

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 32 (1941)  
**Heft:** 12

**Artikel:** Ausgleichsvorgänge beim Ansprechen von Ueberspannungsableitern in Prüfanlagen und Netzen  
**Autor:** Berger, K.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1060015>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.01.2026

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

# SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

# BULLETIN

## REDAKTION:

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich 8, Seefeldstr. 301

## ADMINISTRATION:

Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telefon 5 17 42  
Postcheck-Konto VIII 8481

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXXII. Jahrgang

N° 12

Mittwoch, 18. Juni 1941

## Ausgleichsvorgänge beim Ansprechen von Ueberspannungsableitern in Prüfanlagen und Netzen.

Von K. Berger, Zürich.

621.316.933.0014

Der Autor beschreibt die beim Funktionieren von Ueberspannungsableitern entstehenden Ausgleichsvorgänge, die vor allem bei der Prüfung von Ableitern mit Wechselstromleistung und in kleinem Masse auch in Netzen entstehen. Diese Ausgleichsvorgänge bedeuten für Ableiter unter Umständen eine wesentliche Mehrbeanspruchung gegenüber der Prüfung mit Stoss oder mit Wechselspannung allein. Die Ausgleichsbeanspruchung erweist sich je nach Prüfstromkreis, Art des Netzes und Ort des Einbaues verschieden. Sie scheint bei der Prüfung der Ableiter ein Maximum zu erreichen, dessen genaue Festlegung weitgehende Kenntnisse des Blitzstromverlaufs, insbesondere der gesamten Stromdauer, erfordert.

L'auteur décrit les phénomènes transitoires se produisant lors du fonctionnement des appareils de protection contre les surtensions. Il rend compte des phénomènes qui se produisent au cours d'essais, lorsque ces appareils sont soumis simultanément à des surtensions, tout en étant raccordés à une source de courant alternatif. Ces phénomènes se produisent dans une plus petite mesure, également dans l'exploitation des réseaux. Par ces essais, les appareils de protection sont soumis à un effort plus considérable que par un essai de choc seul, ou que par l'effet du courant alternatif. L'effort occasionné par ces phénomènes transitoires varie suivant le circuit d'essai, le genre du réseau et l'endroit de montage des appareils de protection. Pendant l'essai des appareils, cet effort semble atteindre un maximum, dont la détermination exige des connaissances approfondies de la durée totale du courant de choc.

### 1. Einleitung.

Moderne Ableiter für Wechselstromnetze bestehen in der Regel aus einem strombegrenzenden «Widerstand»  $R_p$  (Fig. 1), dessen Ohmwert stark von der angelegten Spannung oder dem durchfliessenden Strom abhängig ist, und einer Funkenstrecke  $F_p$ , die einerseits den Stromdurchgang durch den Ableiter erst bei einer minimalen Spannung zulässt (Ansprechspannung) und ihn andererseits nach Verschwinden der Ueberspannung sofort oder bei einem natürlichen Nulldurchgang des nachfliessenden Netzstromes definitiv unterbricht.

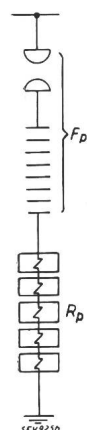


Fig. 1.  
Prinzipschema eines Ueberspannungsableiters  
 $R_p$  Spannungsabhängiger Widerstand.  
 $F_p$  Funkenstrecke

ströme von mehreren 1000 A ableiten muss (Blitzeinschlag in die Freileitungen), und weil er andererseits den bei Betriebsspannung nachfolgenden Netzstrom so klein halten muss, dass die einfache «Löschfunkenstrecke» des Ableiters den Strom beim natürlichen Nulldurchgang nicht mehr neu

zünden lässt, d. h. ihn unterbricht. Je nach der Art der Spannungsabhängigkeit unterscheidet man allgemein «spannungsabhängige» und mehr «ventilartige» Widerstände, deren Charakter am einfachsten in sog. Strom-Spannung-Kennlinien oder Charakteristiken festgelegt wird. In Fig. 2 bedeutet die gezeichnete Kurve 1 einen allgemein spannungs-

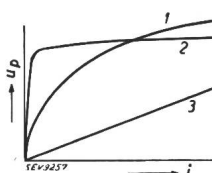


Fig. 2.  
Restspannung-Strom-Charakteristiken (Schutzkennlinien).  
1 Spannungsabhängiger Widerstand (allgemein)  
2 Ventilartiger Widerstand  
3 Ohmscher Widerstand

abhängigen Widerstand, dessen Spannung mit steigendem Strom, wenn auch schwach, doch immer ansteigt, Kurve 2 dagegen einen ventilartigen Widerstand, dessen Klemmenspannung mit wachsendem Strom nicht zunimmt. Zum Vergleich gibt Kurve 3 noch die Charakteristik des üblichen ohmschen Widerstandes (Metallwiderstand).

