

# BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND  
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

## Experimentelle und theoretische Untersuchung der Erdschlussüberspannungen in isolierten Wechselstromnetzen, sowie der Eigenschaften von Erdschlusslichtbogen

Von K. Berger und R. Pichard, Zürich

621.316.99 : 621.3.014.31

Da die Erdschlussversuche im 8-kV-Netz der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich in Aathal [1<sup>1)</sup>] (1929), sowie diejenigen im 50-kV-Netz der Bernischen Kraftwerke A.-G. [2] in Mühleberg (1945) keine gefährlichen Überspannungen ergeben haben, hat die Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) in ihrer Versuchsstation bei Gösigen die Eigenschaften des Lichtbogens in freier Luft, in Öl und in rissigen Isolatoren untersucht und die Resultate mit den Voraussetzungen für das Aufschaukeln der Netzspannung nach der Theorie von Petersen [3] (1917) verglichen. Es hat sich gezeigt, dass selbst beim intermittierenden Erdschluss jede einzelne dieser Voraussetzungen nur sporadisch erfüllt wird. Die Wahrscheinlichkeit der Erfüllung aller der von der Petersen-Theorie zugrunde gelegten Voraussetzungen ist deshalb so klein, dass der Fall des vollen Spannungsaufschaukelns wegen seiner ausserordentlichen Seltenheit jede praktische Bedeutung verliert. In den weitaus meisten Erdschlussfällen überschreiten die grössten auftretenden Spannungen gegen Erde den doppelten Scheitelwert der verketteten Netzspannung nicht.

En 1929 les Entreprises Electriques du Canton de Zurich (EKZ) à Aathal [1<sup>1)</sup>] et en 1945 les Forces Motrices Bernoises S.A. (FMB) [2] à Mühleberg ont effectué de nombreuses mesures de surtensions produites par une mise à la terre de leurs réseaux à 8 kV resp. 50 kV, dont le neutre est isolé. Les résultats n'ayant pas donné de valeurs dangereuses, la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH) a poursuivi ce problème dans son laboratoire près de Gösigen par des recherches expérimentales sur les propriétés de l'arc dans l'air libre, dans l'huile et dans un isolateur fissuré. Elle a confronté ces derniers résultats avec les conditions requises par la théorie de Petersen [3] (1917) pour l'obtention de surtensions élevées. Il ressort de cet examen que, même pour les arcs intermittents, ces conditions ne sont remplies que dans des cas fortuits et sporadiques. Ainsi, la probabilité pour que toutes ces conditions soient remplies au cours d'une mise à terre devient si faible que les surtensions maxima envisagées par la théorie de Petersen, dont la réalisation est extrêmement rare, ne méritent pas qu'on y attache trop d'importance. Dans la grande majorité des cas, on ne doit guère s'attendre à des tensions contre terre dépassant le double de la valeur de crête de la tension composée du r éscu

### A. Einleitung

Seit der Publikation der Theorie von Petersen (1917) [3], die für einen intermittierenden Erdschluss in einem isolierten Netz hohe Überspannungen durch Aufschaukelung des gesamten Netzpotentials voraussagt, hat sich ganz allgemein die Meinung verbreitet, aussetzende Erdschlüsse seien eine der schädlichsten Überspannungsquellen der Wechselstromnetze. Diese Meinung hat sich verstärkt, weil sie einerseits in der Literatur durch anerkannte Autoren [4, 5] unterstützt wurde, andererseits weil Erdschlüsse im Betrieb oft in Doppelerdschlüsse übergehen.

Es ist deshalb begreiflich, dass die Resultate der Erdschlussversuche im ausgedehnten 50-kV-Netz der Bernischen Kraftwerke, in welchen die höchsten Spannungen nur den 1,8fachen Scheitelwert der verketteten Netzspannung erreichten und somit relativ noch tiefer blieben als diejenigen des 8-kV-Netzès der EKZ in Aathal, zuerst als überraschend betrachtet wurden (Fig. 1). Man stellte zur Erklärung dieses Resultates fest, dass der Lichtbogen bei den Versuchen im BKW-Netz stabil gebrannt hätte, im Gegensatz zur Theorie von Petersen, die für das

Aufschaukeln der Spannung einen intermittierenden Erschlußstrom voraussetzt.

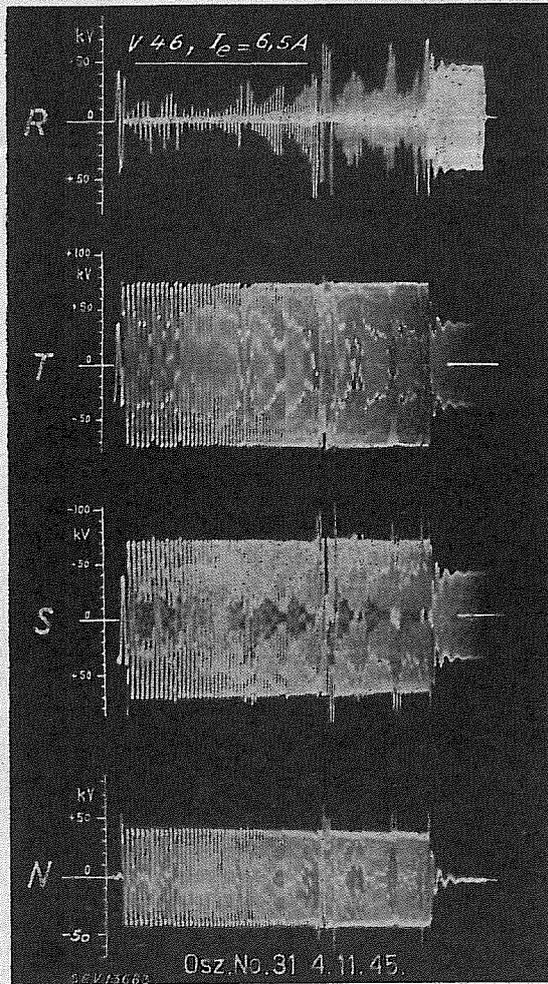
Die Frage der hohen Überspannungen blieb also ohne Antwort. Deshalb wurde im Kreise der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) der Wunsch geäussert, dieses Problem im Freiluft-Hochspannungslaboratorium der FKH in Däniken näher und gründlich zu untersuchen.

Das Vorgehen bei dieser Untersuchung war das folgende:

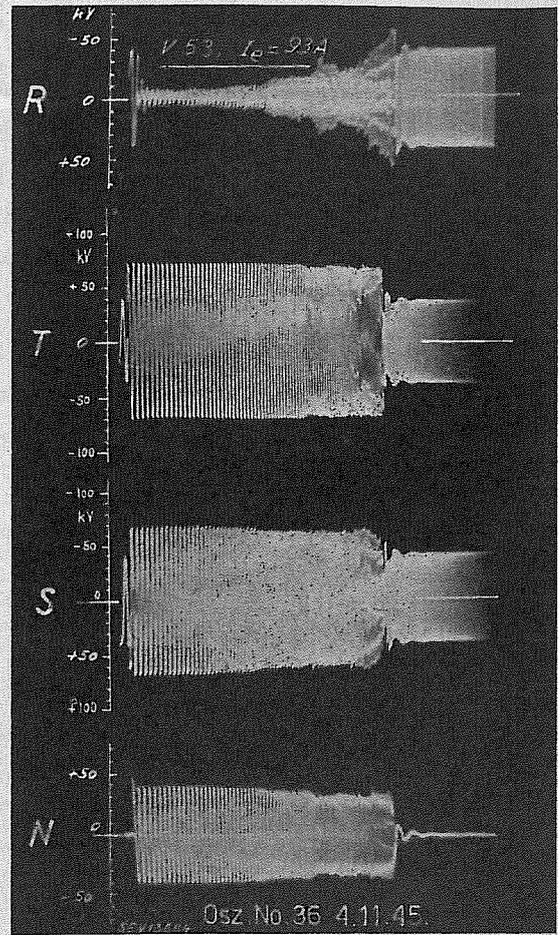
1. Bestimmung der Voraussetzungen für die Realisierung der Theorie von Petersen.
2. Bestimmung der Lichtbogeneigenschaften.
3. Durchführung von Erdschlussversuchen an einem künstlichen Netz (Modell-Netz) mit Lichtbogen in verschiedenen Medien: In Luft, in Öl und in einem Isolatorspalt.
4. Vergleich der Voraussetzungen Petersens mit den tatsächlichen Vorgängen bei mehrmaliger Wiederholung der Versuche und Feststellung, wie oft oder mit welcher Wahrscheinlichkeit das ganze Aufschaukeln der Spannung zu erwarten ist.

Das verwendete Modell-Netz war kein Drehstrom-, sondern ein Zweileiter-Einphasennetz. Wie die Theorie von Petersen zeigt, spielen sich die für das Aufschaukeln der Spannung entscheidenden Vorgänge nur in der kranken Phase ab, so dass das verwendete Modell für diesen Zweck genügte.

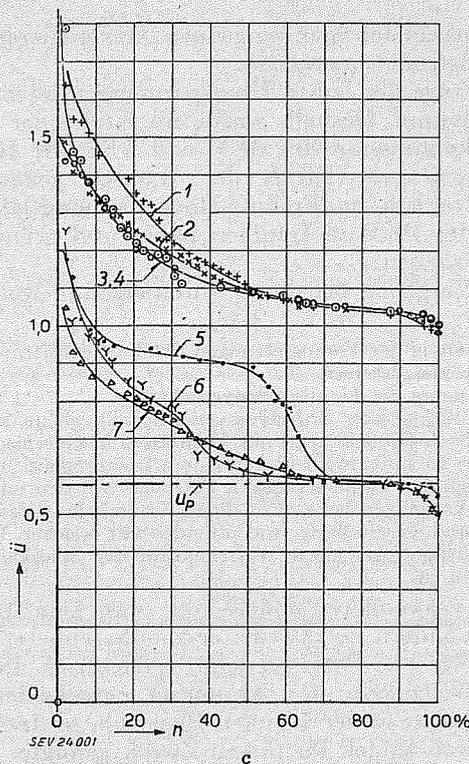
<sup>1)</sup> siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.



a



b



c

Fig. 1

**Einige Resultate der Lichtbogenerdschlussversuche im 50-kV-Netz der BKW, Mühleberg 1945**

a und b Oszillogramme der Spannung an der kranken (R), an den gesunden Phasen (S, T) und am Sternpunkt (N) gegen Erde bei verschiedener Netzausdehnung

a kleiner Netzteil mit Erdschlußstrom von 6,5 A

b grosser Netzteil mit Erdschlußstrom von 93 A

c Summenhäufigkeitskurven der auf den Scheitelwert der verketteten Betriebsspannung bezogenen höchsten aufgetretenen Spannungen ( $\bar{u}$ ).

- 1 Gesunde, der kranken nachellenden Phase (S) beim Ausschalten
  - 2 Gesunde, der kranken nachellenden Phase (S) beim Einschalten
  - 3 Gesunde, der kranken vorellenden Phase (T) beim Ausschalten
  - 4 Gesunde, der kranken vorellenden Phase (T) beim Einschalten
  - 5 Kranke Phase (R) beim Ausschalten
  - 6 Sternpunkt (N) beim Ausschalten
  - 7 Sternpunkt (N) beim Einschalten
- n 100 % = 49 Erdschlüsse  
 $u_p$  Scheitelwert der Phasenspannung

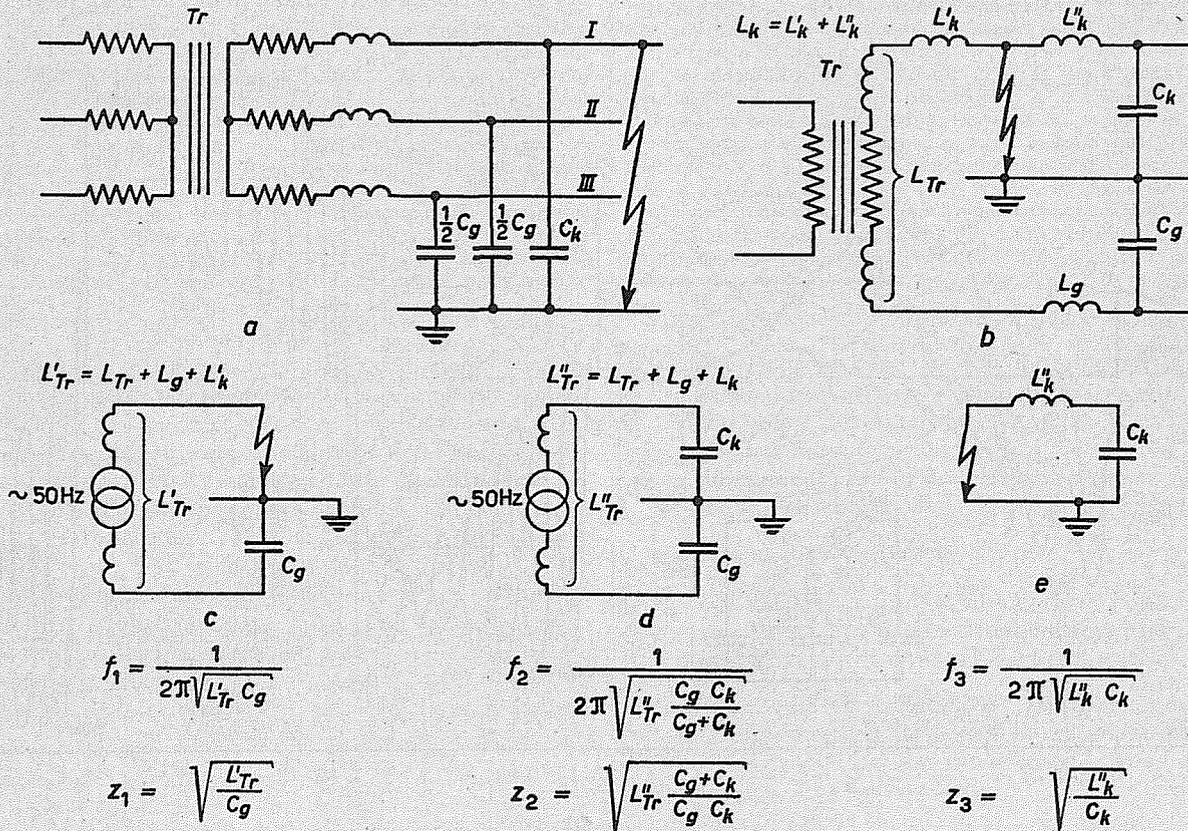
**B. Erdschlussvorgang im isolierten Drehstromnetz**

Im stationären Zustand des (festen) Erdschlusses ist die Polspannung der kranken Phase null; die Spannungen der gesunden Phasen sind gleich der verketteten Netzspannung. Der Erdschlußstrom ist

dann gleich der vektoriellen Summe der kapazitiven Ladeströme der gesunden Phasen. Für eine rein sinusförmige Spannung mit Betriebsfrequenz von 50 Hz ist er gegeben durch:  $I_{E50} = 3 \omega C_P U_P$ , worin  $\omega = 314 \text{ s}^{-1}$  die Kreisfrequenz,  $C_P$  die Kapazität einer Phase gegen Erde und  $U_P$  die Phasenspannung des Netzes bedeuten.

zweite ist wichtig, weil sie kurz nach dem Löschen massgebend ist für den Anstieg der wiederkehrenden Spannung zwischen Erdschlussphase und Erde und damit für das Wiederezünden.

Die beiden Schwingungen  $f_1$  und  $f_2$  sind schwach gedämpft; ihre Abklingverhältnisse  $\delta_1$  und  $\delta_2$ , d. h. die Verhältnisse einer Amplitude zur vorhergehenden



SEV24.002

Fig. 2

**Ausgleichs-Schwingkreise eines isolierten Netzes im Erdschlussfall**

- a Prinzipschema eines Drehstromnetzes
- b Prinzipschema eines Zwei-Leiter-Netzes oder Ersatzschema eines Drehstromnetzes
- c, e Schwingkreis beim Einleiten des Erdschlusses
- d Schwingkreis beim Löschen des Erdschlusses

$T_r$  Transformatoren;  $C_g$  Kapazität der gesunden Phasen;  $C_k$  Kapazität der kranken Phase;  $L_{Tr}$  resultierende Streuinduktivität aller Transformatoren des Netzes;  $L_g, L_k$  Induktivität der Leitungen (gesunde bzw. kranke Phase);  $f_1, f_2, f_3$  Eigenfrequenzen;  $Z_1, Z_2, Z_3$  Schwingungsimpedanzen

(Querkapazitäten zwischen Phasen, bzw. Ohmsche Widerstände, die den kapazitiven Kupplungsfaktor bzw. die Dämpfung bestimmen, sind einfachheitshalber nicht eingezeichnet)

Zwischen dem Normalzustand des Netzes und dem stationären Erdschlusszustand treten Ausgleichsschwingungen auf, deren Eigenfrequenzen bei jedem Zünden des Lichtbogens mit  $f_1$  und  $f_3$ , und bei jedem Löschen mit  $f_2$  bezeichnet sind (Fig. 2). Die Schwingung  $f_3$  besitzt die höchste Frequenz (Wanderwellenspiel); sie ist relativ stark gedämpft und klingt rasch ab; sie spielt für das Aufschaukeln der Spannung nur eine unwesentliche Rolle. Wichtiger sind die Schwingungen  $f_1$  (in 50-kV-Netzen 200...800 Hz) und  $f_2$  (in 50-kV-Netzen 400...1200 Hz): Die erste, weil ihr Strom, der ein Mehrfaches des 50-Hz-Ladestromes beträgt, sich diesem überlagert, in jeder Ausgleich-Halbperiode den gesamten Erdschlussstrom durch null gehen lässt und dabei dem Lichtbogen eine Möglichkeit zum Löschen gibt. Die

den der anderen Polarität betragen  $-0,8...-0,9$  pro Halbperiode. Da die resultierende Leitungsinduktivität bei vermaschten Netzen klein ist gegenüber derjenigen der speisenden Transformatoren, darf das Wellenspiel der gesunden Phasen vernachlässigt werden.

