellt.

Fig. 1

Prinzip der Messung der Wiederverfestigungszeit mit mechanischer Steuerung.



Diese Messungen (z.B. lit. 20, 36) arbeiten meist so, dass der Bogen, welcher durch einen feinen Draht gezündet wird, durch Schliessen des Schalters S_1 eingeleitet wird. Ein mechanisches Kommandogerät (z.B. eine Schaltwalze) unterbricht nach einer gewissen Zeit den Bogenstrom und schaltet nach einer einstellbaren Pausenzeit über S_2 den Prüfkreis an die Bogenstrecke. Die Messungen zeigen, welche Unterbrechungszeit für die Löschung eines Lichtbogens nötig ist, geben aber keine quantitativen Angaben über den Verlauf der Verfestigung. Interessant sind auch die Messungen von G.D. McCann und J.J. Clark (lit. 9), welche ebenfalls durch mechanische Steuerung einem Stromstoss mit variabler Verzögerung einen Prüfspannungsschlag folgen lassen. Sie arbeiten mit Prüfverzögerungszeiten zwischen 0,5 und 20 ms.

Unter den Schaltungen, welche für synthetische Schalterprüfungen vorgeschlagen wurden, befinden sich einige, deren Steuerungen für unsere Zwecke geeignet erscheinen. Der Vorschlag von Trautweiler (lit. 37) geht dahin, die Spitze der wiederkehrenden Spannung zur Steuerung von Thyratrons zu benutzen. Ein Verzögerungsglied ist nicht vorgesehen. Eine ähnliche Schaltung, welche mit Funkenstrecken arbeitet, wird von Biermanns angegeben (lit. 4). Diese Schaltung wurde praktisch durch Versuche mit grossen Leistungen erprobt. Der Vorschlag von Marx und Verse (lit. 23, 38) strebt eine stromsynchrone Auslösung des Steuergerätes an. Die Schaltung wurde für die Prüfung der Marx'schen Lichtbogenstromrichter entwickelt, soll sich aber auch für die Untersuchung von Leistungsschaltern eignen (lit. 19, 23, 24). Die Steuerschaltung benützt den Spannungsabfall an einem Shunt zur Zündung einer Gastriode kurz vor dem Nulldurchgang des Stromes. Eine zusätzliche variable Verzögerung wird durch Widerstands-Kapazitätsglieder im Gitterkreis eines weiteren Thyratrons erreicht, welches den Prüfstosskreis über eine Hilfsfunkenstrecke zündet. In ähnlicher Weise arbeiten auch Pugno-Vanoni und Someda (lit. 28, 29), verwenden aber statt des Shunts einen Stromwandler. Eine weitere, ähnliche Schaltung wird in einer Studie von Mortlock und Wilkinson (lit. 25) angegeben. Für die Erfassung des Nullmomentes erwähnen sie die Möglichkeit, einen Impulstransformator (Peaking Transformator) anzuwenden, was auch von Blaha (lit. 5) vorgeschlagen wird.

Die in diesem Abschnitt skizzierten Versuche wurden mit Ausnahme der Schaltung nach Biermanns und der Stromrichterversuche von Marx in sehr stark reduziertem Masstabe ausgeführt.

3. Begründung der gewählten Lösung

Es war von Anfang an vorgesehen, die Prüfschaltung so zu entwickeln, dass sie sich leicht an grosse Leistungen anpassen liess. Als Messorgan für den Strom war ursprünglich ein Shunt in Aussicht genommen, ähnlich wie er in der Schaltung von Marx-Verse (lit. 23, 38) verwendet wird. Arbeitet man mit grossen Strömen, so hat dies den Nachteil, dass die Leistung, welche im Shunt zu vernichten ist, sehr gross wird. Verse arbeitete mit einem Spannungsabfall am Shunt von 200 Volt (Scheitelwert).

Leistung eines Shunts mit
200 V_{sw} Spannungsabfall

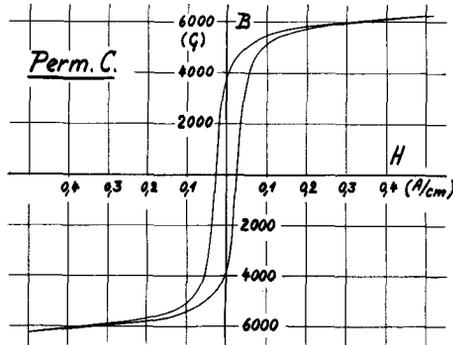
I_1	N_{Shunt}
1000 A _{eff}	141 kW
5000 "	710 "
10000 "	1410 "
20000 "	2820 "

Die Leistungen, die in diesem Fall im Shunt umgesetzt werden, sind in obenstehender Tabelle aufgezeichnet. Der Shunt müsste zudem so ausgebildet werden, dass der Messkreis mit dem Stromkreis rein ohmisch gekoppelt wäre; er müsste also als koaxialer Rohrshunt gebaut werden. Auch wenn man mit einer Einschaltdauer von höchstens 1 s rechnet, dürfte die Verwirklichung eines derartigen Shunts nicht leicht sein. Die Anwendung eines Zwischenstromwandlers verbietet sich, weil durch ihn eine allfällige Asymmetrie des Stromes verfälscht wiedergegeben würde. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens liegt in dessen verhältnismässig geringer Genauigkeit. Die Zündkennlinie eines Thyratrons stellt in Wirklichkeit einen Bereich dar. Nehmen wir seine Breite zu 0,5 V an, was bei der gewählten Röhrenart etwa zutreffen mag, so ergibt sich eine Unsicherheit in der Erfassung des Nulldurchganges von ca. 10 μ s, wenn man berücksichtigt, dass die Shuntspannung mit einer Steilheit von 0,06 V/ μ s durch den Zündeinsatzpunkt läuft. In der Arbeit von Verse sind denn auch (Abb. 34) für ein und dieselbe Gittergegenspannung am Steuerthyatron Streuungen in der Prüfverzögerungszeit von 50 μ s angegeben. Diese Ueberlegungen haben uns bewogen, eine andere Methode zum Feststellen des genauen Nulldurchganges zu suchen.

Ferromagnetische Materialien zeigen in ihrem Verhalten die bekannte Hysteresisschleife. Ändert man die magnetische Feldstärke H nach einer Sinusfunktion, so springt nach jedem Nulldurchgang die magnetische Induktion von einem Sättigungswert zum anderen über (Fig. 3). Diese Eigenschaft wurde benützt, um die Nulldurchgänge festzustellen. Wird ein Serietransformator mit Wechselstrom derart betrieben, dass sein Kern für den Scheitelwert des Primärstromes hoch übersättigt ist, so wird in der offenen Sekundärwicklung bei jedem Umspringen

der Induktion entsprechend $u_2 = - \frac{d\theta}{dt}$ ein Spannungsimpuls induziert. Es handelt sich also darum, ein Material zu finden, das eine sehr enge und steile Hysteresis Kurve zeigt. Ein solches ist z.B. Permalloy C.

Fig. 2
Hysteresis Kurve von
Permalloy C.



Dieses ist bei einer Feldstärke von 0,1 A/cm angenähert gesättigt und hat eine Sättigungsinduktion von ca. 6000 Gauss. Nach einigen orientierenden Vorversuchen wurden Ringkerne von 40 mm äusserem Durchmesser und 0,85 cm² Querschnitt aus Permalloy C Band von 0,05 mm Dicke für die weiteren Versuche gewählt. Die Hysteresis Kurve dieses Materials geht aus Fig. 2 hervor.

Fig. 3 zeigt wie im Prinzip aus Durchflutung und Hysteresisschleife die in der Sekundärwicklung induzierten Impulse ermittelt werden können. Aus der gegebenen Hysteresis Kurve Fig. 2 errechnet sich die Breite der Impulse für einen Strom von 1000 A_{eff} und einer Primärwindung zu ca. 7 μs. Der exakte Moment des Stromnulldurchganges fällt in die Zeit des Frontanstieges des Impulses.

Um das Abreissen des Stromes von einem gewöhnlichen Nulldurchgang zu unterscheiden, wird ein Wandler mit zwei entgegengesetzt magnetisierten Permalloy-Kernen angewendet (siehe Fig. 5). Die Grösse der Vormagnetisierung ist gerade so eingestellt, dass der eine der Kerne unmittelbar vor dem Nulldurchgang einen Impuls erzeugt, während der andere nur dann einen Impuls gibt, wenn der Strom nach dem Nulldurchgang in entgegengesetzter Polarität weiterfliesst.

Fig. 4 zeigt Kathodenstrahlzillogramme der Spannungen an den Ausgängen des Permalloywandlers während der Unterbrechung eines Stromes. Während in Fig. 4a ohne Vormagnetisierung in beiden Kernen auch im Moment des Abreissens ein, wenn auch kleiner, Impuls induziert wird, wird im Falle Fig. 4b beim letzten Nullwerden des Stromes nur noch in einem der Kerne ein Impuls erzeugt. Diese Eigenschaft wird benützt, um den Moment, in dem der Strom abreisst, von den vorhergehenden Nulldurchgängen zu unterscheiden, indem durch eine elektronische Schaltung der Nulldurchgang ausgesucht wird, an dem nur einer der beiden Wandlerkerne einen Impuls erzeugt.

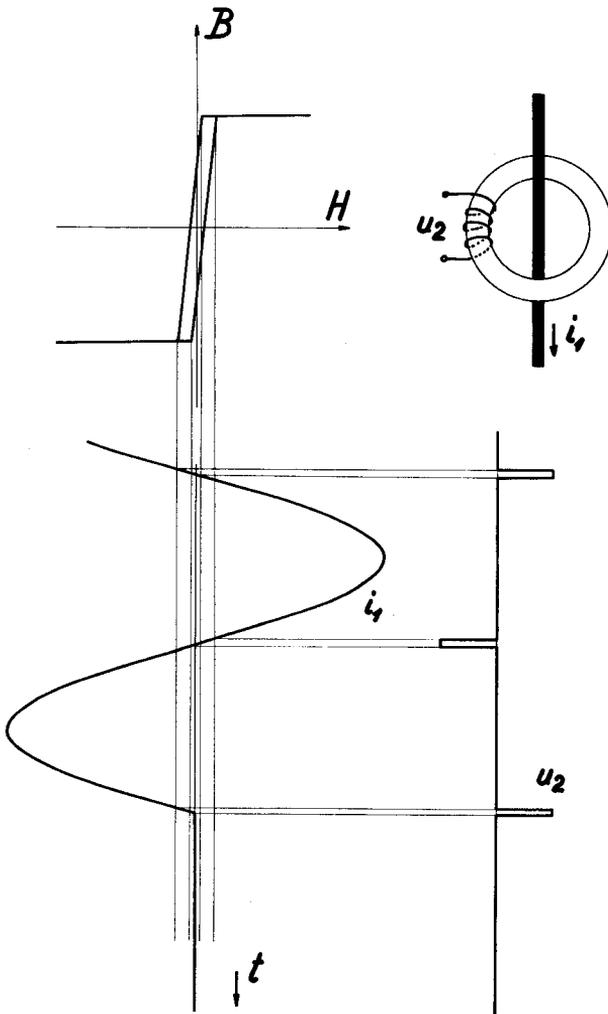


Fig. 3
Uebersättigter
Permalloykern

B. Steuerschaltung

1. Prinzip (Fig.5)

Die Steuerschaltung zerfällt in einen Nullpunktanzeiger mit Verzögerungskreis, ein Auslösegerät und einen Hilfsstossgenerator.

Die Ausgänge der Permalloywandler führen über koaxiale Kabel zu einer Vorstufe. Eine Schwelle von 40 Volt verhindert, dass kleine, in den Zuleitungen

induzierte Spannungen, das Gerät vorzeitig auslösen können. Weiter werden in der Vorstufe die Impulse in ihrer Breite verkleinert, indem aus der Front des Eingangsimpulses ein neuer Impuls von $1 \mu\text{s}$ Breite gewonnen wird. Gleichzeitig werden die Eingangsimpulse, die je nach Stromrichtung positive oder negative Polarität zeigen, auf eine einheitliche Polarität gebracht. Dies ist notwendig, da im folgenden Teil der Schaltung die Impulse nicht nach Polarität, sondern nur nach ihrer gegenseitigen Lage unterschieden werden.