Die gezeichneten Kurven können entweder dadurch gemessen werden, dass Ströme bestimmten Scheitelwerts kurzzeitig durch den Widerstand geschickt werden, wobei jedesmal die grösste Spannung am Widerstand gemessen wird. Man erhält so eine Verbindungslinie der zusammengehörigen Strom-Spannung-Scheitelwerte (Schutzkennlinie), die sich mit der jungfräulichen Magnetisierungskurve ferromagnetischer Stoffe vergleichen lässt (Fig. 2).

Man kann andererseits auch so vorgehen, dass während eines einzigen Stromstosses die in jedem Moment zusammengehörigen Strom-Spannungswerte notiert werden. Für diese Messung eignet sich vor allem der Kathodenstrahl-Oszillograph (KO), weil er erlaubt, die  $u$ - $i$ -Kurve direkt aufzuzeichnen, indem in einer Richtung eine spannungsproportionale, in der andern eine stromproportionale Ablenkung des Kathodenstrahles erzeugt wird. Ähnlich wie bei der magnetischen Hysteresisschleife decken sich auch beim spannungsabhängigen Widerstandsmaterial die bei steigendem und fallendem Strom aufgezeichneten Spannungswerte nicht, sondern bilden eine mehr oder weniger ausgeprägte Schleife. Fig. 3 gibt ein Beispiel eines ge-

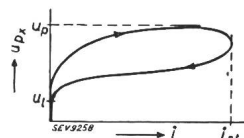


Fig. 3.

Stoss-Charakteristik (Klemmen-spannung-Strom) eines spannungsabhängigen Widerstands

$i_{st}$  Scheitelwert des Stoßstroms  
 $u_p$  Restspannung am Widerstand  
 $u_l$  Löschspannung des Widerstands

Die Pfeile geben die Richtung an, in der die Schleife während eines Stosses durchlaufen wird.

messenen Strom-Spannungs-Verlaufs an einem modernen Ableiterwiderstand. Im Gegensatz zur spitzen magnetischen Hysteresiskurve ist die Strom-Spannungs-Schleife des «Widerstandes» stets abgerundet. Diese Beobachtung ist wohl dadurch zu erklären, dass die Leitfähigkeit der aktiven Si C-Kristalle des Widerstandes auf thermischer Elektronenemission feiner Kanten und Spitzen beruht, die zu ihrer Aufheizung eine gewisse Energie und damit Zeit benötigen, wodurch eine thermische Trägheit entsteht.

Die Spannung am Widerstand sei  $u_{px}$ . Sodann ist es üblich, ihren grössten Wert als *Restspannung* oder *Begrenzungsspannung*  $u_p$  zu bezeichnen. Ferner heisse der Spannungswert, bei welchem der Strom wieder zu Null wird, die *Löschspannung*  $u_l$ . Nebenbei mag bemerkt werden, dass Form und Grösse der Schleife spannungsabhängiger Widerstände vom zeitlichen Verlauf des Stromes im Widerstand abhängen. Nach dem im Anfang Gesagten ist klar, dass die Restspannung tiefer liegen muss als die Ueberschlag-Stoss-Spannung der zu schützenden Isolation, sofern der Ableiter seinen Zweck der Verhinderung von Ueberschlägen erreichen soll, und ferner, dass die Löschspannung mindestens etwas höher liegen soll als der Scheitelwert der Betriebsspannung, damit der Ableiter bei Betriebsspannung keinen Strom aufnimmt. Das Vorhandensein der Ableiterfunkenstrecke erlaubt allerdings, mit der Betriebsspannung theoretisch etwas höher zu gehen als die Löschspannung, so dass bei Betriebsspannung ein Strom von der Grösse von 10...100 A fließen kann, der dann in der beschriebenen Weise von der «Löschfunkenstrecke» beim ersten Nulldurchgang unterbrochen wird.