**C. Theorie von Petersen**

Petersen stellte 1917 fest, dass es beim aussetzenden Erdschluss Fälle gibt, in welchen das Potential des gesamten isolierten Netzes (d. h. seine mittlere Spannung gegen Erde) im Rhythmus der 50-Hz-Halbperioden zu einem Mehrfachen der Phasenspannung aufpendeln kann. Fig. 3 stellt vom Moment  $t_2$  an den Ablauf dieses Vorganges dar. Die Bedingungen, die erfüllt werden müssen, damit

dieses Aufschaukeln zustande kommt, sind die folgenden:

1. Regelmässiges Zünden des Erdschlusslichtbogens in der Nähe jedes positiven und negativen 50-Hz-Scheitelwertes der Phasenspannung der kranken Phase (Zünden in  $t_2, t_3, t_4, \dots$ , Fig. 3).
2. Regelmässiges Löschen des Erdschlusslichtbogens beim ersten Stromnulldurchgang, welcher der Zündung, infolge der Ausgleichschwingung mit der Frequenz  $f_1$ , folgt (Löschen in  $t'_2, t'_3, t'_4, \dots$ , Fig. 3).

Die beiden Bedingungen sind nun sehr schwer zu erfüllen. Die erste verlangt nämlich einen ganz bestimmten Verlauf der Durchschlagfestigkeit der Zündstrecke (Kurve  $F$ ). Ist diese Festigkeit zu hoch, so löscht der Erdschluss endgültig; ist sie zu tief, so setzt eine verfrühte Zündung ein, die das mittlere Netzpotential wieder reduziert. Die zweite Bedingung verlangt eine sehr rasche Verfestigung der Zündstrecke sofort nach dem Löschen, denn die

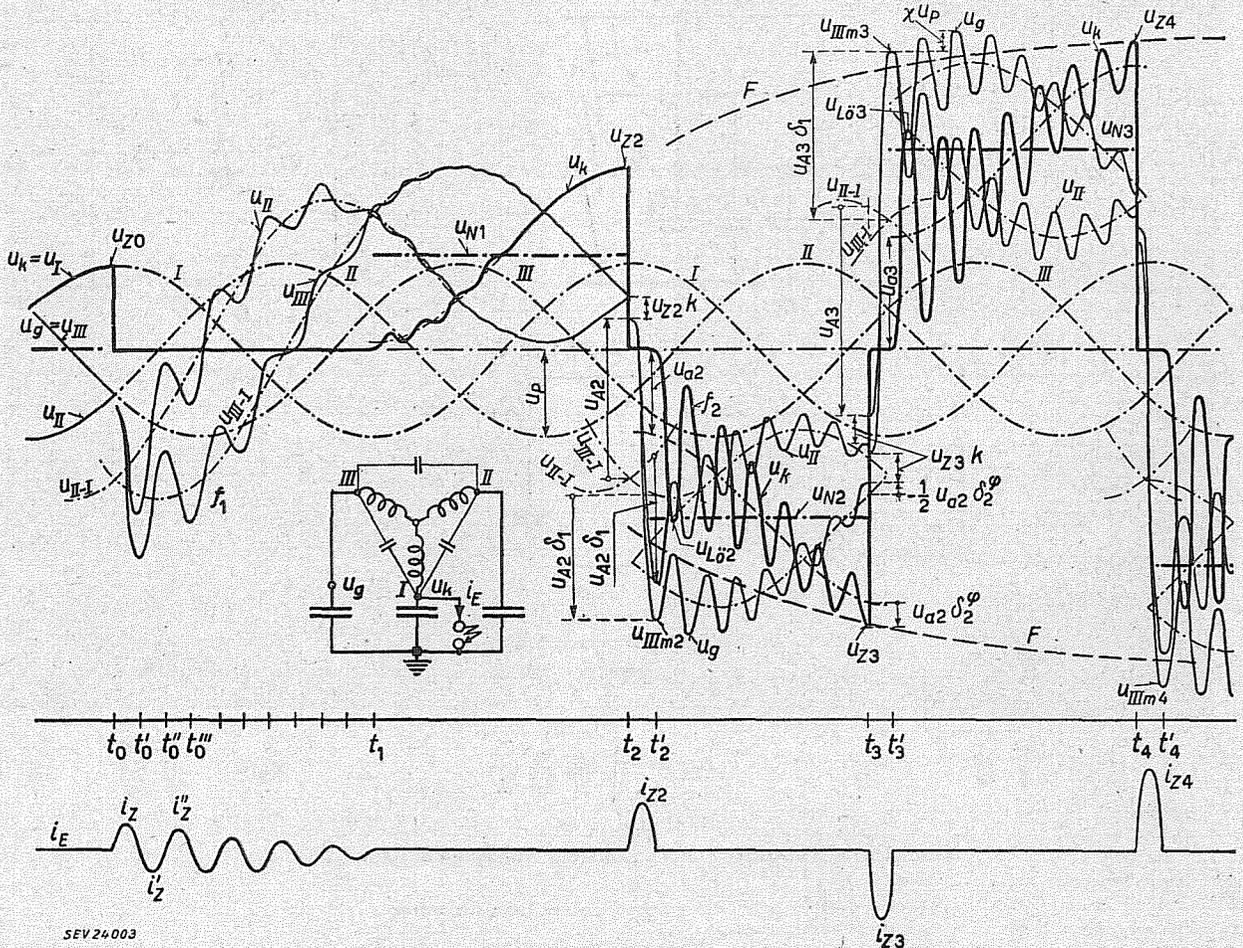


Fig. 3

Theoretischer Strom- und Spannungsverlauf beim intermittierenden Erdschluss

Annahme von Peters und Slepian: ( $t_0, \dots, t_2$ )

Zünden in  $t_0$  und  $t_2$ , Löschen in  $t_1$ , Wiederzünden kurz nach jedem Stromnulldurchgang ( $t'_0, t'_2, t'_4, \dots$ ) zwischen  $t_0$  und  $t_1$

Annahme von Petersen (von  $t_0$  an)

Zünden in  $t_0, t_2, t_4, \dots$  Löschen in  $t'_2, t'_4, t'_6, \dots$

- |  |   |
|--|---|
| I, II, III                                     | Phasenspannung im normalen Betrieb ( $u_p$ , Scheitelwert);   |
| $u_I, u_{II}, u_{III}$                         | Spannung gegen Erde der Phasen I, II und III;   |
| $u_{II-I}, u_{III-I}$                          | verkettete Spannungen;  |
| $u_k = u_I$                                    | Spannung an der kranken Phase;  |
| $u_g = u_{III}$                                | Spannung an der gesunden Phase, die den höchsten Wert erreicht;   |
| $u_{N1}, u_{N2}, u_{N3}$                       | mittleres Netzpotential nach dem Löschen in $t'_1, t'_2, t'_4, \dots$ ;   |
| $u_{II m2}, u_{III m2}, u_{II m3}, u_{III m3}$ | Spannung an den Phasen II bzw. III im Moment des Löschens $t'_2$ bzw. $t'_4$ ;                                    |
| $u_{Z0}, u_{Z2}, u_{Z4}, \dots$                | Zündspannungen im Moment $t_0, t_2, t_4, \dots$ ;   |
| $u_{A2}, u_{A4}, \dots, u_{a2}, u_{a4}$        | Anfangsamplitude in $t_2, t_4, \dots$ der Ausgleichsspannung mit Eigenfrequenz $f_1$ bzw. $f_2$ ;                 |
| $u_{L\delta 2}, u_{L\delta 4}, \dots$          | Löschspannung nach dem Löschen in $t'_2, t'_4, \dots$ ;   |
| $i_E$  | Erdschlussstrom;  |
| $i_{Z2}, i_{Z4}, i_{Z6}, \dots$                | erste Ausgleichsstromamplitude mit Frequenz $f_1$ infolge der Zündungen in $t_2, t_4, t_6, \dots$ ;               |
| $i_{Z'}, i_{Z''}, i_{Z'''}, \dots$             | Ausgleichsströme mit Frequenz $f_1$ , nach den Nulldurchgängen in $t', t'', t''', \dots$ ;                        |
| $F$  | erforderliche elektrische Festigkeit der Zündstrecke;   |
| $C_I, C_{II}, C_{III}$                         | Phasenkapazitäten gegen Erde;   |
| $f_1, f_2$                                     | Eigenfrequenzen der Ausgleichsschwingungen nach dem Zünden bzw. nach dem Löschen;                                 |
| $\delta_1, \delta_2$                           | Abklingfaktor der Schwingung $f_1$ bzw. $f_2$ ;   |
| $k$  | kapazitiver Kupplungsfaktor zwischen Phasen;  |
| $\varphi$                                      | Anzahl Halbperioden der Schwingung $f_2$ bis zur nächsten Zündung;  |
| $\chi$   | bezogene Zunahme der Spannung der gesunden Phase III durch Anwachsen der Betriebsspannung von $1/2 u_p$ auf $u_p$ |

**Erläuterung des Vorganges nach Petersen:**

Im Moment  $t_2$  bricht die Spannung der kranken Phase plötzlich von  $u_{z2}$  auf 0 zusammen und nimmt die Spannungen der gesunden Phasen um den Betrag  $ku_{z2}$  mit. Durch Erdung der kranken Phase müssen die Spannungen der gesunden Phase die stationären Werte der verketteten Spannungen erreichen, um welche sie mit der Ausgleichsfrequenz  $f_1$  schwingen. Die Anfangsamplitude  $u_{a2}$  dieser Schwingung ist durch die Differenz zwischen dem Momentanwert der betreffenden gesunden Phase kurz nach dem Zünden und demjenigen der Kurve  $u_{II-I}$  bzw.  $u_{III-I}$  gegeben.

Eine Halbperiode von  $f_1$  später (in  $t_2'$ ) geht der Erdschlussstrom durch null, währenddessen die Ausgleichsspannung ihren Scheitelwert von anderer Polarität ( $u_{a2}\delta_1$ ) erreicht, der sich den Momentanwerten der verketteten Spannung  $u_{II-I}$  und  $u_{III-I}$  überlagert. Die Spannungen der beiden gesunden Phasen sind in diesem Moment mit  $u_{II m2}$  und  $u_{III m2}$  bezeichnet. Da der Lichtbogen laut Voraussetzung in  $t_2'$  löscht, fließt nach  $t_2'$  kein galvanischer Strom nach der Erde und die vorhandene Ladung des ganzen isolierten Netzes bleibt konstant. Diese Ladung ist gleich der Summe der Ladungen der einzelnen Phasen ( $C_I 0 + C_{II} u_{II m2} + C_{III} u_{III m2}$ ) und auch gleich dem Produkt des mittleren Netz-Potentials mit der totalen Netzkapazität

$[u_{N2} (C_I + C_{II} + C_{III})]$ . Sind die Phasenkapazitäten untereinander gleich, so wird

$$u_{N2} = \frac{u_{II m2} + u_{III m2}}{3}$$

Die Kurven der Betriebsspannungen I, II und III sind somit von  $t_2'$  an um  $u_{N2}$  verschoben. Die Spannung der kranken Phase  $u_k$  schwingt dann von null aus um die stationäre verschobene Kurve I mit der Frequenz  $f_2$  und der Anfangsamplitude  $u_{a2}$ . Da es sich hier um einen Ausgleich der Phasen untereinander handelt, betragen die Spannungsamplituden dieser Schwingung an den gesunden Phasen stets die Hälfte derjenigen an der kranken Phase und haben die umgekehrte Polarität. Eine Halbperiode der Frequenz  $f_2$  nach  $t_2'$  erreicht die Spannung der kranken Phase die Löschespannung  $u_{L\delta_2}$ , die von der Erdschlussstelle ohne Rückzündung ausgehalten werden muss.

Im Moment  $t_3$  findet die nächste Zündung statt, weil die Spannung  $u_k$  die Durchschlagsfestigkeit  $F$  der Zündstrecke erreicht. Der Vorgang verläuft dann wieder wie zwischen  $t_2$  und  $t_3$ . Nach  $t_3'$  nimmt das mittlere Netzpotential den Wert  $u_{N3}$  an, der höher ist als  $u_{N2}$ . Der Absolutwert der Spannung  $u_N$  steigt von Halbperiode zu Halbperiode der Betriebsspannung asymptotisch bis zum Grenzwert  $u_{N max}$ , der durch Gl. (1) gegeben ist.

wiederkehrende Spannung steigt dann mit der Frequenz  $f_2$  rasch an. Diese Löschespannung erreicht oft 75...95% der vorhergehenden Zündspannung. Eine vorzeitige Rückzündung während der Löscheschwingung würde das Aufschaukeln wieder abbauen.

Wenn die Bedingungen 1 und 2 während mehrerer Halbperioden (4...10 oder mehr) ohne Lücke erfüllt sind, lässt sich die maximal erreichte Höhe des Gesamtnetzpotentials ( $u_{N max}$ ) für vollkommen isolierte Drehstromnetze durch die folgende allgemeine Formel [6] errechnen:

$$u_{N max} = u_P \frac{1 - \frac{2}{3} \delta_1 \left[ (1-k) - \delta_2^\varphi \left( \frac{1}{2} + k \right) \right]}{1 + \frac{2}{3} \delta_1 \left[ (1-k) + \delta_2^\varphi \left( \frac{1}{2} + k \right) \right]} \quad (1)$$

Die an der (der kranken voreilenden) gesunden Phase höchste auftretende Spannung gegen Erde ( $u_{g max}$ ) bestimmt sich durch:

$$u_{g max} = \frac{3}{2} u_{N max} + \chi u_P \quad (2)$$

und diejenige an der kranken Phase ( $u_{k max}$ ):

$$u_{k max} = u_{N max} (1 - \delta_2^\varphi) + u_P (1 + \delta_2^\varphi), \quad (3)$$

$$\text{wenn } \left| \frac{1}{\delta_1} \right| \geq \frac{2}{3} (1-k) (1 + |\delta_2|) - |\delta_2^\varphi|$$

(wobei  $\varphi$  eine ungerade Zahl ist)

oder

$$u_{k max} = (u_{N max} - u_P) (1 - \delta_2), \quad (3a)$$

$$\text{wenn } \left| \frac{1}{\delta_1} \right| \leq \frac{2}{3} (1-k) (1 + |\delta_2|) - |\delta_2^\varphi|$$

(in diesem letzten Fall ist die Löschespannung am grössten).

In diesen Formeln sind:

$u_P$  der Scheitelwert der Phasenspannung des Drehstromnetzes

$\delta_1, \delta_2$  das halbperiodige Abklingverhältnis der Schwingungen  $f_1$  und  $f_2$

( $\delta_1$  und  $\delta_2$  sind stets negativ; ihr absoluter Betrag ist etwas kleiner als 1)

$k$  der mittlere kapazitive Kopplungsfaktor zwischen kranker und gesunder Phase, mit Werten von 0 (für einadrige Kabel), 0,1...0,25 (für Freileitungen)

$\varphi$  die Anzahl Halbperioden der Frequenz  $f_2$  zwischen Löschespannung und nächster Zündung des Erdschlusslichtbogens ( $\varphi \approx \frac{f_2}{f_{50}} - 1,5$ )

$\chi$  ein von  $u_{N max}$  und  $\delta_2$  abhängiger Faktor, der zwischen 0 (in den meisten Fällen) und maximal 0,5 (bei  $\delta_2 = -1$ ) variiert.

Gegenüber diesen allgemein gültigen Formeln nimmt nun Petersen in seiner Berechnung an, die Schwingung  $f_2$  sei bei der nächsten Zündung schon abgeklungen, das heisst:

$$\delta_2^\varphi \approx 0$$

Er erhält so die vereinfachten Formeln:

$$u_{g max} = u_P \frac{3}{2} \left[ \frac{1 - \frac{2}{3} \delta_1 (1-k)}{1 + \frac{2}{3} \delta_1 (1-k)} + \frac{2}{3} \chi \right] \quad (4)$$

$$u_{k max} = u_P \frac{2}{1 + \frac{2}{3} \delta_1 (1-k)} \quad (5)$$

und drückt sie folgendermassen aus [3]<sup>2</sup>):

An der gesunden Phase:

$$V_{\dot{u}m} = 1,5 E_{pm} \frac{2,5 K_{11} + 1,5 K_{12} - K_{11} d}{0,5 K_{11} + 1,5 K_{12} + K_{11} d} \quad (6)$$

An der kranken Phase:

$$3 E_{pm} \frac{K_{11} + K_{12}}{0,5 K_{11} + 1,5 K_{12} + K_{11} d} \quad (7)$$

wobei  $V_{\dot{u}m} = u_{g max}$ ,  $E_{pm} = u_P$ ,  $d = 1 + \delta_1$ ,

$$\frac{K_{12}}{K_{11} + K_{12}} = k, \quad (\chi = 0)$$

<sup>2</sup>) [3], S. 565, Gl. 28' und 29.

Für die maximalen errechneten Spannungen an den gesunden und an der kranken Phase gibt Petersen als Vielfache des Scheitelwertes der *Phasenspannung* folgende Werte an [3]<sup>3)</sup>:

Tabelle I

	$k = 1/4$ ( $K_{11} : K_{12} = 3$ )		$k = 1/6$ ( $K_{11} : K_{12} = 5$ )	
	$\delta_1 = -0,9$ ( $d = 0,1$ )	$\delta_1 = -0,8$ ( $d = 0,2$ )	$\delta_1 = -0,9$ ( $d = 0,1$ )	$\delta_1 = -0,8$ ( $d = 0,2$ )
	$\frac{u_{gmax}}{u_P} = \frac{V_{\dot{u}m}}{E_{pm}}$	3,96	3,50	4,50
$\frac{u_{kmax}}{u_P}$	3,64	3,33	4,0	3,60
$\frac{u_{Nmax}}{u_P}$	2,64	2,33	3,0	2,60

Diese Resultate sind etwas höher als diejenigen mit Berücksichtigung von  $\delta_2^\varphi$ . Logischerweise ist anzunehmen, dass die Zündung bei einer maximalen Spannungsbeanspruchung der Zündstrecke stattfindet, z. B. wie in Fig. 3, d. h. wenn  $\varphi$  eine ungerade ganze Zahl ist. Somit wird  $\delta_2^\varphi$  negativ und  $u_{Nmax}$  laut Gl. (1) kleiner.