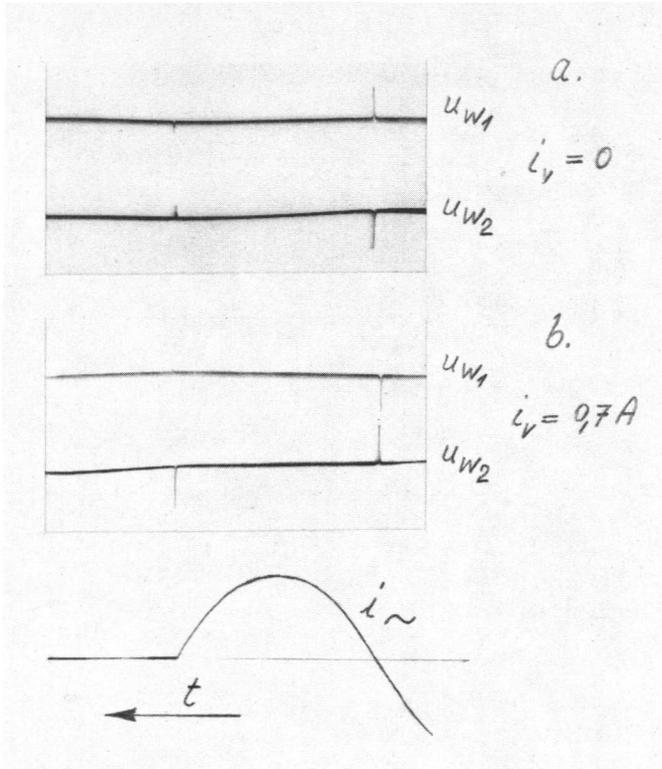


Fig. 4 Ausgangsspannungen am Permalloywandler

- a) ohne Vormagnetisierung
- b) mit 0,7 A Vormagnetisierung

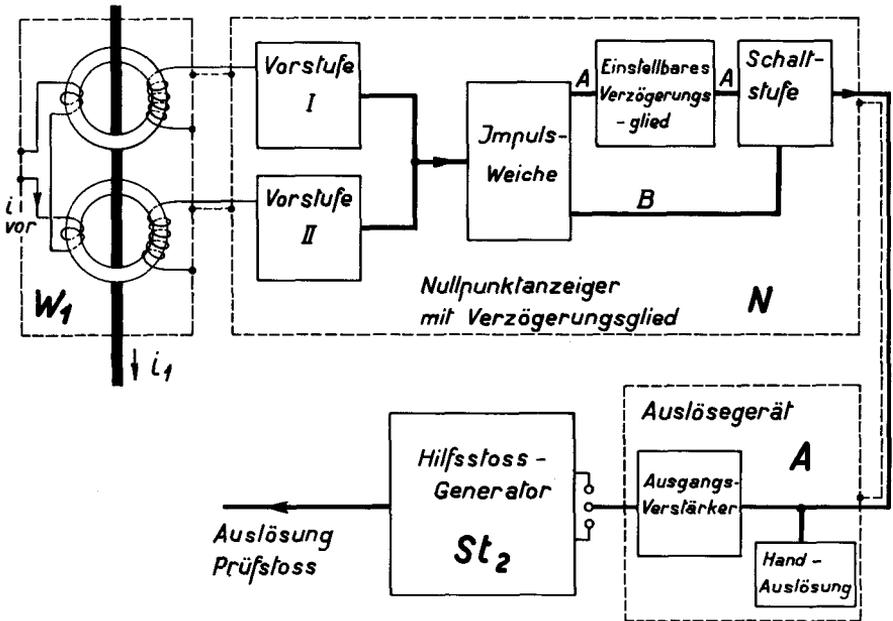


Fig. 5 Blockscha der Steuerschaltung

Nach den Vorstufen, in denen die Ausgänge der beiden Wandler getrennt sind, werden die zwei Kanäle in einen gemeinsamen Kanal zusammen genommen und einer Weiche zugeführt. Diese arbeitet so, dass sie von zwei Impulsen, die in weniger als $1000 \mu s$ aufeinander folgen, den ersten in einen Kanal A und den zweiten in einen Kanal B leitet.

Der erste Impuls, welcher über den Kanal A läuft, löst ein Zeitverzögerungsglied aus. Dieses ist als Multivibrator mit einer stabilen Lage ausgeführt, wie dies im Schema Fig. 6 skizziert ist.

Die Schaltung ist so eingestellt, dass in der Ruhelage die Triode 1 Strom führt und die Triode 2 gesperrt ist. Wird diese Verteilung durch einen negativen Impuls auf das Gitter der Triode 1 gestört, so kippt die Anordnung in einen Zustand um, in dem T_1 gesperrt ist und T_2 den Strom führt. Dieser Zustand ist nicht stabil und nach einer Zeit, welche durch die Grössen C und R gegeben ist, kehrt die Anordnung wieder in die Ruhelage zurück. Durch geeignete Wahl der Werte R und C können Verzögerungen von $5 \mu s$ bis 60 ms eingestellt werden. Das Rückkippen der Schaltung erzeugt einen zweiten, verzögerten Impuls, der zur Auslösung des Stossgenerators verwendet wird.

Wenn nun der Prüfstrom im betreffenden Nulldurchgang nicht abreisst, so erzeugt der zweite Kern des Permalloywandlers einen weiteren Impuls unmittelbar

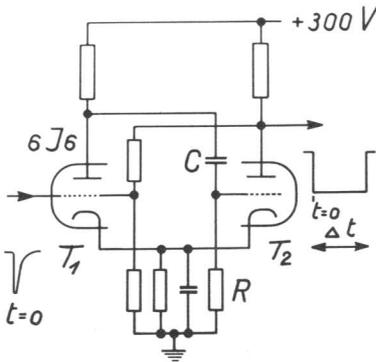
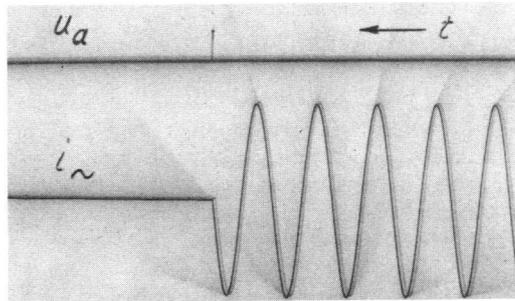


Fig. 6
Verzögerungsglied

nach dem Nulldurchgang, welcher von der Impulsweiche in den Kanal B geleitet wird. Dieser gelangt in die Schaltstufe am Ausgang des Verzögerungsgliedes und unterdrückt den Durchgang des Auslöseimpulses. Obwohl also das Verzögerungsglied bei jedem Nulldurchgang anläuft, kann der Auslöseimpuls nur im letzten Nulldurchgang, in dem der Strom abreisst, zum Auslösegerät gelangen. Das Oszillogramm in Fig. 7 zeigt die Ausgangsspannung u_a des Nullpunktanzeigers bei einer Ausschaltung des Prüfstromes i_w . Man erkennt den Auslöseimpuls, unmittelbar nachdem der Strom im Prüfkreis abreisst.

Fig. 7

u_a Ausgangsspannung
des Nullpunktanzei-
gers bei einer Löschung



Der Auslöseimpuls hat eine Amplitude von nur ca. 150 V. Zum Anstoss des Stossgenerators ist, wie später dargelegt werden soll, ein Hilfsstoss in der Größenordnung von 20 - 30 kV notwendig. Um den Stossgenerator zu zünden, ist daher eine Verstärkung des Auslöseimpulses nötig, welche dadurch erreicht

wird, dass durch ein Auslösegerät die erste Funkenstrecke eines 10-stufigen Hilfsstossgenerators in Marx-Schaltung gezündet wird. Der Hilfsstossgenerator hat eine Stufenspannung von 3 kV, sodass zur Auslösung des Prüfstosskreises ein Impuls von ca. 30 kV zur Verfügung steht.

Seiner Natur nach müsste das Gerät auch beim Einschalten des Stromes ansprechen. Um dies zu verhindern, wird zwischen Nullpunktanzeiger und Auslösegerät ein Hilfsschütz eingefügt, welches durch einen Hilfskontakt am Hauptschalter (siehe Fig. 15) über ein Zeitrelais gesteuert wird und die Verbindung erst schliesst, wenn der Einschaltvorgang beendet ist.

2. Konstruktiver Aufbau des Gerätes

- a) Wandler. Die Kerne bestehen aus Permalloy C Band von 0,05 mm Dicke. Ihr äusserer Durchmesser ist 40 mm, der Querschnitt $0,85 \text{ cm}^2$. Die Vormagnetisierungswicklung zählt 4 Windungen, die Arbeitswicklung 40 Windungen. Der Wandler ist elektrostatisch vollständig abgeschirmt, ebenso die Zuleitungen des Vormagnetisierungsstromes und die Abgänge zum Nullpunktanzeiger. Eine Drossel im Vormagnetisierungskreis verhindert, dass dieser den Wandler wechselstrommässig kurzschliesst.
- b) Der Nullpunktanzeiger ist mit dem zugehörigen Gleichrichter in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht. Es zeigte sich im Verlaufe der Messungen, dass es nötig ist, die Geräte über einen Isoliertransformator zu speisen, um Fehlauflösungen mit Sicherheit zu vermeiden. Ebenso ist es notwendig, sämtliche Erdungen sternförmig zu einem einzigen Punkte zu führen und nur diesen an Erde zu legen, da sonst die Spannungsabfälle der Erdströme zu Fehlauflösungen führen. Die gesamte Schaltung ist mit Ausnahme des Netzgleichrichters und der Endröhre im Auslösegerät aus amerikanischen Miniaturröhren der 6-Volt Serie aufgebaut. Die Anodenspannung beträgt 300 Volt und ist durch Glimmstabilisatoren stabilisiert.
- c) Das Auslösegerät ist vom Nullpunktanzeiger getrennt. Dies erlaubt einen bequemeren Aufbau der Prüfschaltung. Als Verbindungsleitung wird wiederum ein koaxiales Kabel verwendet. Für die Zündung der ersten Funkenstrecke im Hilfsstossgenerator, welche mit 3 kV vorgespannt ist, wird eine Spannung von ca. 2 kV benötigt. Diese wird erzeugt, indem der Strom einer Spule im Anodenkreis einer kleinen Senderöhre unterbrochen wird, wodurch das freie Ende der Spule auf ca. 3 kV aufschwingt.

C. Versuchseinrichtung

1. Anlage Gösgen

Dank dem Entgegenkommen der FKH konnten die Messungen mit Leistungslichtbogen in der Versuchsstation Gösgen durchgeführt werden. Diese ist ein zu Versuchszwecken umgebautes altes Unterwerk. Es ist an das 50 kV Netz der ATEL angeschlossen. Die räumliche Anordnung der Anlage geht aus Skizze 11 hervor; Fig. 8 zeigt das Prinzipschema.

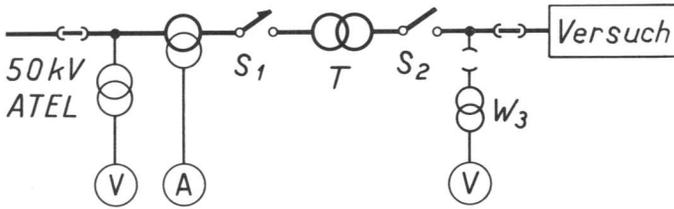


Fig. 8
Prinzipschema

Auf einen Eingangstrenner folgt eine Messgruppe, bestehend aus Strom- und Spannungswandler. Der Schutzschalter S_1 ist ein S&S Oelkesselschalter mit Vorkontaktwiderständen. Darauf folgen die Transformatoren, die wahlweise so geschaltet werden können, dass sich Spannungen von 500 V bis 65 kV erzeugen lassen. Dem Netz können während höchstens 1 sec bis 20 MVA entnommen werden. Zwischen den Transformatoren und dem Versuchsplatz ist ein Schalter S_2 gleicher Bauart wie S_1 eingefügt, dessen drei Pole in Serie geschaltet sind. Dieser ist der eigentliche Versuchsschalter, mit welchem die Kurzschlüsse zu- und ausgeschaltet werden.