## 2. Vorgehen bei der betriebsmässigen Prüfung von Ableitern unter Wechselspannung (Löschversuch).

Nach den heutigen Leitsätzen und Regeln für die Prüfung von Ueberspannungsableitern werden diese dadurch auf ihre Betriebssicherheit geprüft, dass sie Stoßströmen unterworfen werden, während sie gleichzeitig unter einer betriebsmässigen Spannung stehen. Ableiter für Wechselstromnetze müssen also unter betriebsmässiger Wechselspannung stehen, und zwar von der Höhe der Nennspannung  $U_n$  und der 1,2fachen Nennspannung<sup>1)</sup>.

Das übliche Prüfschema ist in Fig. 4a dargestellt und dessen Ersatzschema in Fig. 4b.

Der zu prüfende Ableiter  $A$  wird möglichst direkt an die Klemmen eines Transformators oder Generators genügender Wechselstromleistung angeschlossen, so dass die Klemmenspannung  $u_{px}$  des Ableiters mit derjenigen des Transformators  $u_T$  als identisch angenommen werden darf. Der Transformator ist dabei auf eine Wechselspannung  $e = E \sqrt{2} \cos(\omega \cdot t + \varphi)$  erregt. Die gesamte Streuinduktivität der speisenden Einheit sei  $L$ . Damit geht das Schema Fig. 4a in Fig. 4b über.

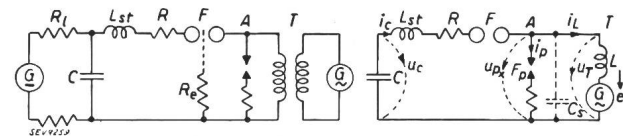


Fig. 4a.

Fig. 4b.

Prinzipschema für die Löschprüfung von Ueberspannungsableitern.

$G$  Gleichspannungs-Ladestromquelle

$R_L$  Ladewiderstand

$C$  Stosskapazität

$L_{st}$  Induktivität des Stosskreises

$R$  Widerstand des Stosskreises

$F$  Stoss-Funkenstrecke

$A$  Zu prüfender Ableiter

$G$  Wechselstromquelle

$T$  Transformator

$L$  Induktivität der Wechselstromquelle samt Transformator

$C_s$  Streukapazität der Wechselstromquelle

$R_0$  Hochohmiger Erdungswiderstand

Der vom Blitzeinschlag in die Leitung verursachte Stoßstrom wird bei der Prüfung erzeugt durch einen Stossgenerator  $C$ , bestehend aus genügend starken Kondensatoren mit der Ladequelle  $G$  und Begrenzungswiderständen  $R_L$ , Eigeninduktivität  $L_{st}$  und Funkenstrecke  $F$ . Diese kann, wie gezeichnet, aus zwei Kugeln oder Spitzen bestehen, zwischen denen somit die Differenz aus der Ladespannung  $u_c$  der Kondensatoren  $C$  und der Wechselspannung  $u_T$  vorhanden ist. Wird die Ladespannung  $u_c$  langsam erhöht, so spricht somit  $F$  dann an, wenn die Differenz maximal ist, d. h. bei umgekehrten Vorzeichen von  $u_c$  und  $u_T$ . Ist die Ladespannung  $u_c$  positiv, so erfolgt das Ansprechen von  $F$  beim negativen Scheitelwert der Wechselspannung  $u_T$  (Fig. 5).

Dieser Vorgang wird als *Synchronisierung* des Stossgenerators mit der Wechselspannung bezeichnet. Im Gegensatz dazu kann diese Synchronisie-

<sup>1)</sup> Siehe z. B. «Leitsätze für Ueberspannungsableiter» des SEV vom 1. Oktober 1936 oder «Leitsätze für Ueberspannungsschutzgeräte in Starkstromanlagen» des VDE vom Januar 1938.

rung verhindert werden durch eine über hohen Widerstand  $R_e$  geerdete Zwischenelektrode in der Funkenstrecke  $F$ , so dass dann das Ansprechen des Ableiters in bezug auf die Phase der Wechselspannung entweder dem Zufall überlassen bleibt, oder