**D. Formel von Rüdénberg**

Rüdénberg macht diejenige Annahme, die theoretisch zu den grössten Überspannungen führt. Sie läuft physikalisch darauf hinaus, dass die Zündungen nicht bei einem *Maximum* der Spannungsbeanspruchung der Zündstrecke, sondern bei einem *Minimum* der Schwingung  $f_2$  stattfinden, d. h. eine Halbperiode von  $f_2$  früher oder später als in Fig. 3. Ferner betrachtet er die Schwingung  $f_2$  als völlig ungedämpft ( $\delta_2 = -1$ ). Mit diesen Voraussetzungen wird  $\varphi$  eine gerade Zahl und dadurch  $\delta_2^\varphi = +1$ , so dass die Gleichungen (1) und (2) folgende Form annehmen:

$$u_{Nmax} = u_P \frac{1 - \frac{\delta_1}{3} (1 - 4k)}{1 + \delta_1} \tag{8}$$

$$u_{gmax} = u_P \frac{3}{2} \left[ \frac{1 - \frac{\delta_1}{3} (1 - 4k)}{1 + \delta_1} + \frac{2}{3} \chi \right] \tag{9}$$

$\delta_1$  bleibt hier negativ, absolut etwas kleiner als 1. Sofern  $k$  und  $\chi$  vernachlässigt werden, stimmt die letzte Gleichung (9) mit der Formel von Rüdénberg [4]<sup>4)</sup> überein, die lautet:

$$E_c = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1 + \ddot{u}}{1 - \ddot{u}} E \tag{10}$$

wo  $E_c = u_{gmax}$  die maximale Spannung an den gesunden Phasen,  $E = \sqrt{3} u_P$  die *verkettete* Betriebsspannung und  $\ddot{u} = -\delta_1$  das Abklingverhältnis (Absolutwert) des Ausgleichvorganges mit Frequenz  $f_1$  bedeuten.

Mit  $\ddot{u} = |\delta_1| = 0,9$  gibt diese Formel für die höchste Spannung der gesunden Phase den 11,3-fachen Scheitelwert der *verketteten* Betriebsspannung, d. h.

den 19,5-fachen Scheitelwert der Phasenspannung. Ferner würde die maximale Spannung der kranken Phase eine Halbperiode der Frequenz  $f_2$  vor den letzten Zündungen laut Gleichung (3) ( $u_{kmax} = 2 u_{Nmax}$ , weil  $\delta_2^{\varphi-1} = -1$ )  $26 u_P$  erreichen. Die Voraussetzung Rüdénbergs, wenn sie prinzipiell auch möglich ist, hat aber nur äusserst wenig Chancen sich zu verwirklichen; denn man kann sich eine Zündstrecke kaum vorstellen, die die Spannung  $4...26 u_P$  aushält, aber etwa 1 ms später bei nur  $2 u_P$  zündet [weil dann in Gl. (3):  $\delta_2^\varphi = +1$ ] und nach etwa 3 ms beim ersten Stromnulldurchgang löscht, um in der folgenden ms die Spannung von  $2...24 u_P$  wieder auszuhalten. Ferner sollte dieser Vorgang sich regelmässig bei jeder 50-Hz-Halbperiode 20...30mal wiederholen!

*Deshalb entspricht die Formel von Rüdénberg einem Fall, der bei einem Erdschluss praktisch nie vorkommt.*

**E. Theorie von Peters und Slepian**

Peters und Slepian [7] (1923) setzen voraus, dass der Erdschlußstrom nicht bei den Nulldurchgängen des Ausgleichvorganges  $f_1$ , sondern erst bei demjenigen der Betriebsfrequenz löscht, wie dies in Fig. 3 im Moment  $t_1$  dargestellt ist. Die Löschbedingung ist dann sehr günstig, weil die wiederkehrende Spannung zwischen den Lichtbogenelektroden, deren Kurve (sofern die Ausgleichschwingung  $f_1$  ganz abgeklungen ist) entsprechend der verschobenen 50-Hz-Sinuslinie die Nulllinie tangiert, relativ langsam ansteigt. Die Spannungen der drei Phasen sind von dem Löschmoment an, wegen der bleibenden Aufladung des Gesamtnetzes, 100% asymmetrisch. Tritt nun die nächste Zündung eine Halbperiode später beim Scheitelwert der Phasenspannung der kranken Phase auf (im Moment  $t_2$ , Fig. 3), so fällt diese Spannung in einem Sprung von  $2 u_P$  plötzlich auf null. Die Spannungen an den gesunden Phasen, die kurz nach dem Zünden den stationären Wert der verketteten Spannungen, d. h.

in diesem Moment  $\frac{3}{2} u_P$ , betragen sollten, schwingen mit Frequenz  $f_1$  um diesen Wert mit einer Anfangsamplitude von  $2 u_P (1 - k)$ . Sie erreichen im Moment  $t'_2$ :  $u_{III m2} \approx \frac{3}{2} u_P + 2 u_P (1 - k) \delta_1$ , gleich-

gültig, ob der Lichtbogen bei diesem Stromnulldurchgang löscht oder wiederzündet. Die durch die Dämpfung der Ausgleichschwingung  $f_1$  und durch die kapazitive Phasenkopplung bewirkte Verminderung der Überspannung [ $|(1-k) \delta_1| < 1$ ] wird jedoch einerseits durch das Anwachsen der verketteten Spannung von  $1,5 u_P$  auf  $\sqrt{3} u_P$  während des Umschwingens des Ausgleichvorganges  $f_1$ , andererseits durch die allenfalls über 100% betragende Spannungsasymmetrie vor dem Zünden zum Teil kompensiert. Somit sind Spannungen von annähernd  $3,5 u_P$  an der der kranken voreilenden gesunden Phase zu erwarten. Zündet der Lichtbogen wieder kurz nach  $t_2$  (im Gegensatz zur Theorie von Petersen) und löscht er erst beim 50-Hz-Strom-Nulldurchgang, so kann sich der Vorgang wiederholen, und mehrmals die gleichen Spannungshöchstwerte geben,

<sup>3)</sup> [3], S. 566, Tafel 1.  
<sup>4)</sup> [4], S. 424, Gl. 40.

nämlich etwa  $2 u_P$  in der kranken Phase und etwa  $3,5 u_P$  in den gesunden Phasen. Die Voraussetzung von Peters und Slepian, die nur eine einmalige Erfüllung der Bedingung 1 der Petersen Theorie, und anstelle der Bedingung 2 das einmalige Löschen unter viel günstigeren Umständen verlangt, wird praktisch oft erfüllt. In Fig. 16 ist ein gemessenes Beispiel ersichtlich.

**F. Experimentelle Untersuchungen in der Versuchstation der FKH**

Der Lichtbogen allein, sowie der Erdschlusslichtbogen des Modell-Netzes wurden in folgenden Medien untersucht:

1. In ruhender Luft
2. In ruhendem Öl
3. Im Porzellanspalt eines rissigen Isolators.

**1. Lichtbogen in ruhender Luft**

**a) Bestimmung der Lichtbogeneigenschaften**

Zweck dieser Versuche war die Abklärung folgender Fragen:

- α) Grösse der Lichtbogenspannung bei Stromstärken von 20...700 A, 50 Hz, in Funktion der Bogenlänge.
- β) Verlauf des Lichtbogenstromes in der Nähe des Nulldurchganges.
- γ) Wirkung einer Kapazität parallel zum Lichtbogen.
- δ) Allfällige Bestimmung charakteristischer Lichtbogenkonstanten.

Zur Erreichung dieses Zieles wurde die folgende Versuchsanordnung eingerichtet: Zwischen einer festen und einer an einem langen Pendel befestigten

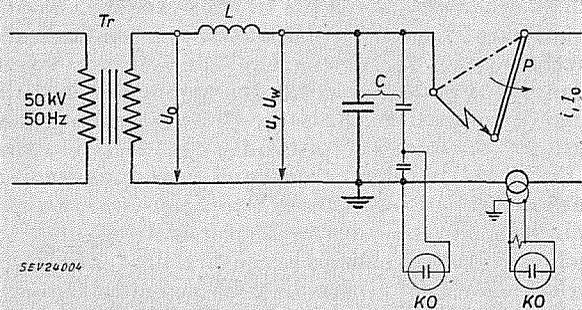


Fig. 4  
Lichtbogenversuche in ruhender Luft  
Schema der Anordnung

Tr speisender Transformator; P Pendel mit Lichtbogen; L Drosselspule; C Kapazität parallel zum Lichtbogen; KO Kathodenstrahloszillograph;  $u$  Lichtbogenspannung;  $U_0$  Leerlaufspannung;  $U_w$  wiederkehrende Spannung bei offenem Pendel;  $i$  Lichtbogenstrom;  $I_0$  Strom bei geschlossenem Pendel

beweglichen Elektrode wurde der Lichtbogen innerhalb von 2,2 s über eine Strecke von 7 m auseinander gezogen. Währenddessen wurden Spannung und Strom mit einem Kathodenstrahl-Oszillographen gemessen (Fig. 4). Die Speisung erfolgte über die Transformatoren der FKH aus dem 50-kV-Netz der Aare-Tessin A.-G. für Elektrizität, Olten (Atel). Der Lichtbogenstrom, der durch stark induktive Impedanzen (Drosselspule und Transformatoren  $L$ ) begrenzt wurde, betrug je nach dem Versuch 19 A, 35 A und 116 A bei einer Leerlaufspannung  $U_0$  von 31 kV (entsprechend der maximalen Phasenspannung eines 50-kV-Netzes) und 670 A bei 9,4 kV. Als weitere Varianten wurden verschiedene Parallelkapazitäten zum Lichtbogen, nämlich 0,004  $\mu$ F (Anlage allein, ohne zusätzliche Kapazität) oder 0,5 und 1  $\mu$ F (zusätzliche Kapazität entsprechend etwa derjenigen der Erdschlussphase eines Netzes) untersucht. Grosse Parallelkapazitäten  $C$  gaben mit den Strombegrenzungsdrosselspulen eine leichte Resonanzerscheinung, so dass die stationäre wiederkehrende Spannung  $U_w$  zwischen den Elektroden, nach dem endgültigen Erlöschen des Lichtbogens, etwas höher war als die Leerlaufspannung  $U_0$  ohne Zusatzkapazität. Sämtliche Daten und Konstanten der Kreise sind in Tabelle II zusammengestellt.

Um die rasch veränderlichen Einzelheiten trotz der relativ langen Gesamtdauer des Lichtbogens erfassen zu können, wurden die Vorgänge auf verschiedene Arten oszillographiert:

- αα) Einmalige Aufnahme mit langsamer linearer Zeitablenkung (Dauer 2...3 s).
- ββ) Vier kurzdauernde (24 ms) Aufnahmen mit rascher linearer Zeitablenkung im Laufe der Pendelbewegung: Je eine bei den Elektrodendistanzen von 18, 168, 346 und 620 cm (Kurven I, II, III, IV).
- γγ) Aufnahme mit wiederholter linearer Zeitablenkung während 150...300 ms, bei Auslösung einige Perioden vor dem endgültigen Löschmoment.
- δδ) Aufnahme der Lichtbogencharakteristik  $u = f(i)$  bei den Elektrodendistanzen von 18, 168, 346 und 620 cm (Kurven I, II, III, IV).
- εε) Aufnahme des dem Lichtbogen überlagerten Stosses (Spezial-Versuch) mit rascher logarithmischer Zeitablenkung (Zeitkonstante  $RC = 400 \mu$ s).

Einige ausgewählte Oszillogramme sind in den Figuren 5...9 reproduziert und werden hier kurz kommentiert.

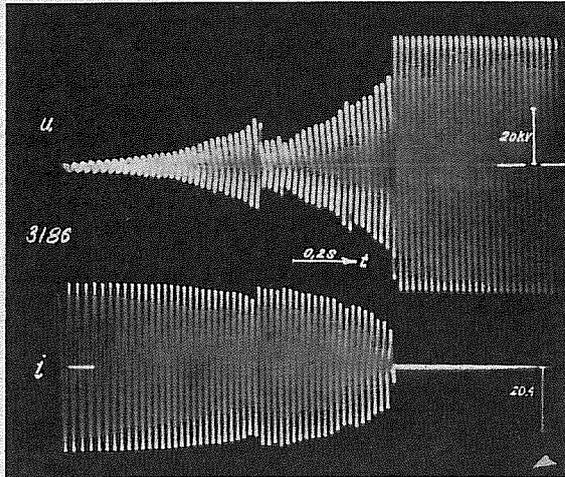
Fig. 5, Versuchsgruppe (VG) 1  
Oszillogramm-Art αα: In der Mitte des regelmässigen Spannungsanstieges durch die Elektroden-

Daten der Versuchsstromkreise bei den Versuchen der FKH

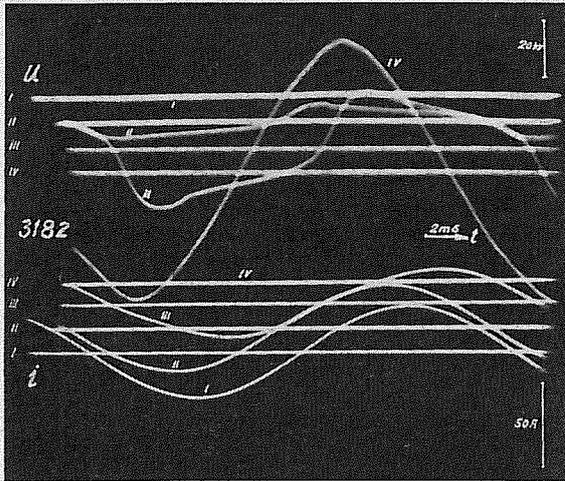
Tabelle II

Grösse	Sym-bol	Ein-heit	Versuchsgruppe (VG)							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Leerlaufspannung . . . . .	$U_0$	kV	31	31	31	31	31	31	31	9,4
Strom bei geschlossenem Pendel . . . . .	$I_0$	A	19	19	19	35	35	116	116	670
Entsprechende 50-Hz-Impedanz . . . . .	$Z$	$\Omega$	1630	1630	1630	890	890	267	267	14
Entsprechende Induktivität . . . . .	$L$	H	5,2	5,2	5,2	2,8	2,8	0,86	0,86	0,045
Kapazität parallel zum Lichtbogen . . . . .	$C$	$\mu$ F	0,004	0,5	1	0,004	1	0,004	1	0,004
Eigenfrequenz $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ . . . . .	$f_0$	Hz	1100	99	70	1500	95	2700	170	12000
Stationäre wiederkehrende Spannung gemessen bei offenem Pendel . . . . .	$U_w$	kV	31	37,1	46,5	31	38,3	31	33,5	9,4

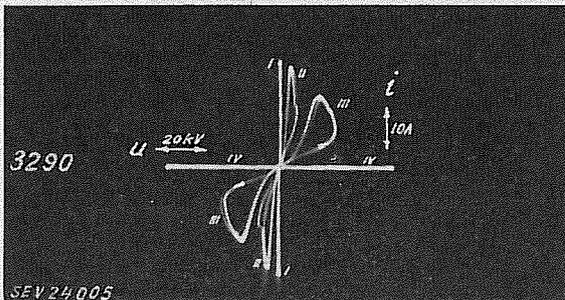
entfernung bricht die Lichtbogenspannung  $u$  plötzlich auf die Hälfte ihres Wertes zusammen. Dies kann nicht auf eine plötzliche Verkürzung der Lichtbogenlänge zurückgeführt werden, denn der Lichtbogen war, abgesehen von einer leichten Welligkeit, fast geradlinig. — Im Laufe der ganzen Lichtbogendauer treten keine Überspannungen auf.



a



b



c  
Fig. 5

Spannung  $u$  und Strom  $i$  des Lichtbogens in ruhender Luft

VG 1:  $U_0 \approx U_w = 31 \text{ kV}$ ,  $I_0 = 19 \text{ A}$ ,  $C = 0,004 \mu\text{F}$

a Aufnahme-Art  $\alpha\alpha$ , b Art  $\beta\beta$ , c Art  $\delta\delta$

Lichtbogenlängen (b und c):

I 18 cm; II 168 cm; III 346 cm; IV 620 cm

Weitere Legenden siehe im Text

Art  $\beta\beta$  zeigt die abgerundete Trapezform der Lichtbogenspannung bei annähernd sinusförmigem Strom. — Unstetigkeiten des Stromes oder der Spannung sind beim Nulldurchgang nicht sichtbar.

Art  $\delta\delta$ : Die Lichtbogencharakteristik ist nur zwischen Spannungs- und Stromscheitelwert negativ; bei abnehmendem Strom ist sie stets positiv.

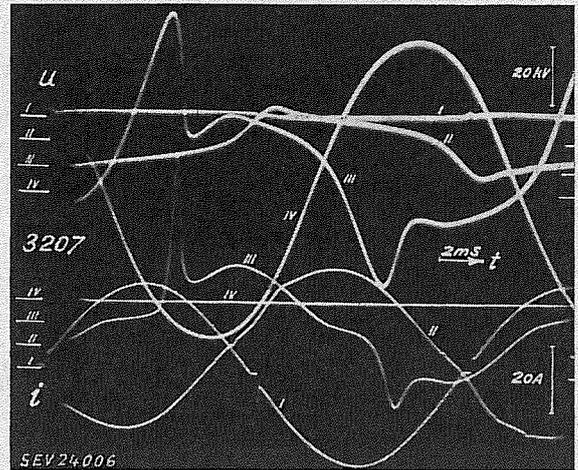


Fig. 6

Spannung  $u$  und Strom  $i$  des Lichtbogens in ruhender Luft

VG 2:  $U_0 = 31 \text{ kV}$ ,  $U_w = 37 \text{ kV}$ ,  $I_0 = 19 \text{ A}$ ,  $C = 0,5 \mu\text{F}$   
Aufnahme-Art  $\beta\beta$

Weitere Legenden siehe im Text

Fig. 6, VG 2, Art  $\beta\beta$

Die Wirkung der Parallelkapazität ist hier deutlich zu erkennen. Schon bei 18 cm treten die charakteristischen kurzen Strompausen bei jedem Nulldurchgang auf (i, Kurve I). Während der Pause nimmt die Parallelkapazität den Strom auf; deshalb steigt die Spannung, bis die Wiederzündung (bei geringer Spannung) stattfindet. — Bei 346 cm (Kurven III) werden Strom- und Spannungskurven stark deformiert; die kurzen Strompausen sind nicht mehr sichtbar, aber die Steilheit der Stromkurve ist nach dem Nulldurchgang wesentlich flacher als kurz vorher, wobei der Differenzstrom zwischen Drosselspule und Lichtbogen die Kapazität auflädt. Der Lichtbogenwiderstand nimmt also nach dem Nulldurchgang zuerst stark zu, reduziert sich aber wieder allmählich, sobald die durch steigende Spannung wachsende, im Lichtbogen eingeführte Energie diesen genug aufgeheizt hat. Kurz darauf gibt der Kondensator seine aufgespeicherte Ladung in Form einer Stromspitze wieder in den Lichtbogen zurück.