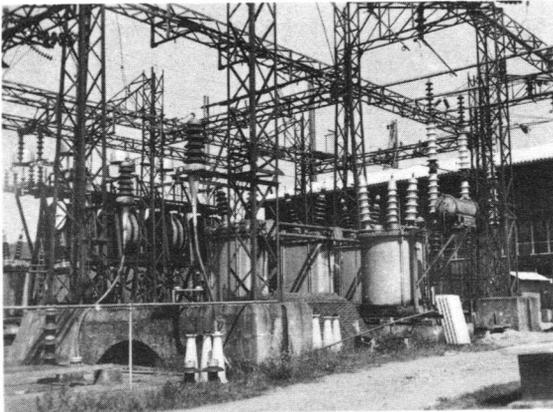


Fig. 9
Schutzschalter S_1
und Messgruppe

Für Stossprüfungen steht ein Marxgenerator mit 4 Stufen zu $\frac{1}{4} \mu\text{F}$ und 250 kV maximaler Ladespannung pro Stufe zur Verfügung (Fig. 11). Als Stosskondensatoren wurden Hochspannungskabel mit zugehörigen Endverschlüssen verwendet. Ein Kabelstossgenerator gleicher Bauart wurde von Berger und Schneeberger (lit. 3) beschrieben.

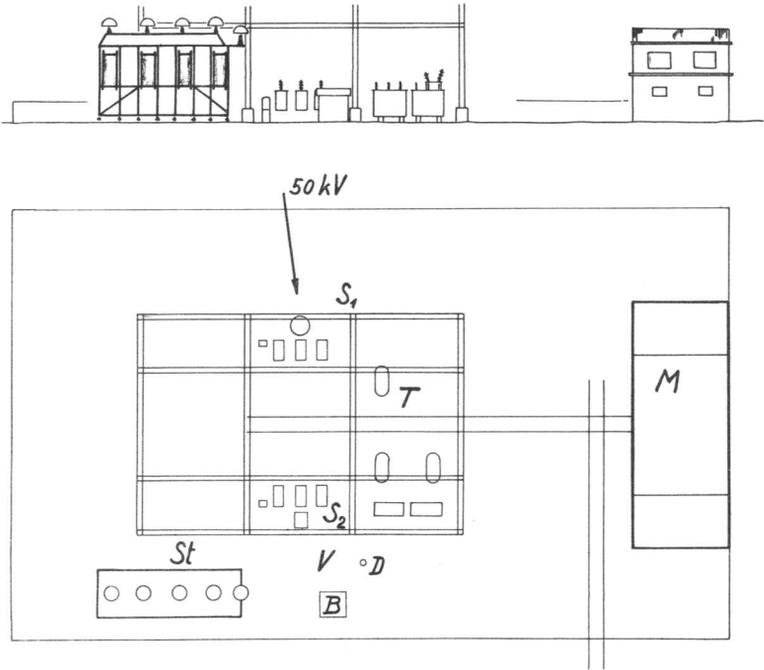


Fig. 10 - Versuchsanlage Gösigen

- | | | | |
|----------------|-----------------------------|----------------|------------------|
| B | Baracke mit Steuerschaltung | S ₂ | Versuchsschalter |
| D | Kapazitiver Spannungsteiler | St | Stossgenerator |
| M | Messraum (Oszillographen) | T | Transformatoren |
| S ₁ | Schutzschalter | V | Versuchsplatz |

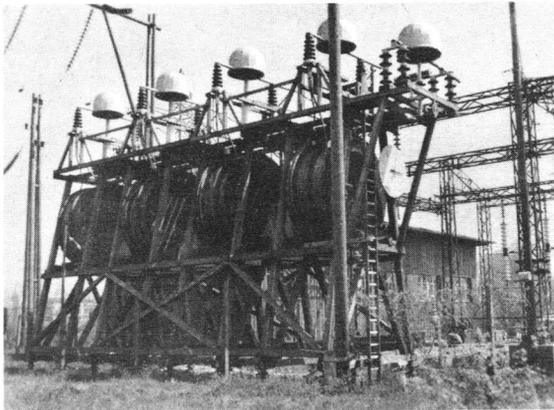


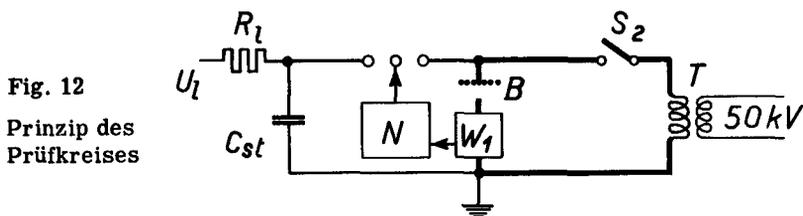
Fig. 11
Stossgenerator

Die beiden Schalter werden von einem Schaltschrank aus bedient, der sich im Oszillographenraum befindet. Vom gleichen Ort aus kann auch der Stossgenerator gesteuert werden.

Die Messung erfolgt mit zwei Kalkathodenstrahl-Oszillographen, Bauart TTC, mit je 2 Strahlen, sodass gleichzeitig bis 4 Vorgänge registriert werden können.

Grundsätzliche Anordnung des Prüfkreises

Das Schema des Prüfkreises geht im wesentlichen aus Fig. 12 hervor.



Der Bogen, dessen Erlöschen untersucht werden sollte, wurde aus dem 50 kV Netz über Transformatoren gespeist. Der Moment der Löschung wurde über den Wandler W_1 durch das Steuergerät N erfasst, welches den Stossgenerator nach Ablauf der eingestellten Verzögerung durch Zünden einer Dreifachfunkenstrecke auslöste.

Im einzelnen war der Verlauf der Messung natürlich komplizierter. Der ganze Vorgang spielte sich in ca. 1 sec ab, da die Kurzschlussdauer aus Rücksicht auf den Kraftwerkbetrieb auf 0,5 - 0,8 sec beschränkt werden musste. Es war daher notwendig, den Ablauf sämtlicher Schaltbefehle zu automatisieren. Statt der dazu üblicherweise benutzten Schaltwalze wurde eine Kombination von Zeitrelais und Hilfsschützen verwendet. Sie erlaubte, die Kurzschlussdauer genau reproduzierbar festzusetzen.

2. Messung

Bei den Messungen wurden

die Spannung über der Bogenstrecke (u_b),

der Strom im Speisekreis (i_w) und

der Strom im Stosskreis (i_{st})

oszillographisch registriert. Die Spannung wurde durch einen kapazitiven Spannungsteiler auf die Grössenordnung 500 V reduziert. Der Ausgang des Teilers war durch einen induktionsfreien Widerstand (R_4) von 70 Ohm an ein Polythenkabel (K_2) von entsprechendem Wellenwiderstand angepasst.

Die Messung des Stosstromes erfolgte über einen koaxialen Rohrshunt (Sh). Dieser war so konstruiert, dass der Messkreis mit dem magnetischen Feld des Stosskreises nicht gekoppelt war. Das Messkabel (K_1) wurde unmittelbar vor den Platten des Oszillographen durch einen induktionsfreien Widerstand

(R_6) reflexionsfrei abgeschlossen.

Stosstrom und -spannung wurden gleichzeitig im Kathodenstrahloszillographen 2 registriert. Die Zeitablenkung war logarithmisch mit Zeitkonstanten von 50 resp. $25 \cdot 10^{-6}$ sec. Die Zeitablenkschaltung wurde durch eine Antenne ausgelöst, welche über dem Stossgenerator ausgespannt war und durch ihre Streukapazität (C_4) am Generator angekoppelt war. Die Laufzeit der Mess-Signale in den Kabeln K_1 und K_2 betrug ca. $0,4 \mu s$. Dies erlaubte auch den Fusspunkt der Spannungswellen noch aufzuzeichnen, da die Laufzeit des Auslöseimpulses auf der Antenne (Freileitung) und die Eigenzeit der Zeitablenkschaltung zusammen ca. $0,2 \mu s$ betragen.

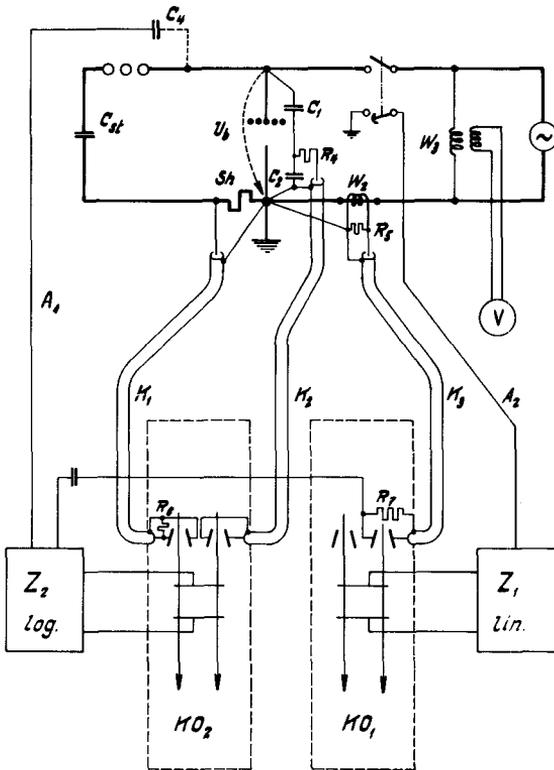


Fig. 13
Prinzip der Messung

Der Kathodenstrahl-Oszillograph 1 registrierte den Strom im Speisekreis des Lichtbogens mit linearer (langsamer) Zeitablenkung (Osz. Fig. 20). Er wurde durch einen Hilfskontakt am Schalter S_2 ausgelöst. Der Strom wurde über einen speziellen Stromwandler für hochohmige Bürde (W_2) transformiert.

Der Spannungsabfall seines Sekundärstromes am Widerstand R_5 wurde über das Messkabel K_3 oszillographiert. Ein Impuls im gleichen Oszillogramm, der durch das Zeitablenkgerät des KO_2 erzeugt wurde, zeigte den Zeitpunkt der Auslösung des KO_2 an. Die Oszillogramme des KO_1 zeigen also den Gesamtvorgang mit geringer Schreibgeschwindigkeit, während diejenigen von KO_2 daraus den Moment des Stosses mit grosser zeitlicher Auflösung darstellen.

Bei den Versuchen zur indirekten Schalterprüfung wurde statt des Markierimpulses mit dem zweiten Strahl des KO_1 ebenfalls die Spannung u_b registriert.

3. Eichung, Genauigkeit

Alle Oszillogramme wurden photographisch registriert, ebenso wurde auf jedem Oszillogrammstreifen eine Eichung der Empfindlichkeit mit Gleichspannung und eine Eichung der Zeitaxe mit einem quarzgesteuerten Oszillator aufgenommen.

Rechnet man, dass bei gut fokussiertem Strahl die Amplitude auf ca. 0,3 mm genau ausgewertet werden kann, und dass die Strahlspannung auf ca. 1% genau stabil gehalten wird, so ist bei einer Amplitude von 20 mm eine Genauigkeit von

$$\frac{1}{100} + \frac{0,3}{20} = 2,5 \%$$

zu erwarten. Darin sind Fehler von Shunt, Messteiler, Kabel nicht enthalten. Die Shunts wurden durch die Prüfanstalt des SEV in Zürich auf 1‰ genau geeicht.

Der Frequenzgang der Kabel wurde durch die FKH kontrolliert (lit. 31), indem mit dem Zweistrahloszillographen abgeschnittene Stösse gleichzeitig am Eingang und am Ausgang des Kabels registriert wurden. Das Verhältnis δ der Spannungen u_A am Anfang und u_E am Ende des Kabels betrug:

a) für den Scheitelwert einer Welle $\frac{1}{50} \mu s$

$$\delta = \frac{u_E}{u_A} = 0,992$$

b) für eine in der Front abgeschnittene Welle bei einer Frontsteilheit von

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} &= 1,9 \text{ kV}/\mu s &= 0,97 \\ 11,7 & \text{ " } &= 0,95 \end{aligned}$$

Bei unseren Messungen waren die Frontsteilheiten auf der Unterspannungsseite des Teilers (z.B. Osz. Fig. 21) von der Grössenordnung 0,7 - 1,2 kV/ μs , sodass wegen der Dämpfung des Kabels Korrekturen von max. ca. 2% nötig waren.