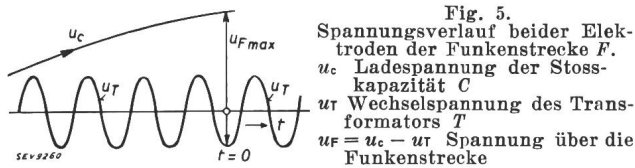


Fig. 5.  
Spannungsverlauf beider Elektroden der Funkenstrecke  $F$ .  
 $u_c$  Ladespannung der Stosskapazität  $C$   
 $u_T$  Wechselspannung des Transformators  $T$   
 $u_F = u_c - u_T$  Spannung über die Funkenstrecke

durch andere Einflüsse, z. B. durch die pulsierende Aufladung von  $C$  aus einem mit dem Transformator  $T$  synchron gespeisten Wechselstromnetz bestimmt wird.

Durch das Ansprechen der Stosfunkenstrecke  $F$  wird die auf  $u_c$  geladene Stosbatterie  $C$  auf die Verbindungsleitung zum Ableiter  $A$  und Transformator  $T$  geschaltet. Sofern die Ladespannung  $u_c$  die Ansprechspannung des Ableiters überschreitet, spricht die Ableiterfunkenstrecke  $F_p$  an und leitet einen Strom  $i_p$  ein, dessen Grösse und Verlauf sich in erster Linie aus den Daten des Stoskreises  $C-R-L_{st}-A$  ergeben. Dieser Kreis wird so eingestellt, dass die gewünschten Werte der Stosprüfströme im Ableiter entstehen. Insbesondere bei hohen Stoßströmen, wo  $R$  wegen sonstiger Energieverluste klein gemacht werden muss, kann dies nur mit im Stromkreis eingeschaltetem Ableiter geschehen. Die bei diesem Stosvorgang entstehende Klemmenspannung am Ableiter  $u_p$  legt sich nun unfehlbar auch an den Prüftransformator  $T$ , welcher der entstehenden Ueberspannungsbeanspruchung gewachsen sein muss. Ueberdies bewirkt die gestörte Klemmenspannung des Transformators einen Ausgleichsvorgang, der im folgenden berechnet werden soll, da er sich für die Beanspruchung der Ableiter als wichtig erwiesen hat.

### 3. Ausgleichsvorgänge beim Lösversuch.

#### a) Ausgleichsvorgang während der Dauer des Stosstroms im Ableiter.

Beim Ansprechen des Ableiters gilt mit den Bezeichnungen der Figur 4b:

Für  $t=0$ :

Ansprechen von  $F$  bei  $u_{Fmax} = (u_c - u_T)_{max} = (u_c + e)_{max}$ , d. h. bei  $e_{max} \cong +E\sqrt{2}$  = posit. Scheitelwert der EMK, somit  $\varphi=0$ ,  $e = E\sqrt{2} \cos \omega t$ . (1a)

Ferner gilt für  $t=0$ :  $i_L = 0$ . (1b)

$$i_c = i_p + i_L, \quad (2)$$

wobei während der Stosdauer  $T_0$  im allgemeinen  $i_c \gg i_L$  und  $i_p \gg i_L$  gilt. (2')

$$u_{px} = u_T = L \cdot \frac{di_L}{dt} - e \quad (3)$$

solange  $i_p > 0$ , ist auch  $u_{px} > 0$ , (4)

z. B.  $u_{px}$  = konstant = Ventilspannung +  $u_v$ .

Für  $i_p < 0$  würde dagegen  $u_{px} < 0$ , z. B. =  $-u_v$ . Infolge der vom Stoskreis an den Transformator  $T$  gelegten Ableiter-Klemmenspannung  $u_{px}$  muss nach

Gl. (3) im Transformator  $T$  ein Strom entstehen, der gegeben ist durch

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{e + u_{px}}{L} \quad \text{oder} \quad i_L = \frac{1}{L} \int_0^t (e + u_{px}) dt \quad (6)$$

Mit (1a), d. h. Synchronisierung der Funkenstrecke  $F$  gemäss Schema Fig. 4b wird somit

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E\sqrt{2} \cos \omega t + u_{px}}{L} \quad \text{und} \quad i_L = \frac{1}{L} \int_0^t (E\sqrt{2} \cos \omega t + u_{px}) dt \quad (7)$$

Solange der Ableiter Strom führt, ist die Restspannung  $u_{px}$  vom Stoßstrom (Blitzstrom) bestimmt, der zum grossen Teil über den Ableiter  $A$ , und nur zum kleinen Teil allmählich über die Induktivität  $L$  abfliesst.