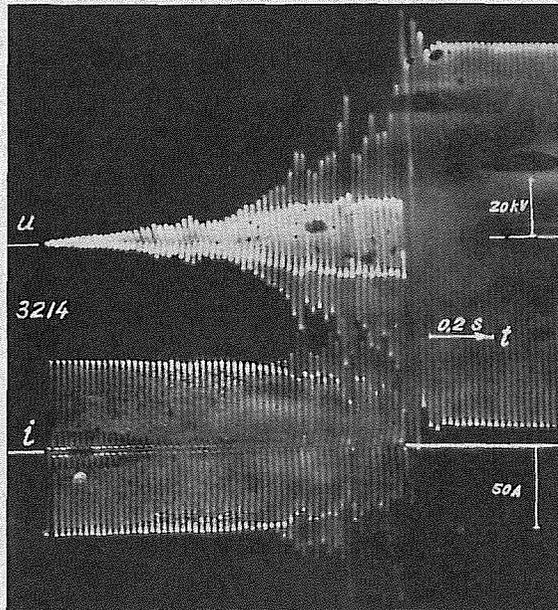
Fig. 7, VG 3

Die Strompausen bei den Nulldurchgängen sind in den Aufnahme-Arten  $\alpha\alpha$  und  $\beta\beta$  gut zu erkennen, jedoch verschwinden sie gegen Ende der Lichtbogendauer. (Die leichten Abweichungen abwechslungsweise oberhalb und unterhalb der Nulllinie kommen vom Übersetzungsfehler des Stromwandlers).

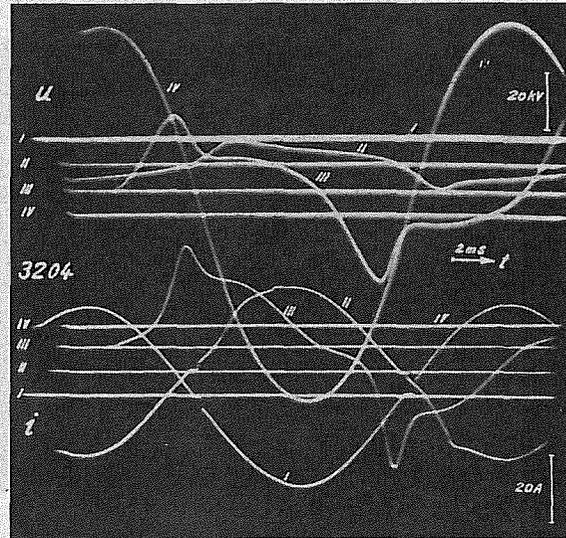
Die Strom- und Spannungskurvendeformation ist gleich wie in Fig. 6; die rasche Entladung der Parallelkapazität kommt am besten in der Lichtbogencharakteristik (Art.  $\delta\delta$ ) Nr. 3285 zum Ausdruck. — Die Spannungsspitzen, die im Oszillo-

gramm Art.  $\alpha\alpha$  über die stationäre wiederkehrende Spannung hinausführen, sind im Oszillogramm Art.  $\gamma\gamma$  im Detail dargestellt (die kleinen Zahlen des bei 0 beginnenden Oszillogrammes geben den Rang der Strahldurchläufe an). Strom- und Span-

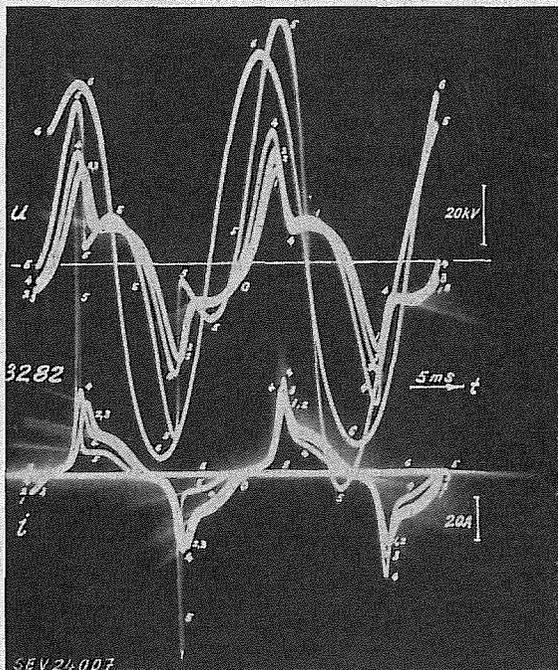
nung immer ähnlicher einem Durchschlag zusammenbricht. Zuletzt endet der Vorgang mit einer Schwebung der gedämpften Eigenschwingung  $f_0$  mit der betriebsfrequenten Spannung. Aus diesen Oszillogrammen sieht man die ganzen Entwicklungsstadien



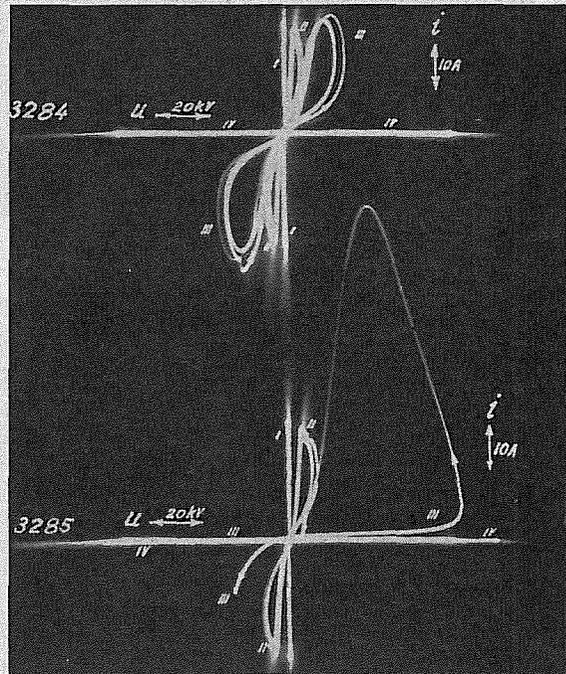
a



b



c



d

Fig. 7  
Spannung  $u$  und Strom  $i$  des Lichtbogens in ruhender Luft  
VG 3:  $U_0 = 31$  kV,  $U_w = 46$  kV,  $I_0 = 19$  A,  $C = 1 \mu\text{F}$   
Aufnahme-Arten: a  $\alpha\alpha$ , b  $\beta\beta$ , c  $\gamma\gamma$ , d  $\delta\delta$   
Weitere Legenden siehe im Text

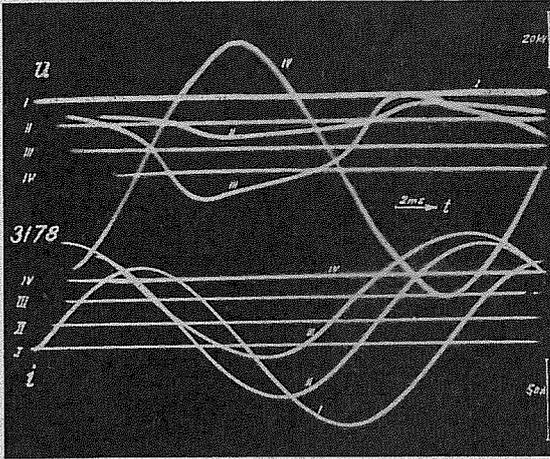
nungskurven zeigen, wie die Versteifung des Lichtbogenwiderstandes nach den Nulldurchgängen von Halperiode zu Halperiode zunimmt, wie aber der Widerstand durch die gleichzeitige Erhöhung der

der Lichtbogenspannung, die aus der konstanten Spannung sich zuerst in eine abgerundete Trapezform umwandelt und dann, bei immer höher und ausgeprägter werdenden Anfangspitzen, in eine ab-

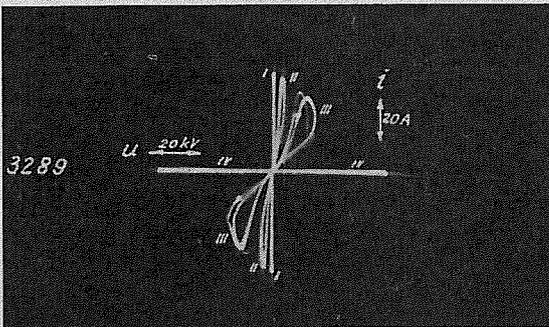
wechselnde Folge von unvollkommenen Löschnungen und plötzlichen Durchschlägen übergeht.

Fig. 8

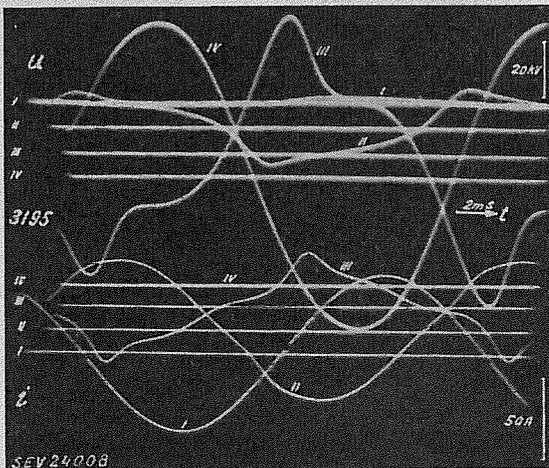
Der Vergleich der Versuche VG 4 und VG 5 lässt ebenfalls die Wirkung der Parallelkapazität in bezug auf Strompause, Strom- und Spannungskurven-



a



b



c

Fig. 8

Spannung  $u$  und Strom  $i$  des Lichtbogens in ruhender Luft  
a und b:

VG 4:  $U_0 \approx U_w = 31 \text{ kV}$ ,  $I_0 = 35 \text{ A}$ ,  $C = 0,004 \mu\text{F}$

c:

VG 5:  $U_0 = 31 \text{ kV}$ ,  $U_w = 38 \text{ kV}$ ,  $I_0 = 35 \text{ A}$ ,  $C = 1 \mu\text{F}$

Aufnahme-Arten: a und c  $\beta\beta$ , b  $\delta\delta$

Weitere Legenden siehe im Text

deformation deutlich ersehen. Die Vorgänge bei 35 A sind somit sehr ähnlich denjenigen bei 19 A.

Fig. 9, VG 6 und VG 7

Die Strompausen sind bei  $1 \mu\text{F}$  Parallelkapazität im Oszillogramm Art  $\alpha\alpha$  immer noch sichtbar. Jedoch spielt diese Kapazität hinsichtlich der Überspannungen keine wesentliche Rolle mehr; dies ist auch verständlich, weil der Kapazitätsstrom gegenüber dem starken Lichtbogenstrom verschwindet.

Die hier nicht wiedergegebenen Oszillogramme der VG 8 sind denjenigen der VG 6 sehr ähnlich; die Lichtbogenlänge erreicht in VG 8  $3,5 \dots 4 \text{ m}$ , und die Lichtbogenstärkung beträgt etwa  $30 \text{ V/cm}$  (Scheitelwert).

Ein interessantes Resultat ergibt sich aus der weiteren Auswertung einiger Oszillogramme Art  $\beta\beta$ :

Bildet man z. B. das Produkt der Momentanwerte der Spannung mit denjenigen des Stromes, so bekommt man die Kurve der in den Lichtbogen eingeführten Leistung  $P_e$ :

$$P_e = u i$$

Diese Kurve ist immer positiv und tangiert die Nulllinie. Ihre Grundfrequenz ist die zweifache Netzfrequenz (Fig. 10 und 11).

Bildet man andererseits den Quotienten aus Strom und gleichzeitiger Spannung, so erhält man die Kurve der Leitfähigkeit  $G$  des Lichtbogens

$$G = \frac{1}{R} = \frac{i}{u}$$

Die Leitfähigkeitskurve  $G$  ist immer positiv und  $> 0$ ; sie sinkt erst nach dem Löschen auf null. Ihre Grundfrequenz ist ebenfalls die doppelte Netzfrequenz, aber die Leitfähigkeitskurve  $G$  ist gegenüber derjenigen der Leistung  $P_e$  verspätet. Dies kann z. B. durch die Temperatur erklärt werden, sofern die Leitfähigkeit  $G$  eine positive Funktion der Temperatur ist. Die Verspätung zwischen der Leitfähigkeitskurve (d. h. auch der Temperaturkurve) und der eingeführten Leistungskurve ist dann durch die in der Lichtbogen-Gassäule aufgespeicherte Energie bedingt.

Nennt man  $P_a$  die totale vom Lichtbogen durch Konvektion und Strahlung abgeführte Leistung, so gilt folgendes:

1. Ist die eingeführte Leistung  $P_e$  grösser als die abgeführte  $P_a$ , so wird die Differenz in Form von Wärme und Ionisation aufgespeichert; dadurch steigt die Temperatur und gleichzeitig die Leitfähigkeit. Umgekehrt, wenn  $P_e$  kleiner ist als  $P_a$ , kühlt sich der Lichtbogen ab und die Leitfähigkeit sinkt. Da beim Maximum und beim Minimum die Leitfähigkeit kurzzeitig weder steigt noch sinkt, so ist in diesem Moment  $P_e = P_a$ . Somit sind die Schnittpunkte der beiden Leistungskurven bekannt.

2. Sofern angenommen wird, dass sowohl Leitfähigkeit  $G$ , als auch abgeführte Leistung  $P_a$  mit der Temperatur eindeutig steigen und fallen, so müssen sowohl ihre Maxima, als auch ihre Minima gleichzeitig auftreten.

3. Da der 100-Hz-Verlauf des Lichtbogens (Unstetigkeiten ausgenommen) von einem Zyklus zum nächsten im allgemeinen relativ wenig ändert und im stationären Lichtbogenzustand die zeitlichen Mittelwerte der beiden Leistungskurven gleich sind (Energie-Gleichgewicht), so müssen die positiven und die negativen Flächen  $\Delta W$  zwischen den beiden Kurven  $P_e$  und  $P_a$  annähernd gleich gross sein.

4. Ferner geben zu jeder Zeit die Ordinatendifferenz zwischen den Kurven  $P_s$  und  $P_a$  bei Annahme einer gleich bleibenden Temperaturverteilung im Lichtbogenquerschnitt ein Mass für die Neigung der Temperaturkurve, und somit auch, jedoch kein lineares, für diejenige der Leistungskurve  $P_a$ .

Anhand dieser Betrachtungen kann die Kurve der abgeführten Leistung  $P_a$  aus den Kurven der

abstand reduziert und mit  $P_{a1}$ ,  $P_{a1}$  und  $G_1$  bezeichnet.

Aus mehreren solchen Auswertungen stellt man nun fest, dass kein eindeutiger Zusammenhang zwischen abgeführter Leistung  $P_{a1}$  und Leitfähigkeit  $G_1$  besteht; einer Leitfähigkeit von  $0,5 \text{ cm}/\Omega$  ent-

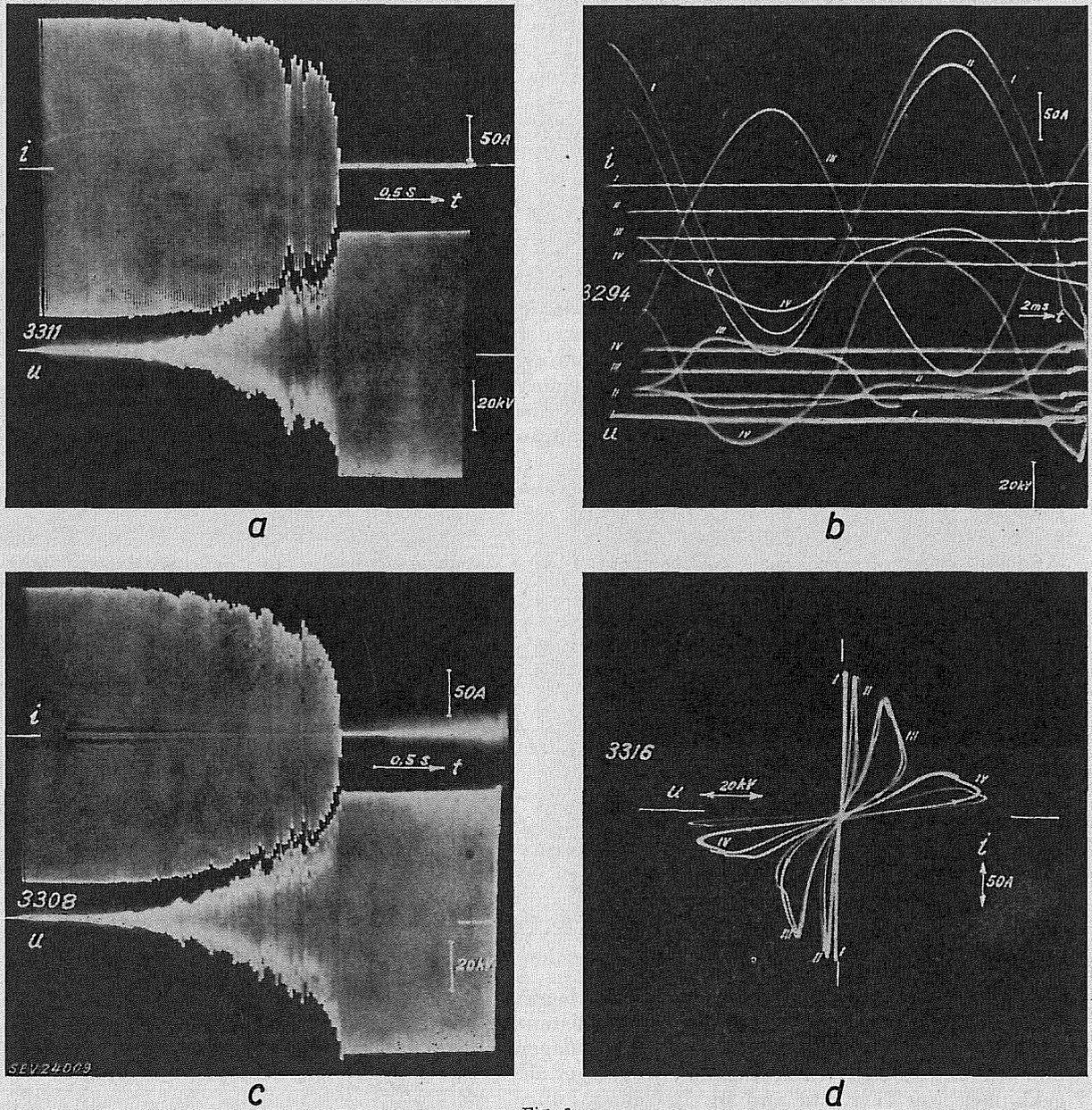


Fig. 9

Spannung  $u$  und Strom  $i$  des Lichtbogens in ruhender Luft

a und b:

VG 6:  $U_0 \approx U_w = 31 \text{ kV}$ ,  $I_0 = 116 \text{ A}$ ,  $C = 0,004 \mu\text{F}$

c und d:

VG 7:  $U_0 = 31 \text{ kV}$ ,  $U_w = 34 \text{ kV}$ ,  $I_0 = 116 \text{ A}$ ,  $C = 1 \mu\text{F}$

Aufnahme-Arten: a und c  $\alpha\alpha$ , b  $\beta\beta$ , d  $\delta\delta$

Weitere Angaben siehe im Text

eingeführten Leistung  $P_s$  und der Leitfähigkeit  $G$  näherungsweise konstruiert werden. Einige Oszillogramme wurden so ausgewertet (Fig. 10 und 11). Um einen Vergleich zu ermöglichen, wurden Leistungen und Leitfähigkeit auf je 1 cm Elektroden-

sprechen z. B. die Werte der abgeführten Leistung  $P_{a1}$  von  $0,2 \text{ kW/cm}$  (bei kleinen Abständen) bis  $2 \text{ kW/cm}$  (bei grossen Abständen). Dieses Resultat lässt vermuten, dass der Lichtbogen verschiedene Zustände aufweisen kann, wie z. B. dünnen Kanal

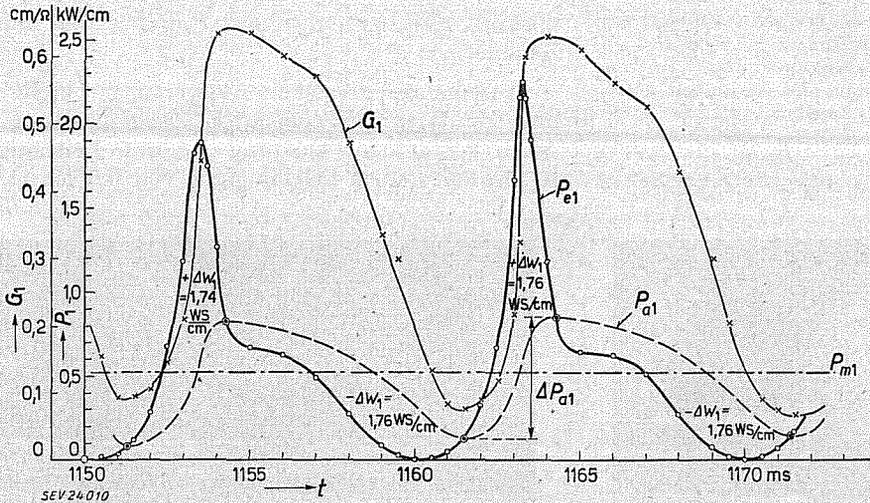


Fig. 10  
Zeitlicher Verlauf der Leistungen und der Leitfähigkeit des Lichtbogens in ruhender Luft  
VG 3:  $U_0 = 31$  kV,  $U_w = 46$  kV  
 $I_0 = 19$  A,  $C = 1 \mu\text{F}$   
Lichtbogenlänge 346 cm,  
Osz. Nr. 3204  
(Fig. 7b, Kurve III)  
 $P_{e1}$  eingeführte Leistung pro cm Lichtbogenlänge  
 $P_{a1}$  abgeführte Leistung pro cm Lichtbogenlänge  
 $P_{m1}$  mittlere Leistung  
 $G_1$  Leitfähigkeit des Lichtbogens pro 1 cm  
 $\Delta W_1$  Änderung der in 1 cm Lichtbogen aufgespeicherten Energie, welche die abgeführte Leistung um  $\Delta P_{a1}$  ändern lässt (Fläche zwischen  $P_{e1}$  und  $P_{a1}$ )

mit hoher Kern-Temperatur und starker Stossionisation, wobei die Leitfähigkeit hauptsächlich durch eine grosse Zahl freier Elektronen bedingt ist, oder dicken Kanal mit relativ tiefer Kern-Temperatur, wobei der Strom vorwiegend durch die Bewegung geladener Moleküle (Ionen) gebildet wird. Die Abkühlung durch Konvektion drängt den Lichtbogen dauernd vom ersten Zustand in den zweiten, bis er, sobald die Feldstärke zu erneuter Stossionisation ausreicht, in den ersten Zustand zurückspringt. Zum Beweis dieser Anschauung wurde ein zusätzlicher Versuch gemacht, wobei einem Licht-

Verhältnis einer Amplitude ( $-a_2$ ) zur vorhergehenden ( $+a_1$ ) ist bekanntlich in einem Schwingkreis gegeben durch:

$$\frac{-a_2}{a_1} = e^{-\frac{\pi}{\sqrt{4Q^2-1}}}, \text{ wo } Q = \frac{\sqrt{L_s}}{R} \text{ und } e = 2,718...$$

$C_s$  ist hier bekannt ( $1 \mu\text{F}$ ),  $L_s$  lässt sich aus der Eigenfrequenz des Stosskreises ( $13,5 \text{ kHz}$ ) bestimmen, somit kann  $R$  leicht errechnet werden.

Aus den Leistungskurven  $P_{e1}$  und  $P_{a1}$  lässt sich auch die Zeitkonstante der Lichtbogenströmigkeit fest-

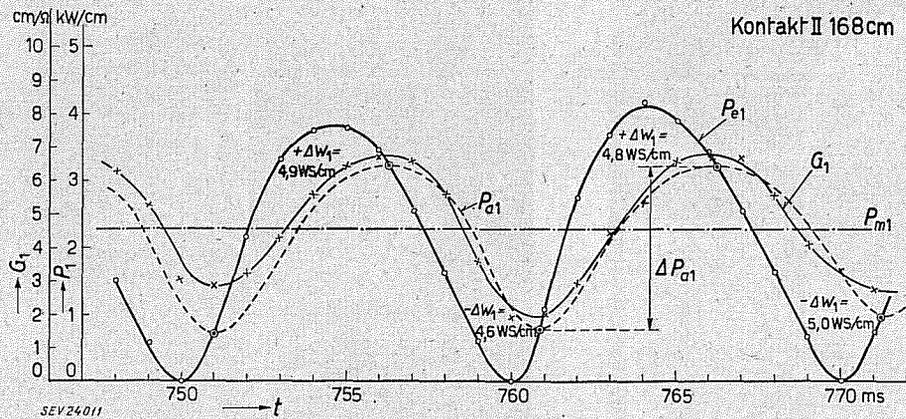


Fig. 11  
Zeitlicher Verlauf der Leistungen und der Leitfähigkeit des Lichtbogens in ruhender Luft  
VG 6:  $U_0 \approx U_w = 31$  kV,  
 $I_0 = 116$  A,  $C = 0,004 \mu\text{F}$   
Lichtbogenlänge 168 cm  
Osz. Nr. 3294  
(Fig. 9b, Kurve II)  
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 10

bogen von 10...20 A ein 150-kV-Stoss überlagert wurde (Fig. 12). Bei kurzer Elektrodendistanz (30 cm) wurde der Lichtbogen sofort durchschlagen und erlosch, sobald der schwingende Stoßstrom abgeklungen war (Fig. 13a und b). Bei einer Länge von 3 m hielt der Lichtbogen dagegen die volle Stoßspannung während 20...40  $\mu\text{s}$  aus. Erst nach dieser Zeit brach sein Widerstand sehr rasch von 9...17  $\Omega/\text{cm}$  auf etwa  $1/100 \Omega/\text{cm}$  zusammen (Fig. 13c und d). Die Feldstärke, die im Lichtbogen vor dem Stoss rund 100 V/cm betrug, erreichte während des Stosses (vor dem Durchschlag) 500 V/cm und sank dann während des Fließens des 6000-A-Stossstromes auf 60 V/cm. Da die gemessene Spannung während der Stossentladung den überwiegend induktiven Spannungsabfall darstellt, wurde der oben genannte Lichtbogenwiderstand durch die Dämpfung des schwingenden Stoßstromes bestimmt. Das

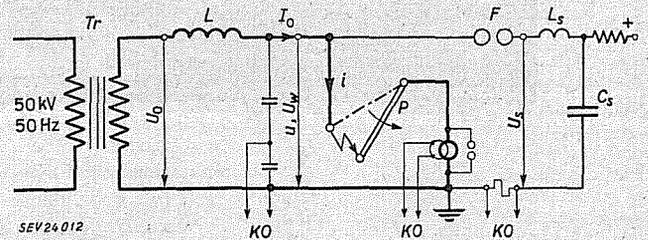
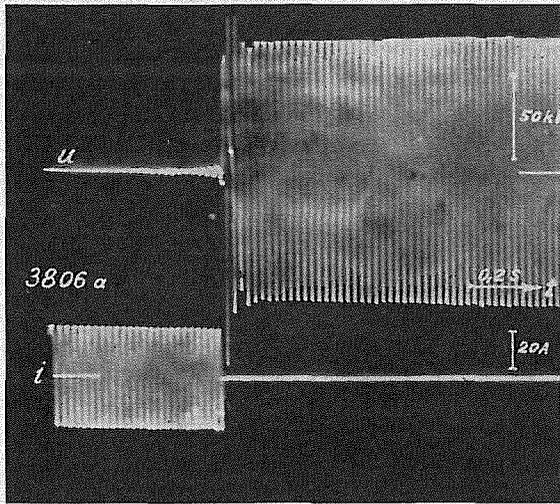


Fig. 12  
Wechselstrom-Lichtbogen mit Stoss überlagert  
Schema der Anordnung

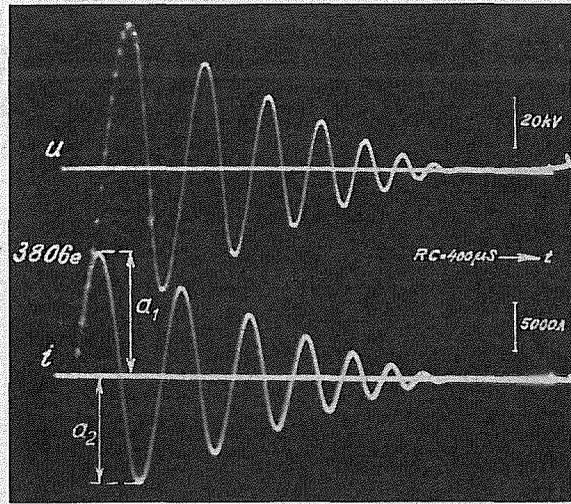
$Tr$  Transformator;  $P$  Pendel;  $F$  Funkenstrecke;  $L$  Drosselspule (5,2  $\mu\text{H}$ );  $C_s$  Stosskondensator (1  $\mu\text{F}$ );  $L_s$  Induktivität des ganzen Stosskreises (145  $\mu\text{H}$ );  $KO$  Kathodenstrahloszillograph;  $u$  gemessene Spannung (am Lichtbogen);  $U_0$  Leerlaufspannung (31 kV);  $U_w$  wiederkehrende Spannung bei offenem Pendel und gezündeter Funkenstrecke  $F$  (46 kV);  $U_s$  Ladespannung des Stosskondensators (150 kV);  $i$  Lichtbogenstrom;  $I_0$  Wechselstrom bei geschlossenem Pendel (19 A)

stellen: Ist  $\Delta W_1$  die aufgespeicherte Energie, d. h. die Fläche zwischen den beiden Leistungskurven,

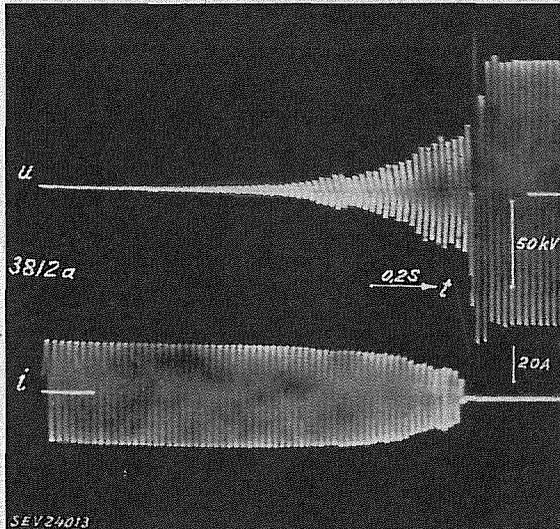
zuerst fest geerdeten Kranken Phase ein Lichtbogen-Erdschluss. Je nach den Versuchsreihen betrug die



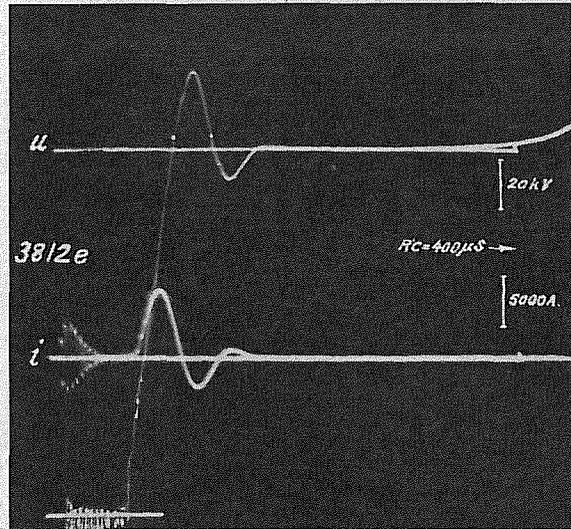
a



b



c



d

Fig. 13

**Wechselstrom-Lichtbogen mit Stoß überlagert**

Angaben siehe Fig. 12

- a, b Stoß auf Lichtbogen von 30 cm Länge
- a, c 50-Hz-Spannung  $u$  und 50-Hz-Strom  $i$  (Aufnahme-Art  $\alpha\alpha$ )
- c, d Stoß auf Lichtbogen von 300 cm Länge
- b, d Stoßspannung  $u$  und Stoßstrom  $i$  (Aufnahme-Art  $\epsilon\epsilon$ )

und  $\Delta P_{a1}$  die durch diese Energie verursachte Änderung der abgeführten Leistung  $P_{a1}$ , so wäre die Abfuhrdauer  $T$  der ganzen im Lichtbogen enthaltenen thermischen Energie (bei plötzlichem Aufhören der Leistung  $P_{a1}$  und unter konstant gedachter  $P_{a1}$ ):

$$T = \frac{\Delta W_1}{\Delta P_{a1}} = 1 \dots 7 \text{ ms}$$

**b) Lichtbogerndschluss am Modell-Netz**

Wie Fig. 14 zeigt, bestand das Modell-Netz aus zwei Kondensatoren, welche die Kapazität der kranken Phase und der gesunden Phasen darstellten und die von einem isolierten Einphasen-Transformator mit 33 kV verketteter Spannung gespeist wurden. Durch Öffnen des Pendels entstand an der

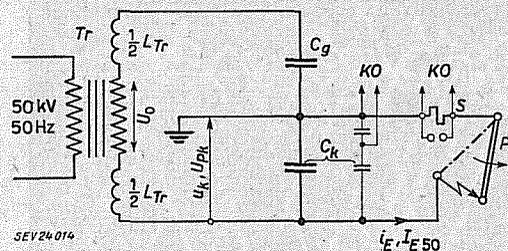


Fig. 14

**Erdschluss am Modell-Netz**

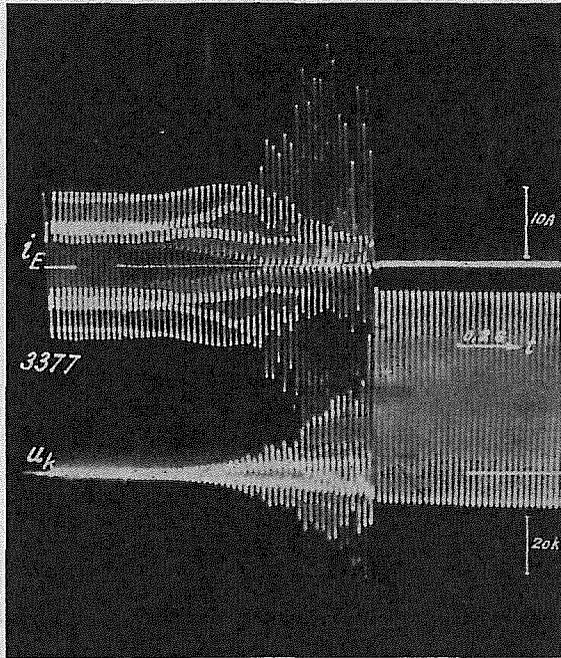
Schema der Anordnung

$Tr$  Transformator;  $P$  Erdschlußstelle (Pendel);  $C_g, C_k$  Kapazität der gesunden bzw. der kranken Phase;  $L_{Tr}$  Streuinduktivität des Transformators;  $S$  Shunt mit Überspannungsschutz;  $KO$  Oszillographen;  $U_0$  Leerlaufspannung am Transformator;  $u_k, U_{Pk}$  momentane bzw. 50-Hz-Polspannung an der kranken Phase;  $i_E, I_{E50}$  momentaner bzw. (bei geschlossenem Pendel) 50-Hz-Erdschlußstrom

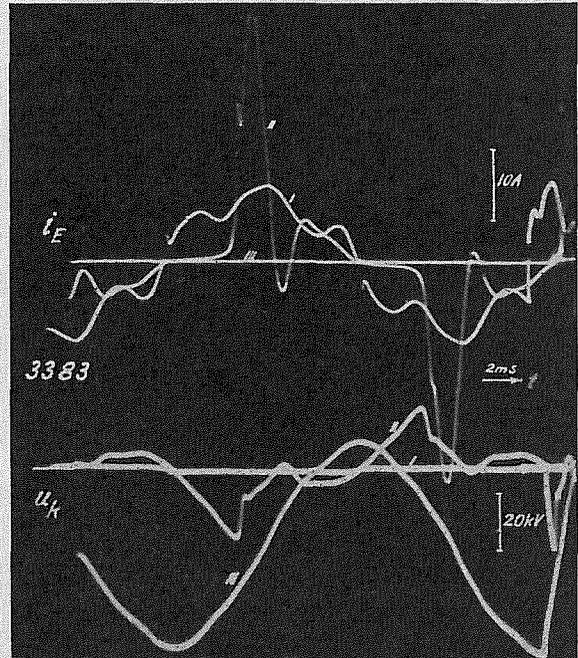
Kapazität der kranken Phase  $C_k = 0,5$  bzw.  $0,25 \mu\text{F}$  und diejenige der gesunden Phase  $C_g = 0,5$  bzw.  $0,75 \mu\text{F}$ . Dadurch erreichte die Spannung der kranken Phase  $16,5 \text{ kV}$  bzw.  $25 \text{ kV}$  und der Erdschlussstrom  $5$  bzw.  $7 \text{ A}$ .