Eine weitere Fehlerquelle bei der Spannungsmessung lag in der Induktivität der Zuleitungen zum Messteiler. Aus praktischen Gründen konnte der Teiler nicht näher als ca. 2 m an das Messobjekt herangebracht werden. Der Teilerkreis, der in Fig. 14a dargestellt ist, entspricht elektrisch dem Ersatzschema nach Fig. 14b, also einem Serieschwingkreis. Dieser genügt folgender Differential-

gleichung:

$$I. \quad u_0 = L \frac{di}{dt} + iR + \frac{1}{C_1} \int idt.$$

also einer linearen Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten. Die Lösung der homogenen Gleichung ergibt die freie Schwingung des Systems, also den Ausgleichsvorgang:

$$II. \quad i_a = I_0 e^{-\left(\frac{R}{2L}\right)t} \cos \left[t \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} - \gamma \right]$$

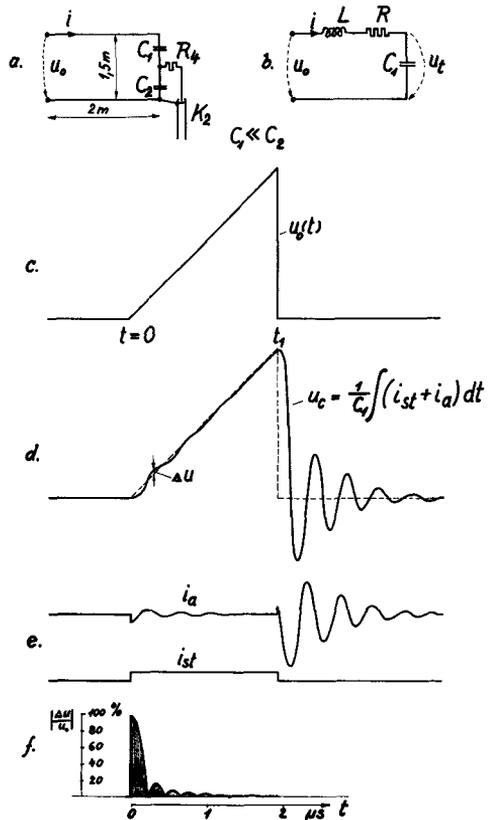


Fig. 14

Kapazitiver Messteiler

- a) Anordnung
- b) Ersatzschema
- c) Angenommene Wellenform für u_0
- d) Spannungsverlauf an der Teilerkapazität
- e) Verlauf der Ströme im Messkreis
- f) Max. prozentualer Fehler der Messung im Frontverlauf

Der totale Strom i setzt sich aus dem Ausgleichstrom i_a und dem stationären Strom i_{st} zusammen, also:

III.
$$i = i_a + i_{st}$$

i_{st} kann als partikuläres Integral der Differentialgleichung gefunden werden. Die Integrationskonstanten I_0 und γ in Gl. II werden aus den Anfangsbedingungen für $t = 0$ unter Berücksichtigung folgender Ueberlegungen gewonnen:

- IV. a. Der Strom in der Induktivität L ist stetig, da wegen $u_L = L \frac{di}{dt}$ eine Unstetigkeit des Stromes ein unendlich grosses u_L voraussetzen würde.
b. Da i stetig ist und $u_C = \frac{1}{C_1} \int idt$ muss u_C differentierbar sein, d.h. der Verlauf von u_C kann keinerlei Ecken aufweisen.

In den Fig. 14c-f wird dargestellt, wie eine in der Front abgeschnittene Stoss-welle durch einen derartigen Teiler abgebildet wird. Der Einfachheit der Dar-stellung halber sei der Verlauf $u_0(t)$ der Welle als Dreieck nach Fig. 14c an-genommen.

Für $\frac{du_0}{dt} = \text{konstant}$ ergibt sich als partikuläres Integral:

V.
$$i_{st} = \text{konstant}$$

was durch Einsetzen in die Ableitung der Gl.I leicht zu ersehen ist. Aus den Anfangsbedingungen

$$i|_{t=0} = 0 = i_a + i_{st}$$

ergibt sich, dass $I_0 = -i_{st}$ und unter Berücksichtigung von IV weiter, dass $\gamma = 0$ wird.

Für den Spannungszusammenbruch zur Zeit t_1 können ähnliche Ueberlegungen gemacht werden. Für $t > t_1$ ist $u_0 = 0$, das System führt also nur seine Eigen-schwingung aus. Die Anfangsbedingung des Stromes erhält man aus IVa, während IVb besagt, dass u_C im Punkt t_1 keine Ecke hat.

Die Eigenfrequenz f_0 des Messkreises wurde bestimmt, indem an der Stelle u_0 ein Ueberschlag an einer Kugelfunkenstrecke erzeugt und gleichzeitig die Span-nung u_C oszillographiert wurde.

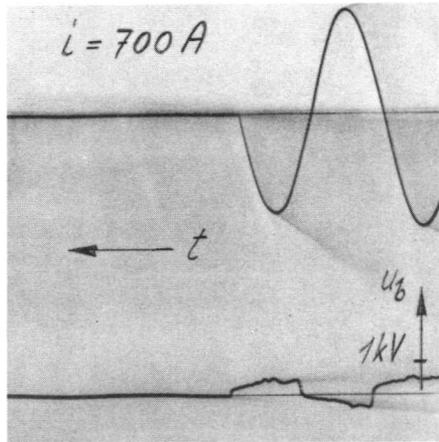
Aus $f_0 = 2,3 \text{ MHz}$ und $C_1 = 1000 \text{ pF}$ ergibt sich $L = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ H}$. Das gleiche Oszillogramm erlaubt, aus der Dämpfung der freien Schwingung nach dem Span-nungszusammenbruch den Widerstand R zu 4Ω zu bestimmen.

Für die Genauigkeit der Messungen ergeben sich folgende Folgerungen:

- a) Der maximale prozentuale Fehler $\frac{\Delta u}{u}$ der Spannungsmessung für Messungen in der Front ist in Fig. 14 f für eine Frontsteilheit von $150 \text{ kV}/\mu\text{s}$ aufgetra-gen. Er nimmt mit der Frontdauer sehr rasch ab. Die angegebenen Fehler sind Maximalwerte, die wirklichen Abweichungen sind kleiner, da der Fuss-punkt der Welle im Gegensatz zum angenommenen Knick einen allmählichen Uebergang darstellt. Es lässt sich denn auch in keinem Oszillogramm eine Schwingung im Frontverlauf feststellen.
b) Die Schwingung (z.B. Osz. Fig. 21c) nach dem Spannungszusammenbruch

Der Bogen wurde zwischen einem aufrecht stehenden Kupferstab $7 \text{ } \emptyset$ und einem Gitter aus Streckmetall mit $4 \times 11 \text{ cm}$ Maschenweite erzeugt. Die aufsteigenden Schlingen des Bogens kamen dadurch immer wieder mit dem Gitter in Berührung, sodass der Bogen seine ursprüngliche Länge im grossen ganzen beibehielt, was aus Gründen der Reproduzierbarkeit notwendig war. Fig. 16 zeigt das Schema und Fig. 18 eine Ansicht der Anordnung. Aus dem 50 kV Netz der ATEL wurde der Bogen über einen Schutzschalter S_1 , drei Transformatoren und einen weiteren Schalter S_2 gespeist. Die Transformatoren setzten die Speisespannung auf $7,7 \text{ kV}$ herunter. Der Kurzschlussstrom betrug 700 A entsprechend einer Impedanz von 11Ω , bezogen auf die Sekundärseite. Der Bogen wurde durch einen feinen Eisendraht eingeleitet und brannte während $0,7 \text{ sec}$. Seine Brennspannung (Osz. Fig. 16) betrug $500 - 250 \text{ V}$, entsprechend einem Gradienten von $20 - 10 \text{ V/cm}$ und zeigte keine ausgeprägten Lösch- und Zündspitzen.

Fig. 16
Strom- und Spannungsverlauf
am Bogen



Im Lichtbogenkreis befanden sich ferner der Messwandler W_3 für den Speisestrom und unmittelbar unter der Lichtbogenelektrode der Spezial-Wandler W_1 für die Steuerschaltung.

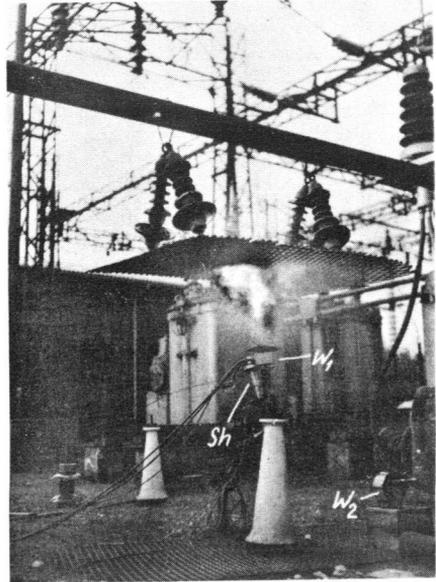
Die Bewegung der Schalter war so gesteuert, dass S_1 nur als Sicherheitsschalter zu funktionieren hatte; der Kurzschluss wurde durch den Schalter S_2 eingeleitet und wieder unterbrochen. Am gleichen Schalter befanden sich zwei Hilfskontakte, von denen einer den KO_1 (Zeitmessung) auslöste und der andere das Zeitrelais Z_3 in der Steuerschaltung steuerte.

Der Stossgenerator war bei den meisten Messungen zweistufig geschaltet. Er wurde über eine Dreifachfunkenstrecke gezündet, indem der eine Pol der untersten Stufe von der Ladespannung auf Erdpotential hinuntergerissen wurde. Die richtige Regulierung der Dreifachfunkenstrecke bot einige Schwierigkeiten,

insbesondere war es nötig, die Ladespannung U_L mit guter Konstanz 5 - 8 % unter der Ansprechspannung der Funkenstrecke zu halten. Dies war namentlich an nebligen Tagen, wenn die befeuchteten Oberflächen der Isolatoren des Generators die Isolation beeinträchtigten, oft unmöglich. Bei richtiger Regulierung der Funkenstrecke genügte ein Stoss mit einer Halbwertdauer von ca. $5 \mu s$, dessen Scheitelwert ca. $\frac{1}{5} U_L$ betrug, um den Generator mit Sicherheit zu zünden.

Fig. 17

Ansicht der Lichtbogenstrecke
 W_1 Permalloywandler
Sh Shunt
 W_2 Stromwandler für Bogenstrommessung



Die Höhe der Stossspannung war derart eingestellt, dass der Stoss mit Sicherheit noch in der Front zum Durchschlag führte. Die Frontsteilheit der Stosswelle betrug bei allen Versuchen 130 - 170 kV/ μs . Sie war bestimmt durch die Belastungskapazität (Teiler und Summe der Streukapazitäten) einerseits, den Dämpfungswiderstand R und die Induktivität des Stosskreises andererseits. Diese wurde aus der Eigenfrequenz des Stosskreises zu $70 \cdot 10^{-6}$ H errechnet.

2. Messungen an der kalten Lichtbogenstrecke

a) Ueberschlagspannung bei Industriefrequenz

Die Ueberschlagspannungen zwischen dem Streckmetallgitter und einer Stabelektrode wurden in der gleichen Anordnung gemessen, in der die Lichtbogenversuche gemacht wurden, um die Unterschiede der Ueberschlagspannungen gegenüber der klassischen Spitze-Platte Anordnung zu ermitteln. Die Resultate sind in Fig. 18 dargestellt. Es fällt insbesondere der starke Einfluss der Form der Stabspitze auf. Für den Fall eines Rundstabes mit kegelförmiger

Spitze von 60° Spitzenwinkel folgen die Messwerte ungefähr den publizierten Daten für Spitze-Platte Funkenstrecken (siehe z.B. lit. 22, 30), dagegen liegen sie bei einem kugelförmig abgerundeten, polierten Stabende bedeutend höher.