In der Regel ist der Stoßstrom im Ableiter gegenüber der Periodendauer des Wechselstroms  $\frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$  von sehr kurzer Dauer. Nennen wir diese gesamte Dauer des Ableiter-Stoßstromes, d. h. die Zeit, bis er wieder den Wert 0 erreicht,  $T_0$ , und setzen wir voraus, dass  $T_0 \ll \frac{1}{f}$ , so geht Gl. (7) für den Zeitpunkt  $t = T_0$  über in

$$i_{L0} \cong \frac{1}{L} (E\sqrt{2} + u_{p0}) \cdot T_0 \quad (8)$$

Darin bedeuten:

$E$  die EMK (Effektivwert),  
 $T_0$  die Gesamtdauer des Stoßstromes im Ableiter,  $T_0 \ll \frac{1}{f}$

$u_{p0}$  die mittlere Restspannung am Ableiter während der Zeit  $T_0$ ,

$$u_{p0} = \frac{1}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} u_{px} \cdot dt, \quad (9)$$

$L$  die Streuinduktivität der speisenden Wechselstromquelle,

$i_{L0}$  Transformatorstrom am Ende der gesamten Stoßstromdauer im Ableiter.

Der Strom  $i_{L0}$  kann auch dargestellt werden durch die Kurzschlussleistung  $P_k$  oder den Kurzschlussstrom  $I_k\sqrt{2}$  (Scheitelwert) der Wechselstromquelle: Es ist:

$$L \cong \frac{E\sqrt{2}}{\omega I_k\sqrt{2}} = \frac{E^2}{\omega P_k} = \frac{\varepsilon E^2}{\omega P}$$

$$\left. \begin{aligned} i_{L0} &\cong \frac{\sqrt{2} E + u_{p0}}{\sqrt{2} E} \cdot 2\pi f \cdot I_k\sqrt{2} \cdot T_0 \\ &\cong \left(1 + \frac{u_{p0}}{\sqrt{2} E}\right) \cdot 4\pi f \cdot \frac{P_k}{\sqrt{2} E} \cdot T_0 \\ &\cong \left(1 + \frac{u_{p0}}{\sqrt{2} E}\right) \cdot 4\pi f \cdot \frac{P}{\varepsilon\sqrt{2} E} \cdot T_0 \end{aligned} \right\} \quad (8')$$



$\varepsilon$  = Proz. Kurzschlußspannung,

$f$  = Betriebsfrequenz der Wechselstromquelle =  $\frac{\omega}{2\pi}$

$I$  = Nennstrom der Wechselstromquelle,

$I_K$  = Kurzschlußstrom (Effektivwert),

$P_K$  = Kurzschlussleistung der Wechselstromquelle,

$P$  = Nennleistung der Wechselstromquelle.

Sofern Oszillogramme der Ableiter-Restspannung vorliegen, ist es ein leichtes, den Transformatorstrom  $i_L$  aus Gl. (7) graphisch zu bestimmen, indem der gesamte Spannungsimpuls  $\int (E\sqrt{2} \cos \omega t + u_{px}) dt$  ermittelt wird. Die Auswertung der Gl. (7) bietet übrigens auch für sehr lang dauernde Stossströme ( $T_0 \gg \frac{1}{f}$ ) keinerlei Schwierigkeiten, insbesondere wenn infolge langdauernder Blitzströme der Ableiterstrom und damit  $u_{px}$  die Richtung nicht ändern.

*Beispiel:* Die gesamte Stoßstromdauer betrage  $T_0 = 100 \mu s$ ,  $f = 50$  Hz, ferner

$$\frac{u_{p0}}{\sqrt{2} E} = 2, \quad I_K \sqrt{2} = 706 \sqrt{2} = 1000 \text{ A}$$

$$i_{L0} = (1 + 2) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1000 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \approx 94 \text{ A.}$$

Dieser Strom ist klein gegenüber den üblichen Stoßströmen.