Die Resultate sind in der Fig. 15 ersichtlich: Oszillogramm Art  $\alpha\alpha$  gibt den ganzen Vorgang an.

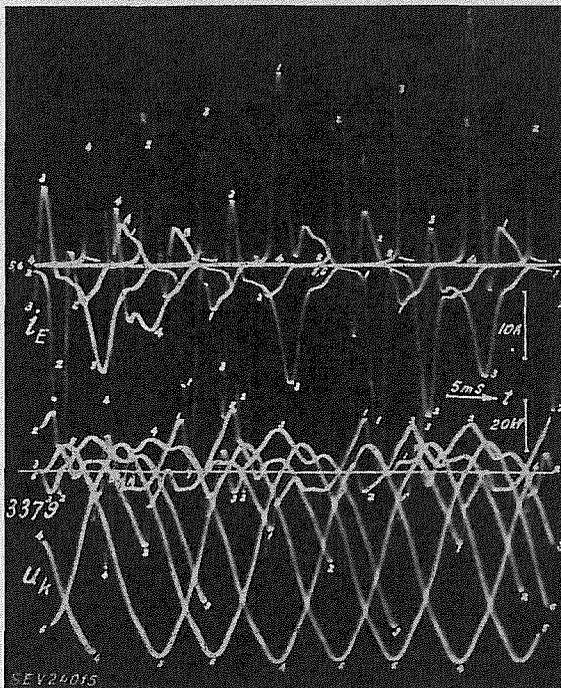
Im Oszillogramm Art  $\beta\beta$  sind wieder die Strompausen zu Beginn des Lichtbogens bei  $18 \text{ cm}$  Abstand (Kurve I) sichtbar. Ferner kommt in der Kurve II der flache Stromanstieg nach dem Nulldurchgang, gefolgt von der raschen Stromzunahme kurz vor dem Spannungszusammenbruch deutlich zum Ausdruck.



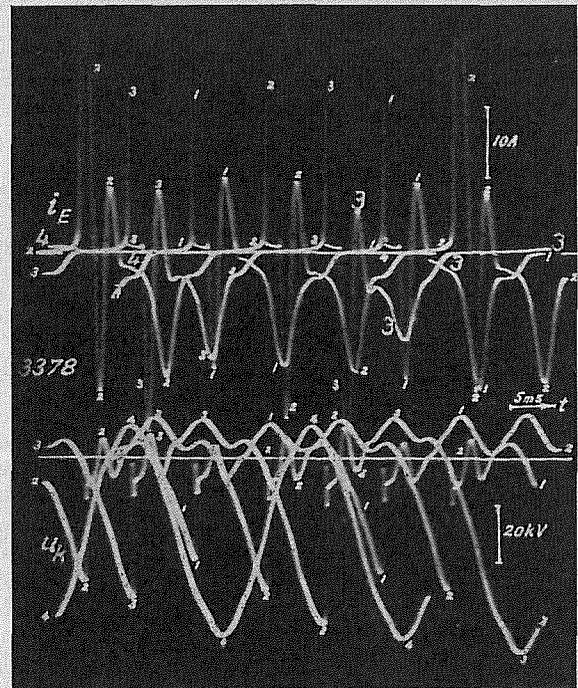
a



b



c



d

Fig. 15

Erdschluss am Modell-Netz mit Lichtbogen in Luft

$i_E$  Erdschlussstrom;  $u_k$  Spannung an der kranken Phase  
Netz-Daten:

$C_g = 0,75 \mu\text{F}$ ,  $C_k = 0,25 \mu\text{F}$ ,  $L_{Tr} = 0,26 \text{ H}$ ,  
 $U_0 = 33 \text{ kV}$ ,  $U_{Pk} = 25 \text{ kV}$ ,  $I_{B50} = 7 \text{ A}$

a Aufnahme-Art  $\alpha\alpha$ , b Art  $\beta\beta$  (Kurven I  $18 \text{ cm}$ , II  $168 \text{ cm}$ , III  $348 \text{ cm}$ )

c und d Art  $\gamma\gamma$  (1...6 Reihenfolge der Strahldurchläufe)  
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 14

Das Ende des Vorganges ist im Oszillogramm Art  $\gamma\gamma$  wegen der vielen Strahldurchläufe nicht mehr übersichtlich. Deshalb wurde das Oszillogramm Nr. 3379 in Fig. 16 umgezeichnet. (Die ersten Stromspitzen der vier letzten Spannungszusammenbrüche sind wegen des Ansprechens einer Schutzfunkenstrecke am Messkabel abgeschnitten).

(in der negativen Halbwelle) höher liegen. Da aber nach dem Löschen keine Ladung mehr aus dem isolierten Netz hinausfließen kann, bleibt das ganze System auf diese konstante Spannung aufgeladen. Unter Berücksichtigung der Lichtbogenspannung wird die Asymmetrie etwas kleiner als 100% der Phasenspannung. Sofern die Ausgleichschwingung

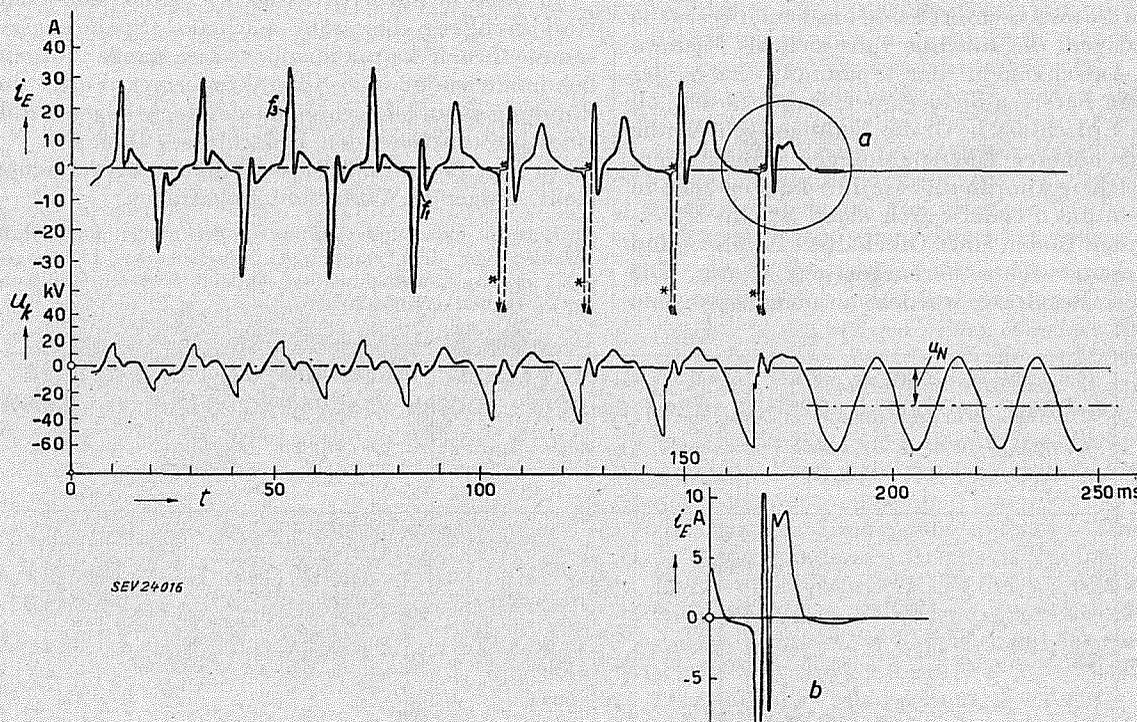


Fig. 16  
Erdschluss am Modell-Netz mit Lichtbogen in Luft  
Umzeichnung des Oszillogrammes von Fig. 15 c

$i_E$  Erdschlußstrom;  $u_k$  Spannung an der kranken Phase;  
 $u_N$  Gleichspannung von der Restladung des Netzes herrührend  
 $f_1$  und  $f_2$  Eigenfrequenzen

\*-\* Niederspannungsschutz der Strommessung angesprochen  
b Detail aus a mit vergrößerten Ordinaten

Aus diesem und anderen Oszillogrammen stellt man fest, dass der Strom in keinem der untersuchten Fälle beim ersten Stromnulldurchgang gelöscht hat. Ein solches Resultat ist ohne weiteres zu erwarten, weil die Trägheitszeitkonstante des Lichtbogens gleich oder grösser ist als die Halbperiodendauer der Schwingung  $f_2$ . Bemerkenswert ist auch die Spannungsasymmetrie, die am Ende des Erdschlusses auftritt. Sie kann ebensogut positiv wie negativ sein. Ihre Entstehung kann folgendermassen erklärt werden: Der Lichtbogen löscht normalerweise nur, wenn der kapazitive Erdschlußstrom durch null geht. Für den stationären Erdschlußstrom trifft dies zu, wenn die Summenspannung der gesunden Phasen, oder (da die Summe der Phasenspannungen = 0), wenn die Spannung der kranken Phase ein Maximum oder ein Minimum durchläuft.

$$I_{E50} = 0 \text{ wenn } \frac{du_{Pk}}{dt} = 0$$

Da nun kurz vor dem Löschen (falls die Lichtbogenspannung vernachlässigt wird), das Potential der kranken Phase null ist, so muss in diesem Moment jenes des Stern- oder Mittelpunktes des Netzes um den Scheitelwert der Phasenspannung  $u_P$  tiefer oder

$f_1$  beim Löschen noch nicht abgeklungen ist, kann die Asymmetrie grösser oder kleiner sein als 100%, je nachdem, ob die Schwingung  $f_1$  sich der Phasenspannung im Moment des Löschens addiert oder subtrahiert (Fig. 3, Löschemoment  $t_1$ ). In den meisten Fällen ist die höchste auftretende Spannung durch diese Asymmetrie bedingt.

Fig. 16 zeigt auch, dass der Vorgang zuerst symmetrisch ist und erst gegen Ende asymmetrisch wird. Die Bedingung für die Entstehung der Asymmetrie verlangt, dass der Ausgleichstrom der Schwingung  $f_1$  erst nach dem Nulldurchgang des 50-Hz-Erdschlußstromes abgeklungen ist, denn der Lichtbogen brennt dann während der ganzen nächsten Halbperiode weiter. Tritt hingegen der Zusammenbruch der Spannung bei kleinen Werten auf, d. h. so früh, dass der Ausgleichstrom vor dem 50-Hz-Stromnulldurchgang beendet ist, dann findet die Versteifung des Lichtbogenwiderstandes in jeder Halbperiode statt.

In sehr anschaulicher Weise zeigt Fig. 16 das Weiterbestehen der Leitfähigkeit der Lichtbogenstrecke in der ersten Periode der wiederkehrenden Spannung: Ein kleiner Nachstrom von etwa 0,5 A steigt mit der Spannung und zwar nach ihrem

Scheitelwert noch weiter an und verschwindet erst, wenn die Spannung auf  $\frac{1}{4}$  des Scheitelwertes gesunken ist (Fig. 15d, Oszillogramm 3378, Stromkurve, Ende des dritten und Anfang des vierten Strahldurchlaufes).

2. Erdschlusslichtbogen in Öl

Da, wie die im Abschnitt 1 beschriebenen Versuche deutlich zeigen, die ruhende Luft sich als Medium für das Aufschaukeln der Spannung nach der Theorie von Petersen nicht eignet, fragte es sich, ob bei einem Erdschluss in Öl die Bedingungen für die Erzeugung höherer Überspannungen erfüllt seien. In der gleichen Anordnung wie für die Versuche in Luft wurde das Pendel durch einen Schaltstift ersetzt, der den Boden eines Ölbehälters berührte und durch Gegengewichte herausgezogen wurde. Die wichtigsten Resultate wurden an den Versuchen

mit Modell-Netz erzielt, bei welchen die Spannung der kranken Phase  $U_{Pk}$  31 kV, 24 kV bzw. 6,6 kV und der 50-Hz-Erdschlußstrom  $I_{E50}$  9,2 A, 7,2 A bzw. 1,9 A betragen.

Wie erwartet, zeigen die Resultate, dass der Spannungszusammenbruch bei ausreichender Feldstärke zwischen den Elektroden bedeutend härter ist in Öl als in Luft. Ferner ist der Strom nach jedem Nulldurchgang bis zum nächsten Spannungszusammenbruch kaum messbar. Der ganze Vorgang bekommt somit den Charakter einer Folge von Zündungen und Löschungen des Lichtbogens, d. h. eines intermittierenden Erdschlusses (Fig. 18).

In Fig. 17 sind alle Messergebnisse zusammengestellt. Folgende Werte sind eingetragen:

1. Je die erste Zündspannung der drei letzten 50-Hz-Halbperioden vor dem endgültigen Löschen des Lichtbogens ( $u_{Zx}$ ,  $u_{Zy}$ ,  $u_{Zz}$ ), ausnahmsweise anderer früherer Halbperioden, z. B. der sechstletzten ( $u_{Zu}$ ).

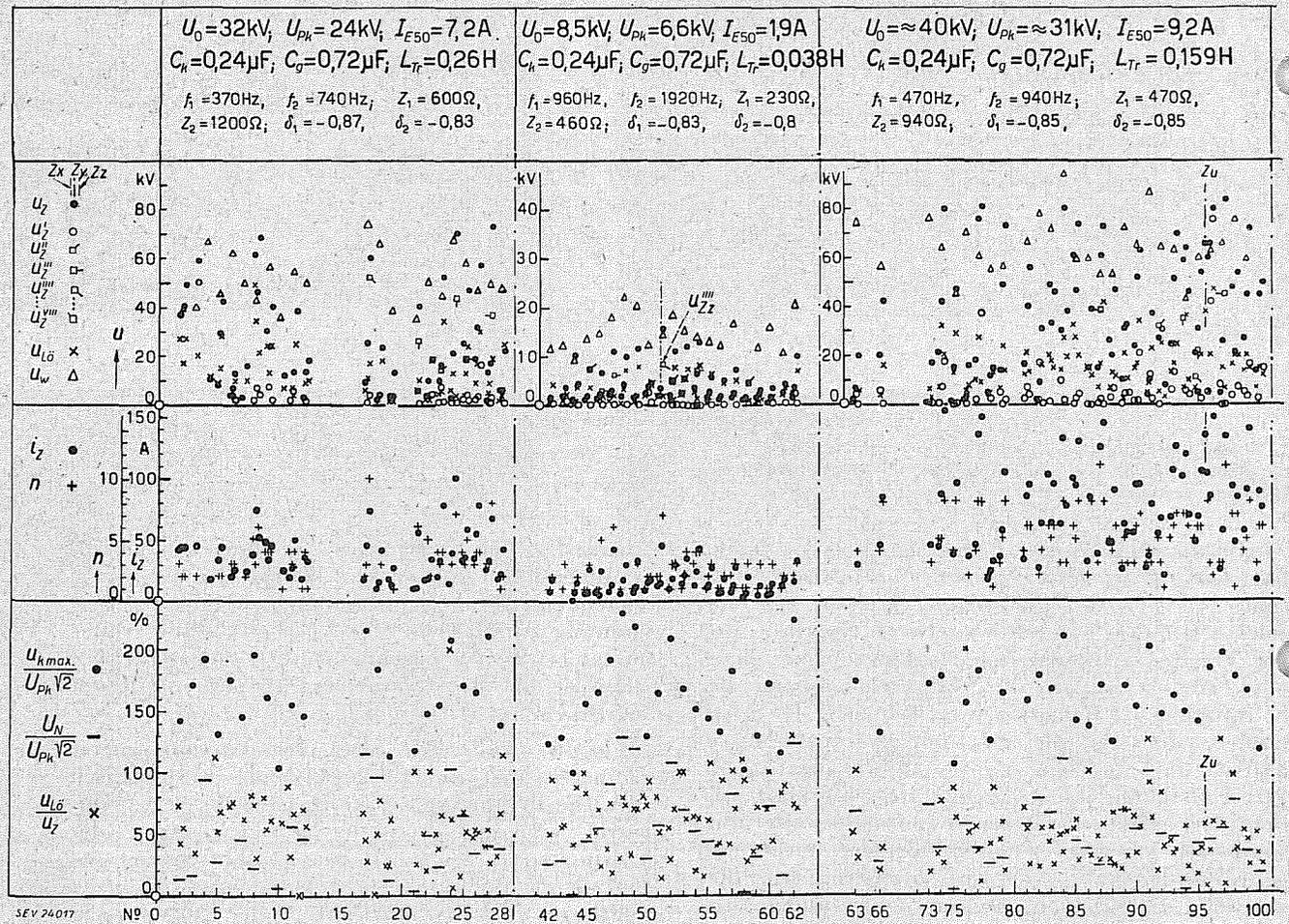


Fig. 17  
Erdschluss mit Lichtbogen in Öl  
Zusammenstellung der Resultate

$Zu...Zx, Zy, Zz$  (Indizes) Zündungen des Lichtbogens in der sechstletzten...drittletzten, zweitletzten bzw. letzten 50-Hz-Halbperiode vor dem endgültigen Löschen. (Die Werte von  $Zx$  bzw.  $Zz$  sind links bzw. rechts von der Versuchs-Nr.-Ordinate eingetragen.)