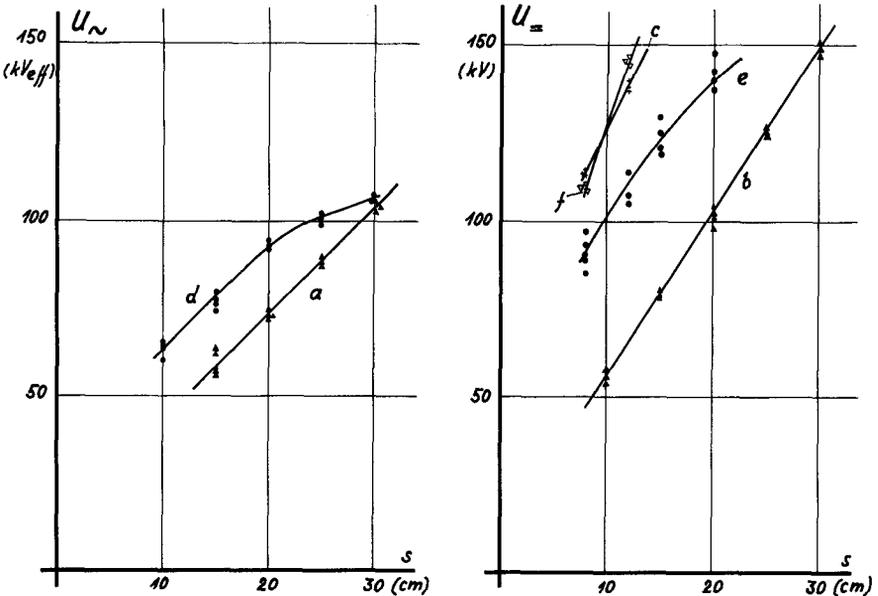


Fig. 18 Ueberschlagspannung zwischen Streckmetallgitter von 11 x 4 cm Maschenweite und diversen Stabelektroden. 7 mm ϕ . Anordnung 2 m über Boden. Gitter horizontal; Stab unten.

- | | |
|---------------------------------|----------------------------------|
| a. Spitze mit 60° Spitzenwinkel | 50~ |
| d. Stabende halbkugelförmig | Stab geerdet |
| b. Spitze mit 60° Spitzenwinkel | Stab positiv |
| e. Stabende halbkugelförmig | Symmetrische Spannungsverteilung |
| c. Spitze mit 60° Spitzenwinkel | Stab negativ |
| f. Stabende halbkugelförmig | Symmetrische Spannungsverteilung |

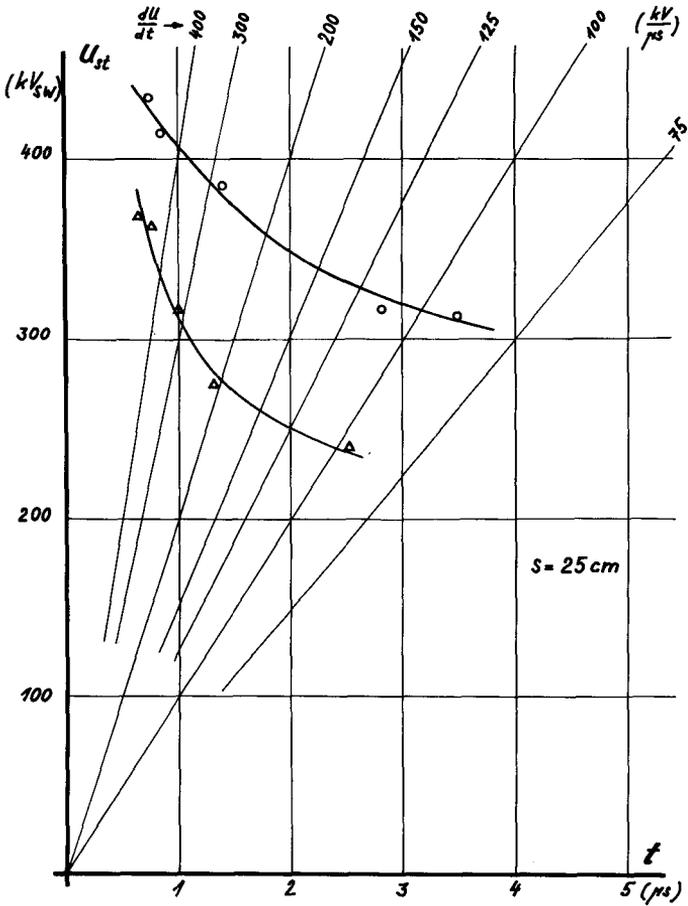


Fig. 19 - Stosskennlinie für Ansprechen in der Front

Anordnung wie in Fig. 18. Stabelektrode geerdet;
durch vorherige Bogenversuche eingebrannt.
Abstand 25 cm.

o Stab negativ Δ Stab positiv

b) Ueberschlagspannung bei Gleichspannung

Für den Fall der positiven Stabelektrode decken sich die gemessenen Werte weitgehend mit den Scheitelwerten der Messungen mit Wechselspannung. Auffällig ist die starke Streuung im Falle der abgerundeten Stabelektrode. Für

negative Stabelektroden liegen die Ueberschlagspannungen bedeutend höher und ergeben unabhängig von der Form des Stabendes ungefähr gleiche Werte. Da die Prüfanlage keine höheren Spannungen als ca. 180 kV zu erzeugen erlaubte, war es nicht möglich, die Ueberschlagspannungen bis zu Schlagweiten von 25 cm zu messen, wie dies für einen direkten Vergleich nötig gewesen wäre.

c) Stosskennlinien für Ansprechen in der Front

Der Einfluss der Frontsteilheit auf die Ueberschlagspannung wurde für den Fall der kalten Bogenstrecke ausgemessen. Dabei wurde eine durch vorherige Bogenversuche eingebrannte Elektrode verwendet. Im Kurvenblatt Fig. 19 sind auf der Ordinate die Ueberschlagspannungen und auf der Abszisse die Zeiten bis zum Durchbruch für Ueberschläge während der Front aufgetragen. Man erkennt, dass für grosse Steilheiten die Ueberschlagspannung bedeutend steigt. Bei den weiter unten beschriebenen Messungen an erlöschenden Bogen schwanken die Steilheiten zwischen 130 und 170 kV/ μ s. Für den Fall der kalten Lichtbogenstrecke würde eine entsprechende Variation in der Frontsteilheit eine Schwankung der Ueberschlagspannung von ca. 6% zur Folge haben.

3. Messungen an einem erlöschenden Lichtbogen

a) Interpretation der Oszillogramme

Die in Fig. 21 wiedergegebenen Oszillogramme des KO₂, welche zur Messung der Prüfverzögerungszeit dienen, zeigen die letzten zwei Halbwellen des Stromes vor der Löschung. Ein Impuls bezeichnet die Auslösung des Zeitrelais des KO₁ und damit den Moment des Prüfstosses. Um bei den kurzen Verzögerungszeiten eine grössere Genauigkeit der Zeitmessung zu erhalten, wurde der Strahl mehrmals mit grösserer Geschwindigkeit abgelenkt. (Fig. 20a) Die Verzögerungszeiten wurden durch Eichung der Zeitbasis mit einem Quarzoszillator bestimmt. Die verwendete lineare Zeitablenkschaltung nach Berger ist in lit. 2 beschrieben, wo auch die möglichen Abweichungen von der Linearität diskutiert werden. Fig. 21 zeigt die gleichzeitig aufgenommenen Oszillogramme der Stosstrom- und Spannungsregistrierung. Ihre Zeitaxe ist logarithmisch, die Ablenkzeitkonstante beträgt 25 μ s.

b) Verlauf der Wiederverfestigung

Die Fig. 22 und 23 stellen den auf diese Weise gemessenen Verlauf der Verfestigung einer Lichtbogenstrecke nach dem Erlöschen des Bogens dar. Dabei zeigt Fig. 22 die Werte für kleine Prüfverzögerungszeiten bis 7 ms und Fig. 23 die entsprechenden Werte bis 70 ms. Für 0,25 ms wird eine Festigkeit von weniger als 10 kV gemessen. Für grössere Verzögerungszeiten steigt die Festigkeit zuerst rascher, und dann langsamer bis auf ca. 230 kV für negative Stabelektrode und 60 ms Verzögerungszeit. Für kleinere Prüfverzögerungszeiten als 12 ms ist kein Einfluss der Polarität des Prüfstosses ersichtlich. Bei längeren Zeiten gehen die Streubänder der beiden Kurven deutlich auseinander.

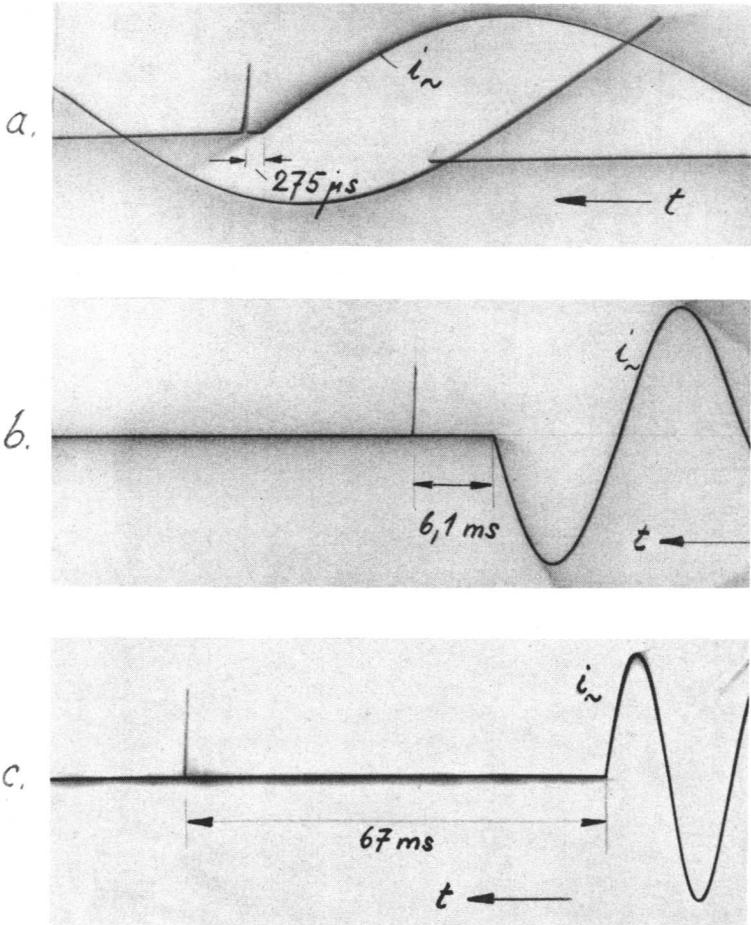


Fig. 20

Oszillogramme zur Messung
der Prüfverzögerungszeit

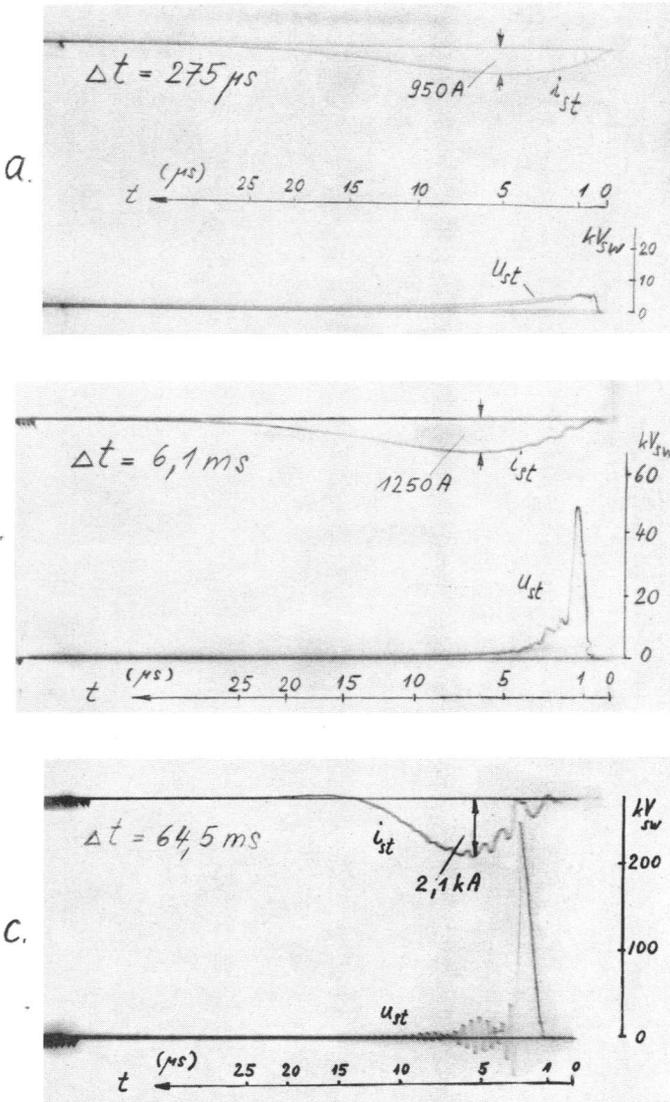


Fig. 21 - Messung von Strom (i_{st}) und Spannung (u_{st}) des Prüfstosses. Die Oszillogramme wurden gleichzeitig mit denen der Fig. 20 aufgenommen.