#### b) Ausgleichsvorgang nach dem gleichzeitigen Löschen des Stoßstroms im Ableiter und im Stoss-generator.

Im Zeitpunkt  $t = T_0$  verschwindet der Ableiterstrom,  $i_p = 0$ . Der Kapazitätsstrom  $i_c$  geht auf den Wert  $i_{L0}$  zurück, der im obigen Beispiel 94 A betrug. Es werde nun zunächst angenommen, dass die Funkenstrecke  $F$  diesen Strom nicht aufrecht zu halten vermöge und sofort lösche. Dann wird auch  $i_c = 0$  für  $t = T_0$ . Ist dies der Fall, so ist damit die Strombahn des Stromes  $i_{L0}$  der Induktivität  $L$  plötzlich unterbrochen worden. Da der Strom in  $L$  nicht plötzlich verschwinden kann, entsteht eine Eigenschwingung der Induktivität  $L$  mit der gesamten, parallel zum Ableiter liegenden Streukapazität  $C_s$ ,

mit einer Eigenfrequenz  $f_e = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_s \cdot L}}$

Der Spannungsverlauf am Transformator ist in Fig. 6 skizziert. Er ist bedingt durch die im Löschmoment  $t = T_0$  auf die Löschspannung  $u_l$  aufgeladene Streukapazität  $C_s$  und durch den momen-

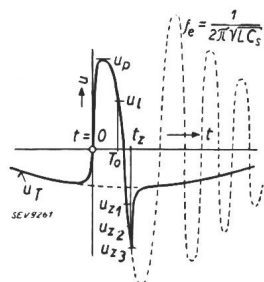


Fig. 6.

Spannungsverlauf beim Ansprechen eines Ableiters im Prüfkreis nach Fig. 4.

$u_T$  Spannung am Transformator  $T$   
 $u_p$  Restspannung am Ableiter  $A$  nach dem Ansprechen im Moment  $t = 0$ .

$u_l$  Löschspannung am Ableiter im Zeitpunkt  $t = T_0$ .

$u_{z1} - u_{z2} - u_{z3}$  Spannungswerte von Rückzündungen im Zeitpunkt  $t = T_0$ .

tan bestehenden Strom  $i_{L0}$  in  $L$ . Da im Prüffeld  $C_s$  sehr klein ist, liegt  $f_e$  sehr hoch und die Spannung  $u_T$  am Transformator und Ableiter schwingt

sehr rasch auf hohe negative Werte. Der grösste Wert  $u_{Tmax}$  ist in dem Moment vorhanden, wo der Strom zu Null wird; er kann angenähert aus der überwiegend magnetischen Anfangsenergie geschätzt werden zu

$$u_{Tmax} \approx i_{L0} \sqrt{\frac{L}{C_s}} \quad (10)$$

z. B.  $L = 0,03 \text{ H}$ ,  $C_s = 1000 \text{ pF}$ ,  $i_{L0} = 94 \text{ A}$ ,  $u_{Tmax} \approx 520 \text{ kV}$ .

Es ist ersichtlich, dass der Ableiter innert kurzer Zeit in umgekehrter Richtung wie beim Stoss wieder zünden muss ( $t = t_z$ ), z. B. bei den Spannungen  $u_{z1} u_{z2} u_{z3}$  usw., wobei er den Strom  $i_z = -i_{L0}$  übernehmen muss. Durch diesen umgekehrt gerichteten Strom entsteht eine Ausgleichsspannung am Ableiter, die ebenfalls umgekehrt gerichtet ist wie beim Stoss. Um nur mit positiven Restspannungen rechnen zu müssen, zählen wir somit für den folgenden Ausgleichsvorgang  $i_p$  und  $u_{px}$  von unten nach oben positiv gemäss Fig. 7.

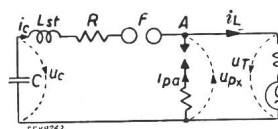


Fig. 7.

Prinzipschema des Prüfstromkreises während des Ausgleichsvorgangs im Ableiter ( $t > t_z$ ).

$C$  Stosskapazität  
 $L_{st}$  Induktivität des Stosskreises  
 $R$  Widerstand des Stosskreises  
 $F$  Stoss-Funkenstrecke  
 $A$  Ableiter  
 $G$  Gesamte Wechselstromquelle  
 $L$  Streuung der Wechselstromquelle