$u_z$  Erste Zündspannung der 50-Hz-Halbperiode;  $u_z', u_z'', u_z''', \dots, u_z^{VIII}$  Zündspannung nach dem ersten, zweiten, dritten... achten Strom-Nulldurchgang mit Frequenz  $f_1$  (z. B.: Versuch Nr. 51  $u_{Zz}''''$ );  $u_{Lo}$  Löschespannung, d. h. Spannungsspitze (mit Frequenz  $f_2$ ), die die Zündstrecke nach dem letzten Stromnulldurchgang mit Frequenz  $f_1$  aushält;  $u_w$  wiederkehrende Spannung, d. h. höchste momentane Spannung an der kranken Phase nach endgültigem Löschen des Lichtbogens;  $i_z, n$  die erste Stromamplitude bzw. die Anzahl Eigenhalbperioden der Ausgleichsschwingung  $f_1$ ;  $u_{kmax}$  höchste aufgetretene Spannung an der kranken Phase;  $U_N$  bleibende Gleichspannung;  $U_{Pk}/\sqrt{2}$  Scheitelwert der 50-Hz-Spannung der kranken Phase

Angaben des Modell-Netzes siehe in den Fig. 14 und Fig. 2

2. Die Zündspannung nach dem ersten (ausnahmsweise nach dem 2. bis 8.) Stromnulldurchgang mit Frequenz  $f_1$  ( $u_{zx}', u_{zy}', u_{z'z}'; u_{zx}'', u_{zy}''$ ...).
3. Die Löschespannung, d. h. die max. Spannung mit Frequenz  $f_2$ , welche die Elektroden ohne Rückzündung aushalten, bei den drei letzten 50-Hz-Halbperioden ( $u_{L\delta}$ ).
4. Der Maximalwert der wiederkehrenden Spannung ( $u_w$ ).
5. Die erste Stromamplitude der Ausgleichschwingung  $f_1$  und die Anzahl Eigen-Halbperioden dieser Schwingung ( $i_z, n$ ).
6. Die relative maximale Spannung der kranken Phase und die relative bleibende Gleichspannung, bezogen auf den Scheitelwert der Phasenspannung

$$(u_{kmax} : U_{Pk} \sqrt{2} \text{ und } U_N : U_{Pk} \sqrt{2}).$$

7. Das Verhältnis Löschespannung zu Zündspannung ( $u_{L\delta} : u_z$ ).

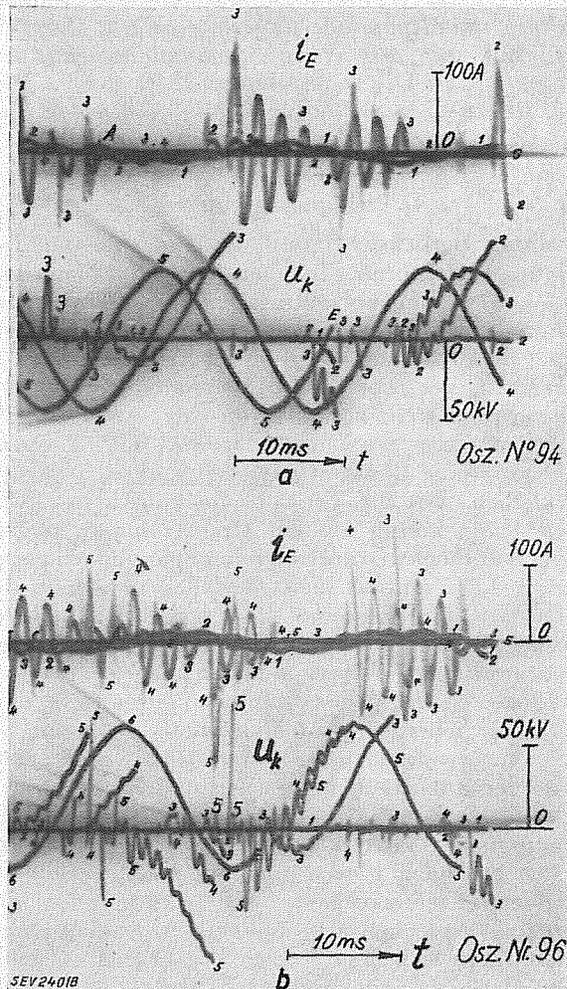


Fig. 18

Erdschluss am Modell-Netz mit Lichtbogen in Öl  
 Angaben des Netzes:  $U_0 = 40 \text{ kV}$ ,  $U_{Pk} = 30 \text{ kV}$ ,  $C_k = 0,24 \mu\text{F}$ ,  
 $C_0 = 0,72 \mu\text{F}$

a, b Zwei ausgewählte Oszillogrammbeispiele  
 $i_E$  Erdschlussstrom;  $u_k$  Spannung an der kranken Phase  
 Aufnahme-Art  $\gamma\gamma$  (A Anfang, E Ende des Oszillogrammes;  
 1...6 Reihenfolge der Strahldurchläufe)

Der Kopf der graphischen Darstellung enthält die Konstanten des Modell-Netzes.

Auf Grund dieser Resultate stellt man folgendes fest:

1. Fig. 17 zeigt vor allem die grosse Streuung der Messwerte. Für die letzte Zündspannung ( $u_{z'}$ ) findet man z. B.:

bei $U_{Pk} = 30 \text{ kV}$	$u_{z'}$ = 8 ...84 kV
bei $U_{Pk} = 24 \text{ kV}$	$u_{z'}$ = 13 ...73 kV
bei $U_{Pk} = 6,5 \text{ kV}$	$u_{z'}$ = 2,8...15,4 kV

Über die Unregelmässigkeit der Zündspannung in Öl gibt auch das Oszillogramm Nr. 94 (Fig. 18a) ein wertvolles Bild: Beim dritten Strahldurchlauf (3, links) ist zuerst die Lichtbogenspannung annähernd null; dann steigt die Spannung mit Frequenz  $f_2$  auf 35 kV, schwingt beinahe auf null zurück und bricht im Laufe des Wiederanstieges bei 11 kV zusammen, obschon die Ölstrecke kurz vorher die dreifache Spannung ausgehalten hat. Da nun die Zündungen keinem bestimmten Gesetz folgen, kann eine Reihe von regelmässigen Zündungen, wie die Aufschaukelungstheorie es verlangt, nur als Zufall auftreten; sie ist nur einer statistischen Berechnung zugänglich.

2. In bezug auf das Löschen beim ersten Stromnulldurchgang zeigen die Resultate deutlich, dass dieses Löschen in den meisten Fällen von einer Rückzündung schon bei tiefer Spannung gefolgt wird. Nur in 5% der Fälle, in welchen die erste Zündspannung gleich oder grösser ist als die Phasenspannung, erreicht die Zündstrecke nach dem ersten Stromnulldurchgang eine Festigkeit, die mindestens 74% der ersten Zündspannung zu Zündspannung (sofern Zündspannung  $\geq$  Phasenspannung) ist nur in 3% bzw. 12,5% (für  $U_{Pk} = 30 \text{ kV}$  bzw.  $6,5 \text{ kV}$ ) der Fälle höher als 0,74. In den wenigen Fällen, wo die Schwingung  $f_1$  eine einzige Halbperiode dauert, handelt es sich um sehr schwache Schwingungen bei einer Zündspannung von einigen kV, deren Energie sofort im Lichtbogen verbraucht wird. Dabei erreicht auch die Löschespannung ein Mehrfaches der Zündspannung. Trotzdem alle Bedingungen zur Aufschaukelung für sich, wenn auch sporadisch und zufällig, erfüllt werden, so hat keine einzige der 200 gemessenen Zündungen zur ersten Stufe der Aufschaukelung (einmalige Erfüllung der Bedingungen 1 und 2) der Theorie von Petersen geführt. Diese erste Stufe wäre beinahe im Oszillogramm Nr. 96, Fig. 18b (5. Durchlauf) erreicht worden, aber eine verfrühte Rückzündung hat sie wieder abgebaut.

3. Die höchsten gemessenen Spannungen der kranken Phasen  $u_{kmax}$  werden, abgesehen von einigen Ausnahmen, durch die letzte bleibende Gleichspannungskomponente des Gesamtnetzes  $U_N$  verursacht; dies sieht man an der Differenz zwischen den beiden relativen Spannungen  $u_{kmax}/U_{Pk} \sqrt{2}$  und  $U_N/U_{Pk} \sqrt{2}$ , die fast immer 1 ergibt.

### 3. Erdschluss durch rissige 45-kV-Isolatoren

Für diese Versuche, die einem üblichen Netz-Erdschluss wohl am nächsten entsprechen, wurde an dem unter Wechselspannung stehenden Modell-Netz der Erdschluss durch einen auf den positiven oder negativen Scheitelwert der betreffenden Phasenspannung synchronisierten Spannungsstoss von +310 kV eingeleitet. Dadurch entstand im unsichtbaren Porzellanriss des Isolators ein Lichtbogen, der das Porzellan zum Schmelzen brachte. Nach einigen Sekunden wurde der Erdschluss von Hand ausge-

schaltet. Jeder Isolator konnte einen oder mehrere Erdschlüsse ertragen, bis er, bei gesprungenem Kopf, die Wechselfspannung nicht mehr aushielt.

Das Modell bestand, wie bei den anderen Versuchen, aus dem speisenden Transformator, den beiden Phasenkapazitäten und zusätzlich aus einer 1 km langen Leitung, um die Absorption des Stosses durch die Phasenkapazität zu verhindern (Fig. 19). Die Versuche wurden bei einer Wechselfspannung der kranken Phase  $U_{Pk}$  von 15 kV, 22 kV und 30 kV mit Erdschlußströmen  $I_{E50}$  von 4,5 A, 6,5 A und 9,1 A durchgeführt. Weitere genaue Daten des Netzes sind im Kopf von Fig. 21 zu finden.

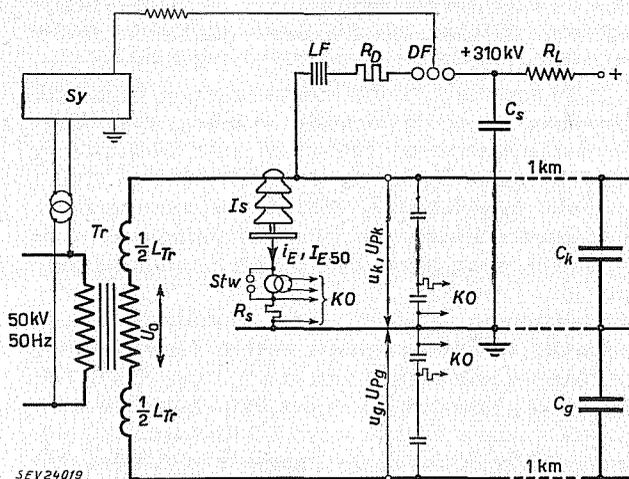


Fig. 19

Erdschluss durch rissige Isolatoren  
Schema der Anordnung

$C_k, C_g$  Kapazität der kranken bzw. der gesunden Phase;  $C_s$  Stoss-generator-Kondensator (0,13  $\mu$ F);  $DF$  Doppelfunkstrecke;  $I_s$  Rissiger Isolator;  $KO$  Oszillograph;  $LF$  Löschkapazität;  $L_{Tr}$  Transformatorstreuinduktivität;  $R_D, R_L$  Dämpfungs- bzw. Ladewiderstand des Stossgenerators;  $R_s$  Shunt zur Messung der grossen Stromstärken;  $Stw$  Stromwandler mit Schutz zur Messung der kleinen Stromstärken;  $Sy$  Synchronisierereinrichtung;  $Tr$  Transformator;  $u_g, u_k$  momentane Spannung an der gesunden bzw. der kranken Phase;  $U_{Pg}, U_{Pk}$  Polspannung (50 Hz) an der gesunden bzw. der kranken Phase;  $U_0$  Leerlaufspannung des Transformators;  $i_E, I_{E50}$  momentaner bzw. 50-Hz-Erdschlußstrom

Die Oszillogramme, wovon einige in Fig. 20 reproduziert sind, und die mit einmaliger oder wiederholter Zeitablenkung aufgenommen wurden, geben den Spannungsverlauf der kranken und der gesunden Phase, sowie den Stromverlauf mit zwei verschiedenen Maßstäben an. Die mit *a* bezeichneten Oszillogramme enthalten den Beginn des Erdschlusses, diejenigen mit *b* den Zustand nach ungefähr drei Sekunden.

In Fig. 21 sind die Auswertungen der während der Erdschlüsse aufgetretenen Spannungen (Höchstwerte, Zündspannungen usw.) und Ströme eingetragen. Die Resultate seien hier kurz kommentiert:

Bei  $U_{Pk} = 15$  kV löscht der Lichtbogen sofort nach dem Stoss, unabhängig von der Polarität (Oszillogramm Nr. 6657).

Bei  $U_{Pk} = 22$  kV führt jeder Stoss (ausgenommen diejenigen, bei denen der Isolator die Stoßspannung aushielt) zu einem Erdschluss, der nicht mehr selbst löscht. Zu Beginn des Erdschlusses inter-

mittiert der Lichtbogen. Im Oszillogramm Nr. 6665a sind kleine Strompausen bei jedem Nulldurchgang, auch bei Frequenz  $f_1$ , sowie die zugehörigen kleinen Spannungszündspitzen ersichtlich. Später geht dann der Lichtbogen allmählich in einen konstanten Widerstand über, aber auch nach drei Sekunden wird die Ausgleichschwingung  $f_1$  immer noch nach jedem Stromnulldurchgang leicht angeregt. Oszillogramm Nr. 6670 zeigt einen stark intermittierenden Erdschluss, der sich akustisch in einem pfeifenden Lichtbogen auswirkte.

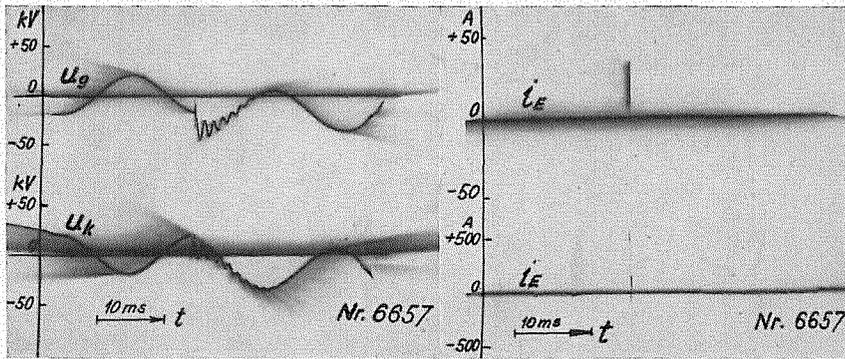
Bei  $U_{Pk} = 30$  kV ist wie bei 22 kV die Intermitenz vorhanden, jedoch hat sie nie zum Aufschaukeln der Spannung, auch nicht zur ersten Stufe geführt (Oszillogramm Nr. 6679). Dies steht auch im Einklang mit den Zündspannungen, welche zeigen, dass die Festigkeit nach dem ersten Stromnulldurchgang mit Frequenz  $f_1$  bei  $U_{Pk} = 30$  kV bzw. 22 kV nur 5...32 % bzw. 10...70 % des erforderlichen Wertes für das Aufschaukeln erreicht.

### G. Schlussfolgerungen

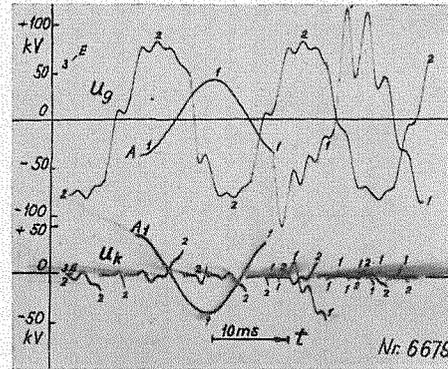
Unter Berücksichtigung der experimentell bestimmten Faktoren (Trägheit der Lichtbogenleitfähigkeit in Luft, Streuung der Durchschlagspannung in Öl, Abnahme der Festigkeit eines durchgeschlagenen Isolators, usw.) die im Erdschluss für das Erreichen der höchsten Überspannungen massgebend sind, stellt man fest, dass das Aufschaukeln der Spannung nach der Theorie von Petersen äusserst wenig Chancen hat, sich praktisch zu verwirklichen. Wie die Versuche im künstlichen Netz nach Umrechnung auf ein Drehstromnetz zeigen, bleiben die höchsten auftretenden Spannungen gegen Erde in den weitaus meisten Fällen unterhalb des zweifachen Scheitelwertes der verketteten Betriebsspannung in den gesunden Phasen und des 1,5fachen in der kranken Phase. Beim Einleiten des Erdschlusses ist in den gesunden Phasen mit dem 1,6fachen Scheitelwert der verketteten Spannung zu rechnen. Ausnahmsweise, wenn zufällig die erste Stufe der Aufschaukelung sich verwirklichen sollte, d. h. mit einigen  $\frac{0}{100}$  Wahrscheinlichkeit, können die Spannungen das 2,4fache der verketteten Spannung in den gesunden Phasen und das Zweifache in der kranken Phase erreichen. Somit sind einzelne sehr seltene Ansprechen von üblichen Überspannungsableitern in isolierten Netzen bei Erdschluss möglich. Das Zustandekommen höherer Spannungen verlangt das gleichzeitige Eintreffen von so vielen an sich schon sehr unwahrscheinlichen Vorgängen, dass höhere Überspannungen im Betrieb nicht zu erwarten sind.

Je grösser der Erdschlußstrom, desto träger wird auch die Lichtbogenleitfähigkeit; deshalb sind Erdschlussüberspannungen im allgemeinen in grossen Hochspannungsnetzen relativ kleiner als in Netzen mit mittleren Betriebsspannungen.