c) Streuung der Messungen

Die grosse Zahl der durchgeführten Messungen zeigt, dass die Werte innerhalb eines ziemlich gut definierten Streubandes liegen. Bezogen auf den mittleren Messwert beträgt die Breite des Streubandes:

Prüfverzögerungszeit	1	5	10	30	60	ms
Streubandbreite	37	22	16	10	8	± %

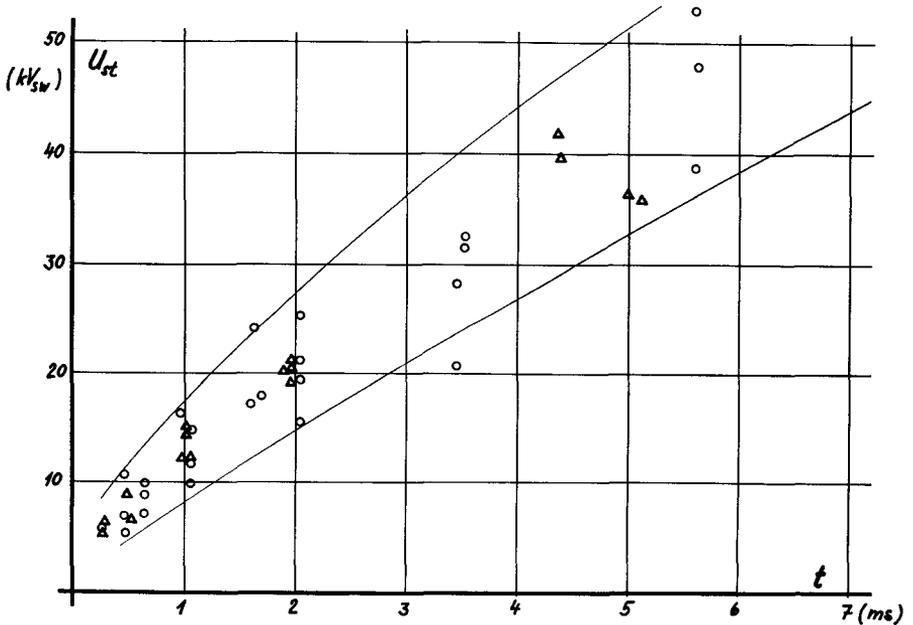


Fig. 22 - Wiederverfestigung eines Luftlichtbogens

Anordnung vertikal, Streckmetallgitter 4x11 cm oben,
Stabelektrode 7 ϕ Cu unten, Bogenlänge 25 cm

U_{st} = Ansprechspannung in der Front

t = Prüfverzögerungszeit

Polarität des Stosses: \circ Stabelektrode negativ

Δ Stabelektrode positiv

Frontsteilheit ca. 150 kV/ μ s; Ueberschlag in der Front

Es wurde versucht, die Gründe dieser verhältnismässig grossen Streuung zu ermitteln. Der örtliche Verlauf des Bogens und damit seine Länge waren nicht bei jeder Schaltung gleich, wie aus visuellen Beobachtungen durch eine berusste Glasplatte hervorging. Die Längenunterschiede der einzelnen Bogen betragen schätzungsweise 20 %. Eine weitere Streuungsquelle lag in der schlecht definierten Form der Elektroden. Bei jedem Bogenversuch brannte die Stabelektrode um ca. 2,5 - 3 mm ab. Der zurückbleibende Stumpf hatte nicht jedesmal die gleiche Form. Oft befanden sich auf ihm unregelmässig geformte Schlackenrückstände. Nach den in Fig. 18 dargestellten Ergebnissen der Messungen über den Einfluss der Elektrodenform auf die Ueberschlagspannung bei Gleich- und Wechselspannung und den in der Literatur publizierten ähnlichen Untersuchungen bei Stossspannung (z.B. lit. 22) muss angenommen werden, dass die Ungleichheiten in der Form der Stabelektroden ebenfalls einen Einfluss auf die Grösse der Streuung hatten.

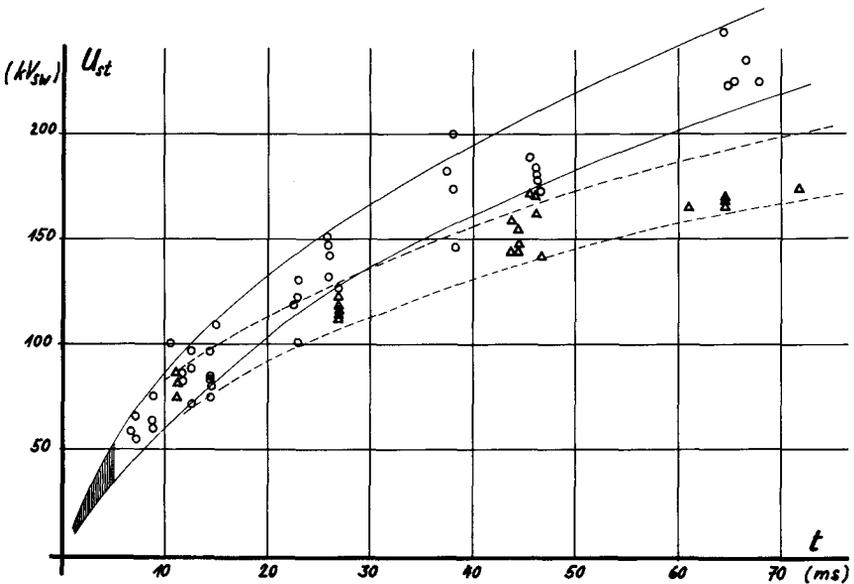


Fig. 23 - Wiederverfestigung eines Luftlichtbogens

Anordnung und Bezeichnungen wie in Fig. 22

Der in Fig. 22 dargestellte Bereich ist schraffiert eingezeichnet.

Die Polarität der letzten Halbwelle vor der Löschung war ohne erkennbaren Einfluss auf die Höhe der Durchschlagsspannung.

d) Diskussion der Ergebnisse

Die vorliegenden Messungen zeigen, dass die Wiederverfestigung in Luft verhältnismässig langsam vor sich geht. Der Einfluss gewisser Parameter, insbesondere der Dauer und der Grösse des der Löschung vorangehenden Stromes auf die Wiederverfestigung konnte nicht gemessen werden.

Versuche, bei denen der üblicherweise verwendete Zünddraht aus Eisen durch einen solchen aus Kupfer oder Konstantan verschiedener Dicke ersetzt wurde, zeigten, dass Material und Durchmesser des Zünddrahtes nach 0,7 s Bogendauer ohne Einfluss auf die Entjonisierungsgeschwindigkeit sind. Auch konnte kein eindeutiger Unterschied festgestellt werden, wenn eine Stabelektrode aus Eisen statt einer solchen aus Kupfer verwendet wurde.

Der zeitliche Verlauf des Spannungszusammenbruches (Fig. 21) legt die Vermutung nahe, dass der Durchschlag bei kurzen Prüfverzögerungszeiten ein Wärmedurchschlag ist, also durch Aufheizen des Restgases durch die angelegte Spannung bewirkt wird, während es sich bei den längsten Verzögerungszeiten sicher um einen Durchschlag infolge Stossjonisation handelt. Bei den kürzesten Prüfverzögerungszeiten (Osz. Fig. 21a) verhält sich der Bogenrest ähnlich wie ein Widerstand; ein Zusammenbruch in der Form der Spannungskurve ist nicht zu bemerken. Die längsten Verzögerungszeiten ergeben Oszillogramme (Fig. 21c), die qualitativ denen eines Ueberschlags in kalter Luft entsprechen. Die Spannung am Bogen bricht in diesem Fall rasch zusammen, der Verlauf des Oszillogrammes nach dem Zusammenbruch ist durch die Konstanten des Messkreises gegeben. Im Bereich der Prüfverzögerungszeiten zwischen 5 und 15 ms treten Uebergangsformen im Verlauf des Spannungszusammenbruches auf (Fig. 21b). Die dargelegte Vermutung wird durch den Umstand bestärkt, dass eine Polaritätsabhängigkeit der wiederkehrenden dielektrischen Festigkeit erst für Prüfverzögerungszeiten, welche grösser als 10 - 15 ms sind, feststellbar ist. Da es sich bei der Anordnung des Bogens um eine Spitze-Platte Funkenstrecke handelt, muss ein Unterschied in der Ueberschlagsspannung für die beiden Polaritäten bei einem elektrischen Durchschlag (Stossjonisation) bestehen, was die in Fig. 23 dargestellten Messungen gezeigt haben. Dagegen ist kein Unterschied für einen Wärmedurchschlag zu erwarten, was durch die Messungen ebenfalls bestätigt wurde.

Extrapoliert man die Kurven in Fig. 23 bis zu den an der kalten Bogenstrecke gemessenen Werten, so ergeben sich Zeiten für die totale Wiederverfestigung von der Grössenordnung von 0,2 - 0,3 s. In der Literatur (lit. 9, 15, 36) wird allgemein für die Schnellwiedereinschaltung nach Kurzschlüssen eine Unterbrechungszeit von 0,1 - 0,2 s für die Entjonisierung als genügend erachtet. Unsere Messungen bestätigen diese Angaben, wenn man berücksichtigt, dass im Moment der Wiedereinschaltung der Bogenrest nur mit der Betriebsspannung beansprucht wird, also nicht die volle dielektrische Festigkeit aufzuweisen braucht.

B. Versuch einer indirekten Schalterprüfung

1. Allgemeines

Die hier beschriebenen Versuche sollen nicht als Messungen aufgefasst werden. Sie haben vielmehr den Sinn, nachzuweisen, in welchem Masse sich die von uns entwickelte Steuerschaltung zur Durchführung indirekter Schalterprüfungen eignet.

Mit der technischen Entwicklung der letzten 20 Jahre sind die Ausschaltleistungen der Schalter bedeutend gestiegen. 1951 wurden von schweizerischen Firmen für die Ausschaltleistungen (dreiphasig, symmetrisch) Werte folgender Grössenordnung angegeben:

Nennspannung	50	150	220	380	kV
Ausschaltleistung	800-1600	3500	5000	8000	MVA

Die Leistungen der bestehenden Hochleistungsprüfanlagen bewegen sich um 600 - 1000 MVA. Es ist daher nur in den wenigsten Fällen möglich, den direkten Nachweis der Ausschaltleistung zu erbringen. In allen übrigen Fällen ist man auf Kurzschlussversuche in grossen Netzen oder auf indirekte Prüfungen angewiesen. Es ist deshalb nicht verwunderlich, dass sehr viele Arbeiten über indirekte Prüfverfahren bestehen. Eine systematische Zusammenfassung der indirekten Methoden findet sich in Vogelsanger (lit. 39), wo sämtliche Vorschläge bis 1949 aufgeführt und miteinander verglichen werden.

Eine kritische Betrachtung aller Einzelheiten zeigt, dass keine der Methoden den direkten Versuch voll zu ersetzen vermag, obwohl dies von einigen Autoren (siehe z.B. die Kontroverse Marx-Kesselring, lit. 19, 23, 24) bestritten wird, doch vermögen indirekte Prüfungen besonders für Entwicklungsversuche sehr grosse Dienste zu leisten.