Dann gilt:

$$i_c = 0, \quad i_{pa} = i_L$$

$$-u_{px} = u_T = L \frac{di_L}{dt} - e$$

$$L \frac{di_L}{dt} = -(u_{px} - e) \quad (11)$$

Somit nimmt  $i_L$  ab, solange  $(u_{px} - e) > 0$ , d. h. solange die Restspannung während des Ausgleichsstromes grösser ist als die momentane EMK  $e = E\sqrt{2} \cos \omega t$ , und es wird, wenn  $t'$  von  $t = t_z$  aus gezählt wird:

$$-L \int_{t_z}^{t_z + t'} di_L = L (i_{L0} - i_L) = \int_{t_z}^{t_z + t'} (u_{px} - e) dt \quad (12)$$

$i_L$  wird zu Null für einen Zeitpunkt  $t = t_z + T_a$ :

$$Li_{L0} = \int_{t_z}^{t_z + T_a} (u_{px} - e) dt = \int_{t_z}^{t_z + T_a} (u_{px} - E\sqrt{2} \cos \omega t) dt \quad (13)$$

Setzen wir den Mittelwert der Restspannung des

$$\text{Ausgleichs } u_{pa} = \frac{\int_{t_z}^{t_z + T_a} u_{px} \cdot dt}{T_a} \text{ und machen die Vor-}$$

aussetzung, dass  $T_a \ll 1/f$  und somit  $e = E\sqrt{2} \cos \omega t \approx E\sqrt{2}$ , so folgt  $Li_{L0} = (u_{pa} - E\sqrt{2}) T_a$ , oder durch Einsetzen des Wertes  $i_{L0}$  aus Gl. (8):

$$\frac{T_a}{T_o} = \frac{u_{po} + E\sqrt{2}}{u_{pa} - E\sqrt{2}} \quad (14)$$

Dieses Resultat liegt sehr nahe: Zum Entstehen des Stromes  $i_{L0}$  ist der Spannungsimpuls  $T_o \cdot (u_{po} + E\sqrt{2})$  nötig, zum Verschwinden von  $i_{L0}$  der negative Impuls  $T_a \cdot (u_{pa} - E\sqrt{2})$ ; beide müssen gleich sein. Der Ausgleichsstrom steigt mit den vereinfachenden Annahmen konstanter Restspannungen  $u_{po}$  und  $u_{pa}$  und konstanter EMK  $e \cong E\sqrt{2}$  linear von 0 bis  $i_{L0}$  und fällt wieder linear auf Null zurück wie Fig. 8 zeigt. Unter Berücksichtigung der

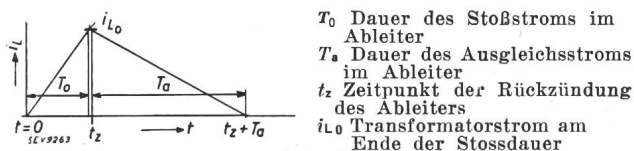


Fig. 8.

Mittlerer Verlauf des Ausgleichsstroms  $i_L$  im Transformator.

in jedem Moment vorhandenen Spannung  $u_{px}$  am Ableiter entstehen verschiedene Kurven, von denen Fig. 8 lediglich die Mittelwerte darstellt.

**Beispiel:** Wie vorhin sei  $u_{po}: E\sqrt{2} = 2$ ,  
ferner  $u_{pa}: E\sqrt{2} = 1,5$ .  
Dann wird  $\frac{T_a}{T_o} = \frac{2+1}{1,5-1} = 6$ ,  $T_a = 600 \mu s$ .

Die Dauer von  $T_a$  ist ein Vielfaches von  $T_o$  und würde nach Gl. (13) für  $u_{pa} = E\sqrt{2}$  sogar  $\infty$ , weil dann  $i_L$  nicht abnehmen kann. Doch ist die Voraussetzung  $T_a \ll 1/f$  dann nicht mehr erfüllt und der Strom  $i_L$  kann doch wieder zu Null werden, weil die EMK  $e = E\sqrt{2}\cos\omega t$  abnimmt und sogar zu Null wird. Zu tiefe Restspannung  $u_{pa}$  äussert sich dadurch, dass der Strom im Ableiter bei  $E\sqrt{2}$  vom

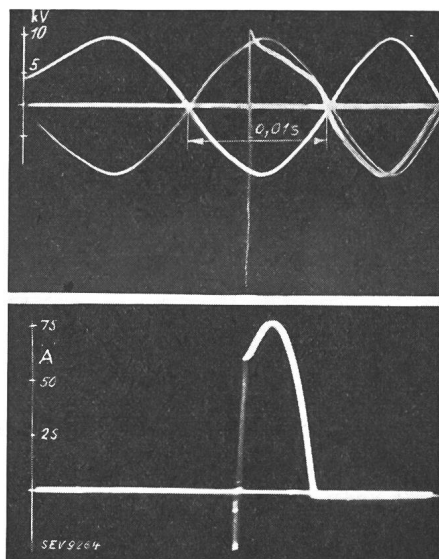


Fig. 9.