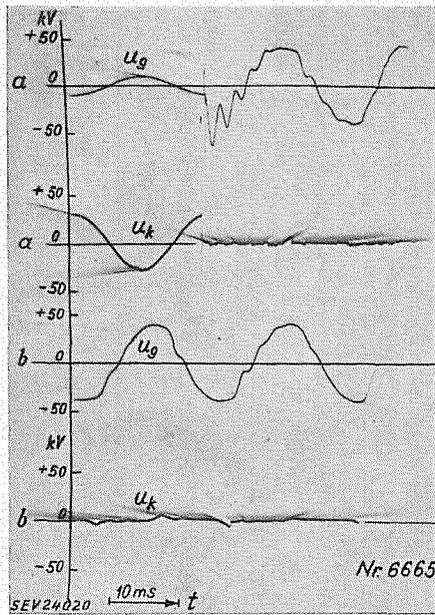
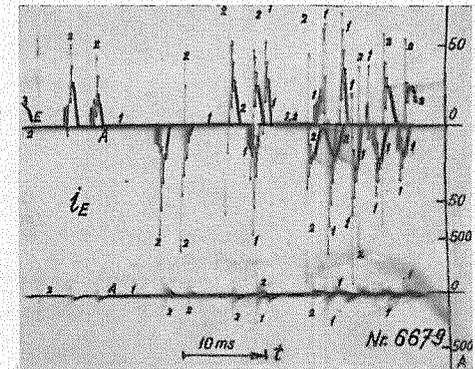
Diese Resultate stimmen mit jenen von Versuchen in Netzen überein, wobei höchste Spannungen gegen Erde vom zweifachen Scheitelwert der verketteten Betriebsspannung im 8-kV-Netz in Aathal und vom 1,8fachen im 50-kV-Netz in Mühleberg gemessen wurden.



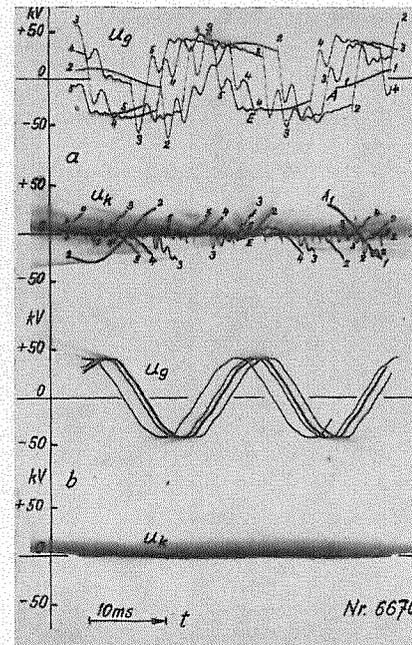
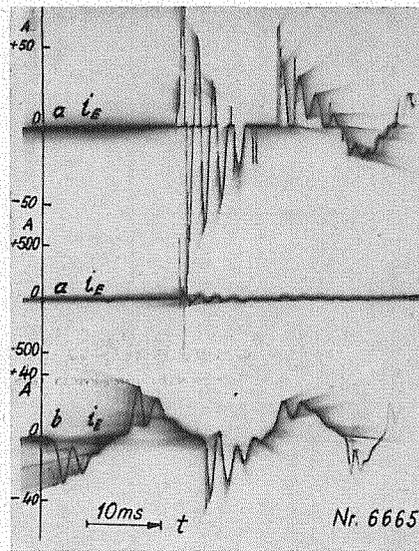
I



IV



II



III

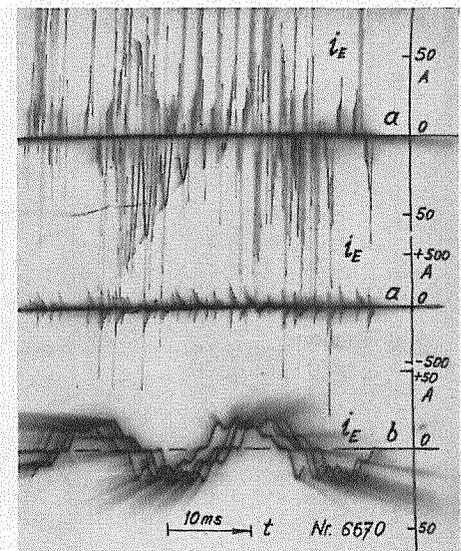


Fig. 20

Erdschluss durch rissige Isolatoren  
Oszillogramm-Beispiele

I Polspannung  $U_{pk} = 15$  kV,  $C_g = C_k = 0,48 \mu\text{F}$  (einmalige Zeitablenkung);  
II Polspannung  $U_{pk} = 22$  kV,  $C_g = 0,72 \mu\text{F}$ ,  $C_k = 0,24 \mu\text{F}$   
a Beginn des Erdschlusses, b nach etwa 3 s (einmalige Zeitablenkung);

III Wie Nr. II (wiederholte Zeitablenkung; A Anfang, E Ende des Oszillogrammes;  
1...5 Reihenfolge der Strahldurchläufe) pfeifender Lichtbogen;  
IV Polspannung  $U_{pk} = 30$  kV,  $C_g = C_k = 0,48 \mu\text{F}$  (wiederholte Zeitablenkung)

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 19

Eine andere Ursache für Überspannungen wäre die Trennung des Erdschlusszweiges vom übrigen Netz durch den Schalter. Diese Ausschaltung, die derjenigen einer langen, leeren Leitung ähnlich ist, könnte unter Umständen zu etwas höheren Werten führen, die aber als Schaltüberspannungen zu gelten haben.

Der Grund, warum oft Erdschlüsse in Doppelerdschlüsse übergehen, ist nicht in den hohen Überspannungen zu suchen, sondern im Zustand des Isoliermaterials des ganzen Netzes. Unter den ausserordentlich vielen Isolationsstellen werden sich stets einige latente schwache Stellen befinden,

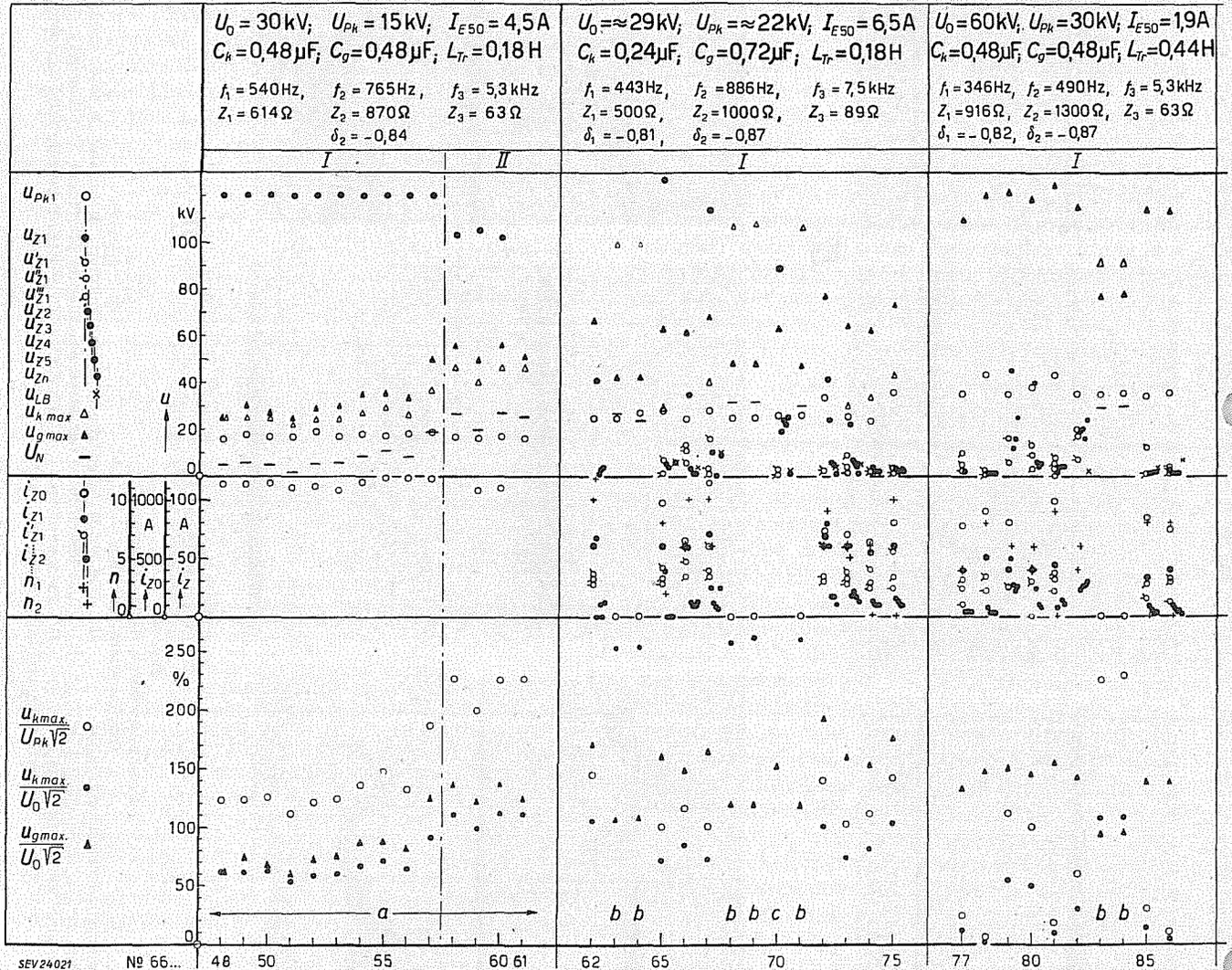


Fig. 21

Erdschluss durch rissige Isolatoren  
Zusammenstellung der Resultate

- I Positiver Stoss in der positiven 50-Hz-Halbperiode
- II Positiver Stoss in der negativen 50-Hz-Halbperiode

- $u_{pk1}$  Momentanwert der 50-Hz-Spannung an der kranken Phase im Moment des Stosses;
- $u_{z1}, u_{z2}, u_{z3}, \dots$  Zündspannung in der ersten (beim Stoss), zweiten, dritten... 50-Hz-Halbperiode;
- $u_{z1}', u_{z1}'', u_{z1}'''$  Zündspannung in der ersten 50-Hz-Halbperiode nach dem ersten, zweiten, dritten... Stromnull-durchgang bei Frequenz  $f_1$ ;
- $u_{zn}, u_{LB}$  Erste Zündspannung einer 50-Hz-Halbperiode, bzw. maximale Lichtbogenspannung, nach etwa 3 s Lichtbogendauer;
- $u_{kmax}, u_{gmax}$  höchste aufgetretene Spannung an der kranken bzw. an der gesunden Phase während oder nach dem Erdschluss (Stoss ausgenommen);
- $U_N$  Bleibende Gleichspannung;
- $i_{z0}$  Stoßstrom;
- $i_{z1}, i_{z2}, \dots$  erste Amplitude des Ausgleichstromes mit Frequenz  $f_1$  infolge der Zündungen bei  $u_{z1}, u_{z2}, \dots$ ;
- $i_{z1}', i_{z1}''$  Ausgleichstromamplituden nach den Zündungen bei  $u_{z1}', u_{z1}''$ ...
- $n_1, n_2$  Anzahl Halbperioden der Ausgleichschwingung  $f_1$  infolge der Zündung bei  $u_{z1}$  bzw.  $u_{z2}, \dots$ ;
- $U_{pk}/\sqrt{2}$  Scheitelwert der 50-Hz-Polspannung an der kranken Phase;
- $U_0/\sqrt{2}$  Scheitelwert der Leerlaufspannung zwischen Phasen;

- a Lichtbogen löscht sofort nach dem Stoss;
- b Isolator hält dem Stoss stand;
- c Stark intermittierender Erdschluss (pfeifender Lichtbogen)

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 19 und Fig. 2

Fortsetzung des allgemeinen Teils auf Seite 517  
Es folgen «Die Seiten des VSE»

Fortsetzung von Seite 504

**Experimentelle und theoretische Untersuchung der Erdschlussüberspannung in isolierten Wechselstromnetzen, sowie der Eigenschaften von Erdschlusslichtbogen**  
(Fortsetzung)

die wohl die geringe Beanspruchung durch die normale Phasenspannung ohne weiteres aushalten, die aber nicht mehr imstande sind, eine Prüfung während Minuten oder Stunden mit verketteter, oder eine Prüfung mit doppelter verketteter Spannung während z. B. einer Sekunde, zu bestehen. Solche unsichtbare Fehlerstellen in den «gesunden» Phasen kommen unfehlbar während des Erdschlusses zum Vorschein; sie erwecken dann oft zu Unrecht den Eindruck sehr hoher Überspannungen. Würde das gesamte Netz eine Wechselstromprüfung von der Höhe der Katalogwerte des Materials (mindestens  $2,2 U_n + 20 \text{ kV}$ ) bei jeder Witterung anstandlos und sicher halten, so würde

kaum jemand mehr von Erdschlussüberspannungen sprechen.

#### Literatur

- [1] Berger, K.: Untersuchungen mittels Kathodenstrahl-Oszillograph der durch Erdschluss hervorgerufenen Überspannungen in einem 8-kV-Verteilnetz. Bull. SEV Bd. 21(1930), Nr. 23, Dezember, S. 756...788.
- [2] Interner FKH-Bericht 10/46: Bericht über die Messung der Erdschluss-Überspannungen im 50-kV-Netz der BKW, Herbst 1945...Frühjahr 1946.
- [3] Petersen, W.: Der aussetzende (intermittierende) Erdschluss. ETZ Bd. 38(1917), Nr. 47, 22. November, S. 553...555, u. Nr. 48, 29. November, S. 564...566.
- [4] Rüdtenberg, Reinhold: Elektrische Schaltvorgänge in geschlossenen Stromkreisen von Starkstromanlagen. 4. Aufl. Berlin: Springer 1953.
- [5] Fallou, Jean: Les réseaux de transmission d'énergie. p. 376. Paris: Gauthier-Villars 1935.
- [6] Interner FKH-Bericht A54/12b: Anhang zum Bericht über Versuche am Lichtbogen.
- [7] Peters, J. F. und J. Steplan: Voltages Induced by Arcing Grounds. J. Instn. Electr. Engrs. Bd. 42(1923), Nr. 8, August, S. 781...792.
- [8] Willheim, R.: Das Erdschlussproblem in Hochspannungsnetzen. p. 85. Berlin: Springer 1936.

#### Adresse der Autoren:

Prof. Dr. K. Berger, Versuchsleiter der FKH, Seefeldstrasse 301, Zürich 8.

R. Pichard, Ingenieur der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH), Seefeldstr. 301, Zürich 8.

## Die wirtschaftliche Nutzung des Bimetalls in Thermoauslösern

Von J. Kirchorfer, Aarau

621.316.925.44

*Nach einer kurzen Darstellung der Anforderungen an Thermoauslöser und Diskussion einiger vereinfachender Annahmen werden die Bedingungen abgeleitet, die zur Erzielung minimaler Gesamtkosten für das Bimetal bei vorgegebener Öffnungsarbeit einzuhalten sind.*

*Après un bref exposé des exigences posées aux déclencheurs thermiques et la justification de quelques simplifications admises, les conditions qui doivent être observées pour obtenir le total minimum des frais concernant le bimétal sont déterminées pour un travail d'ouverture prescrit.*

Beim Entwurf technischer Apparate und Geräte sieht sich der Konstrukteur in der überwiegenden Anzahl der Fälle vor die Aufgabe gestellt, einen günstigen Kompromiss zwischen dem technisch Möglichen und dem wirtschaftlichen Aufwand zu dessen Erreichung zu finden. Die Lösung dieser Aufgabe erweist sich schon bei verhältnismässig kleinen Apparaten wegen der vielen Kombinationsmöglichkeiten und wechselseitigen Einflüsse einzelner Elemente als ziemlich schwierig. Andererseits zwingt die ausserordentliche Bedeutung dieses Problems dazu, für die Erarbeitung dieses Kompromisses Formeln zu suchen, welche womöglich eine mathematisch exakte Auffindung des Optimums gestatten. Sollen diese Formeln einfach und die Zusammenhänge überblickbar bleiben, so muss die Entwicklung zwangsläufig zu der Behandlung von Teilproblemen führen, bei der für eine gewählte Gesamtdisposition die Ermittlung optimaler Verhältnisse im Hinblick auf bestimmte, preislich besonders interessante Einzelteile angestrebt wird. Für die praktische Behandlung eines solchen Detailproblems kann die folgende Studie über die wirtschaftliche Nutzung des Bimetalls in Thermoauslösern als gutes Beispiel gelten.

### a) Allgemeines

Wie in den meisten Fällen, bei denen eine optimale Ausnutzung angestrebt wird, handelt es sich auch hier um eine Aufgabe, bei welcher der Rahmen der Leistung durch Vorschriften und betriebsinterne Forderungen klar umrissen ist und das Minimum an

materiellem Aufwand zur Erfüllung dieser Forderungen gefunden werden soll.

Betrachtet man zunächst die Anforderungen, welche an Thermoauslöser gestellt werden, so findet man, dass die wesentlichsten jene nach

1. Funktionsbeständigkeit
2. Rüttelfestigkeit
3. Kurzschluss-Sicherheit<sup>1)</sup> und
4. grossem Einstellbereich der Nennströme sind.

Von diesen Forderungen sind für die weiteren, vorwiegend mechanischen Betrachtungen, jene nach Ziff. 1 und 2 die interessantesten, während die Forderungen nach 3 und 4 hauptsächlich in thermischer Hinsicht eine wesentliche Rolle spielen. Eine gegenseitige Beeinflussung besteht jedoch insofern, als diese Anforderungen durchwegs gegenläufiger Art sind. Während z. B. die Funktionsbeständigkeit oder Sicherheit dafür, dass die Auslösung unter den verschiedensten Betriebsbedingungen stets innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen erfolgt, um so grösser wird, je weniger man von dem für die Auslösung verfügbaren Weg tatsächlich ausnützt, nimmt die Rüttelfestigkeit mit geringer Ausnutzung des verfügbaren Weges ab.

Um zu einem günstigen Kompromiss zu gelangen, sollte der verfügbare Auslöseweg möglichst gross sein. Dieser logischen Folgerung steht aber die For-

<sup>1)</sup> Unter Kurzschluss-Sicherheit wird hier die Fähigkeit verstanden, Temperaturerhöhungen zu ertragen, welche bis zum Ansprechen der dem Relaisbereich zugeordneten Vorsicherung entstehen können.