Das in dieser Arbeit beschriebene Steuergerät erlaubt, synthetische Prüfungen vorzunehmen. Darunter sollen solche Prüfungen verstanden werden, bei denen der Kurzschlussstrom vor der Unterbrechung und die wiederkehrende Spannung aus zwei getrennten Quellen stammen. Die E.M.K. der Kurzschlussstromquelle muss dabei nur so gross sein, dass die Lichtbogenspannung des Schalters nicht wesentlich auf den Strom zurückwirkt. Einige Autoren (lit. 14, 37) schlagen vor, als Kurzschlussstrom den Schwingstrom eines Parallelschwingkreises zu benutzen. Die wiederkehrende Spannung wird entweder aus einem niederfrequenten Spannungstransformator (lit. 25, 32), einer Hochfrequenzquelle (lit. 28), einem Tesla-Transformator (lit. 28, 29) oder einem Stossgenerator (lit. 23, 38) entnommen. Die Hauptschwierigkeit besteht darin, die Prüfspannung im richtigen Moment an die Schalterklemmen zu legen. Zu diesem Zwecke sind verschiedene Steuerungen entwickelt worden, deren Prinzipien in grossen Zügen im Kap. II dieser Arbeit dargestellt wurden.

2. Messanordnung

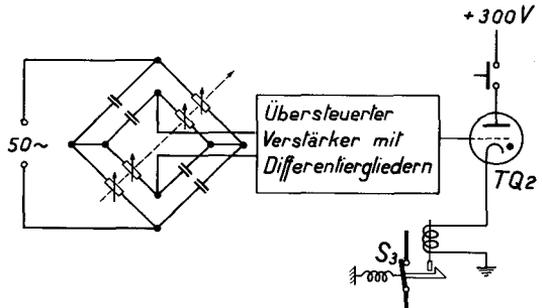
Zu den Versuchen wurde ein Druckluftschalter verwendet, welcher von der

Maschinenfabrik Oerlikon zur Verfügung gestellt wurde. Seine Nenndaten waren:

Type	LT
Nennspannung	20 kV
Nennstrom	400 A
Ausschaltleistung	240 MVA
Betriebsdruck	12-16 Atü

Bei allen Versuchen wurde die Ausschaltung synchron gesteuert, sodass der Schaltbefehl bezüglich des Kurzschlussstromes immer die gleiche Phase hatte und infolgedessen die Lichtbogendauer und die Polarität der letzten Halbwelle vor der Löschung immer dieselben waren. Fig. 24 zeigt das Prinzip der zu diesem Zwecke verwendeten Steuerschaltung. Als Schaltelement wurde ein Thyatron verwendet, welches aus einer mit dem Kurzschlusskreis synchronen Quelle über einen übersteuerten Verstärker gezündet wurde. Eine Phasenschieberschaltung aus Widerstands-Kapazitätsgliedern erlaubte, den Zündeinsatzpunkt beliebig einzustellen.

Fig. 24
Prinzip der Synchronsteuerung des Ausschaltbefehles



Die Versuche wurden in zwei verschiedenen Messanordnungen durchgeführt, die im wesentlichen denen bei den Versuchen mit Luftlichtbogen entsprechen.

Das Schema der ersten Messanordnung ist in Fig. 25 dargestellt. Der Stoss-generator war bei allen Versuchen einstufig geschaltet; seine Stosskapazität C_{st} betrug $1 \mu F$. Die Schaltfunkenstrecke war auf der Oberspannungsseite des Stosskreises angebracht. Eine Plattenlöschfunkenstrecke F_3 bewirkte, dass der Stosskreis nach dem Stoss wieder vom Stromkreis abgetrennt wurde. Die Halbwertdauer der Welle war bei dieser Anordnung durch die resultierende Impedanz der Transformatoren T_1 bis T_3 bestimmt. Sie betrug ca. $150 \mu sec$.

Der Stromkreis war gleich geschaltet wie bei den Versuchen mit Luftlichtbogen. Die Leerlaufspannung am Transformator T_3 betrug wiederum $7,7 kV$, der Kurzschlussstrom $700 A$. Besondere Schutzmassnahmen, um den Prüfstoß vom Transformator fernzuhalten, waren nicht nötig, da seine Wicklung die angelegten Stossspannungen von max. $40 kV$ ohne weiteres aushielt. Der Schalter S_2 war bei diesen Versuchen ständig geschlossen.

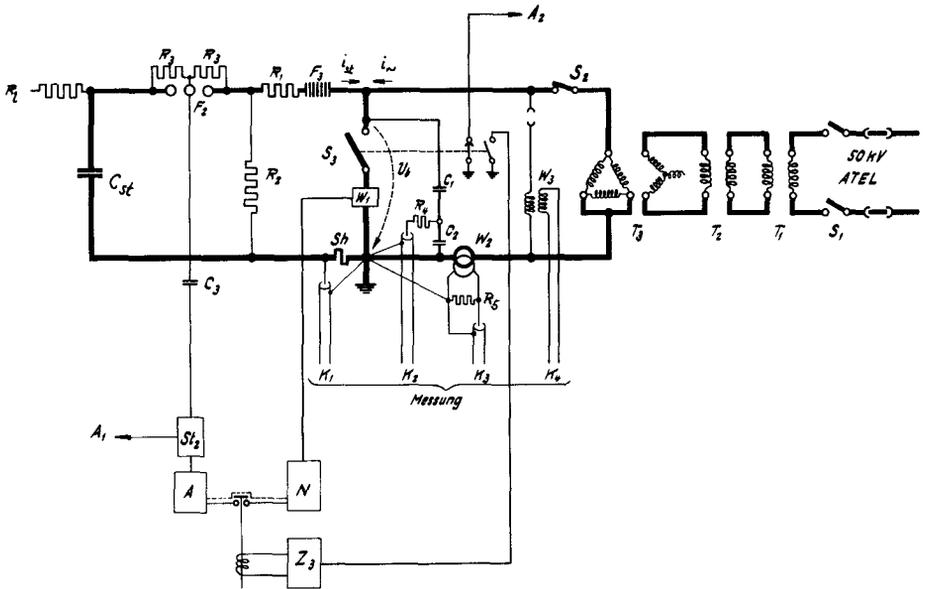


Fig. 25 - Schaltung für synthetische Schaltversuche
(erste Messanordnung)

Versuche mit längerer Halbwertdauer des Prüfstosses wurden in einer zweiten Messanordnung nach Fig. 26 durchgeführt. Dabei waren die 3 Pole des Versuchsschalters in Serie geschaltet. Der Prüfstoss wurde nur auf eine der drei Unterbrechungsstellen gegeben, die beiden anderen dienten dazu, den Stromkreis vom Stosskreis abzutrennen.

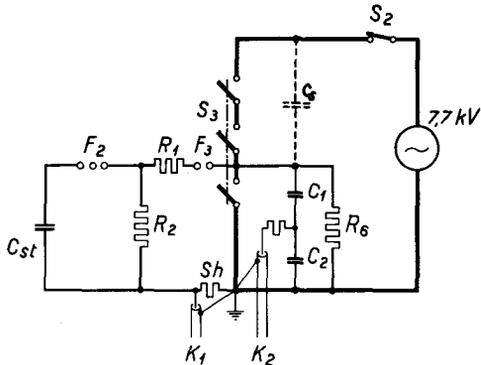


Fig. 26
Schaltversuche
(zweite Messanordnung)

Die Messkreise waren gleich geschaltet wie bei den Versuchen mit Luftlichtbogen (Fig. 13). Die Auslösung des Oszillographen KO_1 erfolgte durch einen Hilfskontakt am Prüfschalter, während der KO_2 am Auslösestossgenerator St_2 angekoppelt wurde.

3. Messungen

Oszillogramme, welche mit der ersten Messanordnung aufgenommen wurden, sind in Fig. 27 und 28 dargestellt. Fig. 27b und 28b zeigen die Oszillogramme der Löschung ohne überlagerte Stosspannung. Die Eigenfrequenz der wiederkehrenden Spannung beträgt 5,3 kHz. In Fig. 28b ist die wiederkehrende Spannung mit grösserer zeitlicher Auflösung nochmals dargestellt. Fig. 27a und 28a zeigen die entsprechenden Oszillogramme, aufgenommen mit überlagertem Stoss über der wiederkehrenden Spannung. Der Scheitelwert der gesamten wiederkehrenden Spannung beträgt in diesem Falle 32 kV; er wird ca. $60\mu s$ nach dem Nullwerden des Stromes erreicht. Ohne Prüfstosskreis beträgt der entsprechende Wert 13 kV.

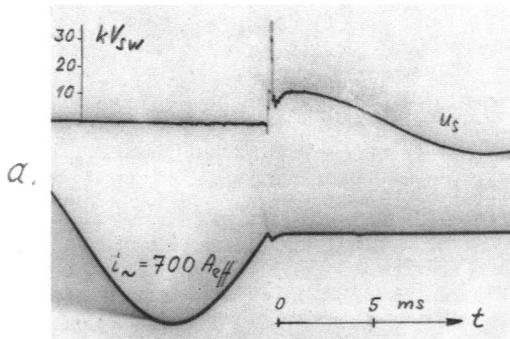
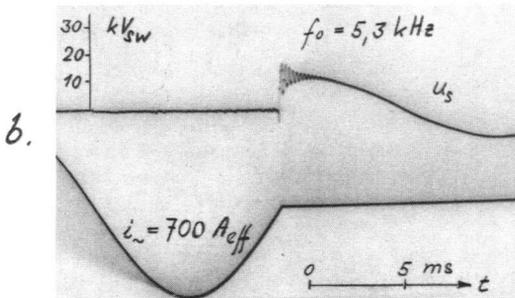


Fig. 27



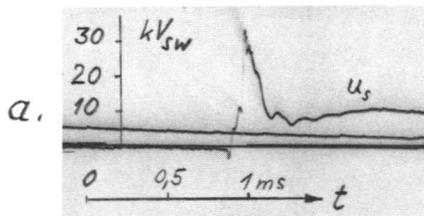
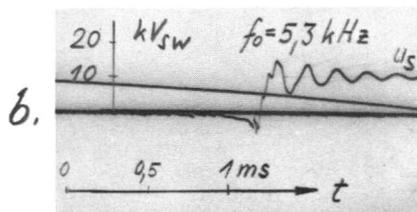


Fig. 28

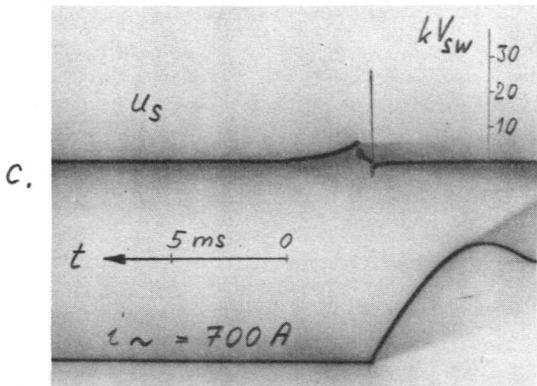
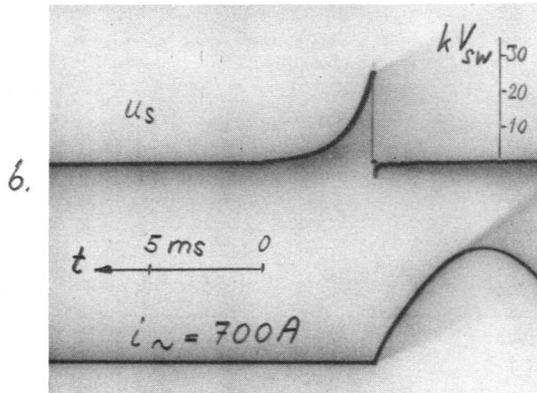
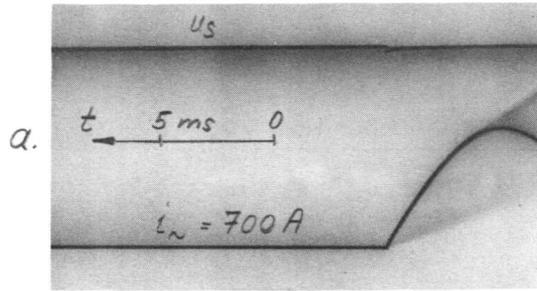


Mit der zweiten Messanordnung wurden die Oszillogramme Fig. 29 und 30 aufgenommen, und zwar ist in Fig. 29a Strom- und Spannungsverlauf dargestellt, für den Fall, dass kein Stoss überlagert wurde. Die wiederkehrende Spannung liegt, da $C_1 > C_2$, in diesem Falle fast gänzlich an den beiden anderen Unterbrechungsstellen. Die kleine Spitze im Verlauf von u_s im Oszillogramm Fig. 29a ist die Löschespitze der Lichtbogenspannung. Da man mit der hier beschriebenen Prüfmethode in einem beliebigen Moment einen Prüfstoss beliebiger Höhe an die Unterbrechungsstelle anlegen kann, eignet sich die Schaltung besonders zur Feststellung der wiederkehrenden dielektrischen Festigkeit der Trennstrecke. Die Fig. 29b und 29c zeigen Oszillogramme solcher Prüfungen. Im Falle Fig. 29b hält die Unterbrechungsstrecke den Prüfstoss von 27 kV stand; im Falle von Fig. 29c, wo die Blasung des Schalters durch Blenden gedrosselt war, führt der Prüfstoss zum Ueberschlag. Die Fig. 30 zeigt die gleichen Prüfstösse, wie sie im Oszillographen KO₂ mit logarithmischer (rascher) Zeitablenkung registriert wurden.

4. Diskussion der Messungen

Die Oszillogramme Fig. 27 bis 30 zeigen, dass die vorgeschlagene Prüfschaltung die Durchführung indirekter Prüfungen erlaubt. Die Beschränkung auf verhältnismässig kleine Werte von Kurzschlussstrom und wiederkehrender Spannung war durch die Daten der zur Verfügung stehenden Apparate bedingt, doch bestehen keine grundsätzlichen Hindernisse, nach der gleichen Methode Grossversuche durchzuführen.

Fig. 29
Schalterversuch
(zweite Mess-
anordnung)
Strom- und
Spannungsverlauf



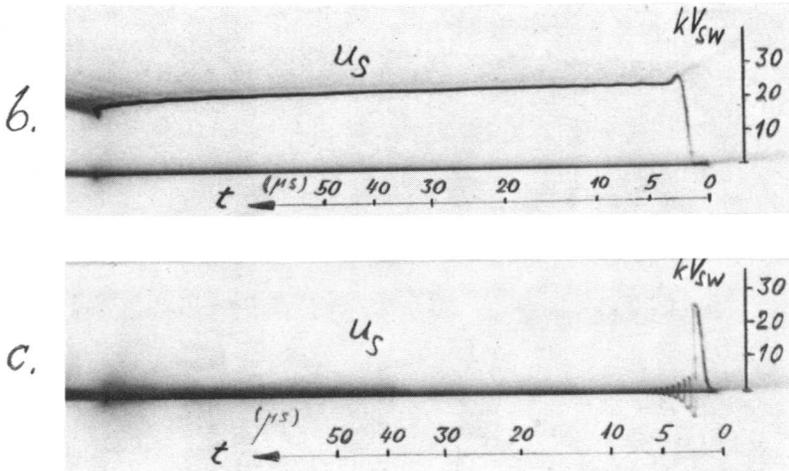


Fig. 30 - Schalterversuch (zweite Messanordnung)
Prüfspannungsverlauf mit schneller Zeitablenkung
aufgenommen

Gegen die synthetischen Prüfverfahren lassen sich folgende Einwände erheben:

1. Die Lichtbogenspannung des Schalters wirkt auf den Kurzschlusskreis zurück und beeinflusst die Form der Stromkurve.
2. Die Beanspruchung der löschenden Unterbrechungsstrecke ist nicht dieselbe wie in der direkten Kurzschlussausschaltung, auch wenn der Scheitelwert der angelegten Stossspannung um eine gleiche Zeit vom Abreissmoment verzögert ist und den gleichen Wert hat wie die wiederkehrende Spannung im direkten Versuch. Bei der direkten Prüfung steigt die wiederkehrende Spannung nach einer Sinusfunktion an, während sie im Falle der synthetischen Prüfung bis zur Auslösung des Stosses annähernd Null ist und dann plötzlich auf den Scheitelwert springt.
3. Führt der Prüfstoss zur Wiederzündung, so ist der Stossgenerator bei der Löschung im darauffolgenden Nulldurchgang entladen. Die Unterbrechungsstrecke wird dann bei diesem nur mit der verhältnismässig kleinen wiederkehrenden Spannung des Kurzschlusskreises beansprucht.
4. Der Stromspeisekreis muss den vollen Prüfstoss aushalten, was entweder einen speziell isolierten und entsprechend kostspieligen Transformator oder eine Schutzsiebkette erfordert.

Die hier beschriebene Methode hat diese Nachteile auch, mit Ausnahme von Punkt 4, welcher nur bei der ersten Messanordnung zutrifft. Bei der zweiten Messanordnung wird zudem die Löschung möglicherweise durch die Kapazität des Messteilers ($C_1 = 1000 \text{ pF}$) etwas beeinflusst.

Die Zeit zwischen dem Abreißen des Stromes und der Front des Prüfstosses beträgt bei der beschriebenen Schaltung im Minimum $50 \mu\text{s}$. Dies entspricht bei der direkten Prüfung einer Eigenfrequenz der wiederkehrenden Spannung von 10 kHz . Durch geeignete Modifikationen in der Steuerschaltung könnte diese Zeit bis auf ca. $30 \mu\text{s}$ gesenkt werden, was einer Eigenfrequenz von ca. 16 kHz entsprechen würde.

LITERATURVERZEICHNIS

Im nachstehenden Literaturverzeichnis sind nur die Werke aufgeführt, die in der Arbeit zitiert werden oder mit ihr unmittelbar in Zusammenhang stehen.

1. Bauer B.
Untersuchungen an Oelschaltern.
Bull. SEV 1915, S. 141
Bull. SEV 1917, S. 226
2. Berger K.
Eine neue Schaltung für die Erzeugung zeitproportionaler Ablenkung im
Kaltkathodenstrahl-Oszillograph.
Bull. SEV 1944, S. 33.
3. Berger K. & Schneeberger E.
Ein Kabel-Stossgenerator für grosse Leistung und 1 Mill. Volt Stoss-
spannung.
Bull. SEV 1933, S. 324.
4. Biermanns J.
Fortschritte im Bau von Druckgasschaltern.
ETZ 1938, S. 194
5. Blaha A.
Contribution aux essais indirects des disjoncteurs.
CIGRE 1948, Rapp. 132.
6. Boisseau A.C.; Wyman B.W.; Skeats W.F.
Insulation flashover deionization times as a factor in applying high-speed
reclosing circuit-breakers.
Trans. AIEE 1949, S. 1058.
7. Browne Jr. T.E.
Dielectric recovery by an AC-arc in air blast.
Trans. AIEE 1946, S. 169.
8. Buchwald H.
Der Polaritätsunterschied der Luft-Durchschlagsspannungen in unhomogenen,
unsymmetrischen elektrischen Feldern.
Diss. T.H. Braunschweig 1930.
9. McCann G.D.; Clark J.J.
Dielectric recovery characteristics of large air gaps.
Trans. AIEE 1943, S. 45.
10. Cassie A.M.; Mason F.O.; Orton L.H.
Application d'une tension de choc à un arc dont l'intensité est sur le point
de s'annuler.
RGE 1939, S. 877.

11. Cassie A.M.; Mason F.O.; Orton L.H.
Measurement of rapidly varying resistance in an air arc gap near current zero.
The Electrician 1939, S. 206.
12. Chambrillon M.
Etude sur les essais indirects réalisés sur des disjoncteurs pneumatiques et des disjoncteurs à huile à coupure commandée.
CIGRE 1950, Rapp. 140.
13. Fouillé A.
L'arc dans les interrupteurs.
Electricité 1947, S. 17.
14. Gessen V.
Un nouveau procédé pour la vérification du pouvoir de coupure des disjoncteurs à haute tension.
Electritschestro, Dez. 1939, S. 31
Auszug davon in Vogelsanger, lit. 39.
15. Harrington E.J. und Starr E.C.
Deionization time of fault-arc-paths.
Trans. AIEE 1949.
16. Juillard E.
Enquête sur les stations à grande puissance pour l'essai des interrupteurs à courant alternatif.
CIGRE 1939, Rapp. 136.
17. Kesselring F. & Koppelman F.
Das Schaltproblem der Hochspannungstechnik.
Arch. f. Elektrotechnik 1935, S. 11.
18. Kesselring F.
La fréquence propre et le pouvoir de coupure des disjoncteurs à grande puissance.
CIGRE 1935, Rapp. 131.
19. Kesselring F. & Kaufmann W.
Sind Hochleistungs-Prüffelder überflüssig?
ETZ 1937, S. 724.
20. Kesselring F. & Kaufmann W.
Nouveau genre d'interrupteur pour la coupure d'une mise à la terre ou d'un court-circuit.
CIGRE 1939, Rapp. 104.
21. Koppelman F.
Untersuchung einer Bogenentladung mit schnellen Spannungsstößen.
Wissensch. Veröff. aus dem Siemens-Konzern 1937.

22. Marx E.
Lichtbogenstromrichter.
Springer Berlin, 1932.
23. Marx E.
Eine Ersatzschialtung für die Prüfung von Hochleistungsventilen und Hochleistungsschaltern.
ETZ 1936, S. 583.
24. Marx E.
Stellungnahme zur Zuschrift der Herren Kesselring und Kaufmann.
ETZ 1937, S. 726.
25. Mortlock J.R.; Wilkinson K.J.R.
Synthetic testing of circuit-breakers.
Journal I.E.E., part. II 1942, S. 137.
26. Orton L.H.; Mason F.O.
Measurement of transient resistance of arc gaps near zero pause.
British Electrical and Allied Industries Research Association,
Report G/XT 78.
27. Oyama M.
Der Polaritätseffekt der elektrischen Ueberschlagsvorgänge im inhomogenen Feld.
Diss. T.H. Braunschweig 1931.
28. Pugno-Vanoni E.; Someda G.; Fracanzani G.; Mainardis M.; Mariu K.
Prove degli interrutori.
Elettrotecnica 1936, S. 329.
29. Pugno-Vanoni R.; Someda G.
Essais des interrupteurs à courant alternatif.
CIGRE 1937, Rapp. 137.
ETZ 1939, S. 157.
30. Roth A.
Hochspannungstechnik.
Springer Wien, 1938/1950.
31. Seylaz E.
Câbles de mesure retardateurs.
FKH Bericht AK-2/50.
32. Skeats W.F.
Special tests on impulse circuit-breakers.
Electrical Engineering 1936, S. 710.
33. Slepian J.
Extinction of long AC-arcs.
Trans. AIEE 1930, S. 421.

34. Slepian J.
Die Löschung eines Wechselstrom-Lichtbogens im Gasstrom.
E&M 1933, S. 181.
35. Strigel R.
Elektrische Stossfestigkeit.
Springer Berlin, 1939.
36. Thommen H.
Recherches sur le réenclenchement rapide.
CIGRE 1939, Rapp. 108.
37. Trautweiler M.
Ueber die Möglichkeit von Schalterprüfungen mit voneinander unabhängigen
Spannungs- und Stromquellen.
38. Verse H.H.
Eine neue Ersatzprüfschaltung für Lichtbogenprüfeinrichtungen.
Diss. T.H. Braunschweig, 1936.
39. Vogelsanger E.
Les essais indirects des disjoncteurs.
CIGRE 1948, Rapp. 122.
40. Wanger W. und Brown
Berechnung des Schwingungsverlaufes der wiederkehrenden Spannung
nach Kurzschlussaltungen.
BBC Mitteilungen 1937, S. 283.
41. Wanger W.
Die wiederkehrende Spannung bei Abschaltungen mit Hochspannungs-
schaltern.
Bull. SEV 1939, S. 325.