Beispiel eines Ableiters, dessen Löschungsspannung etwas unter die Wechselstrom-EMK sinkt.

Oben Spannungskurve

Unten Stromkurve

Die anfängliche Zunahme des Ausgleichsstroms ist deutlich ersichtlich: Ausgleichsbeanspruchung hoch.  
(Der Stoßstrom wird durch die kurze Spitze nach unten nicht maßstäblich wiedergegeben.)

Anfangswert  $i_{L0}$  aus nicht abnimmt, sondern wächst. Fig. 9 gibt ein Oszillogrammbeispiel dazu. Nur infolge der Abnahme der EMK  $e = E\sqrt{2}\cos\omega t$  entsteht wieder ein Ueberschuss ( $u_{pa} - e$ ) und damit nach Gl. (11) ein Abnehmen des Stromes. Im Grenzfall fliesst ein Ableiterstrom bis zum Mo-

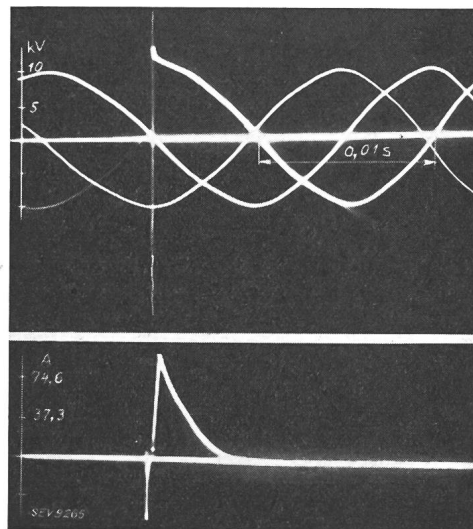


Fig. 10.

Üblicher Ausgleichvorgang beim Löschen des Ableiterstroms ( $L \approx 0,03$  H,  $C \approx 1 \mu F$ )

Oben Spannungskurve

Unten Stromkurve (vergleiche Fig. 8).

ment, wo die EMK = 0 wird und man bekommt den Eindruck eines sehr grossen nachfolgenden Wechselstromes. Doch sind alle Zwischenfälle möglich, wie die folgenden Beispiele zeigen, die dem Fall c) entnommen sind. Sehr oft kann ein Stromverlauf nach Fig. 10 oder 11 festgestellt werden, oft auch ein solcher nach Fig. 12. Bei Fig. 12 kön-

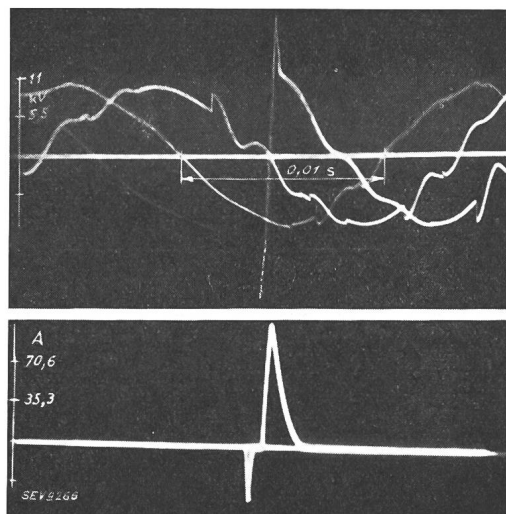


Fig. 11.

Üblicher Ausgleichvorgang beim Löschen eines Ableiterstroms ( $L \approx 0,03$  H,  $C \approx 9 \mu F$ ).

Oben Spannungskurve

Unten Stromkurve (vergleiche Fig. 8).

Infolge der kleinereigenen Frequenz  $f_a$  wird die Strompause bis zum Rückzündmoment merklich länger (vergleiche Fig. 10).

nen 3 Komponenten des Stromes unterschieden werden, die sich zeitlich folgen:

- a) Der Stoßstrom, der in den Figuren nicht massstäblich wiedergegeben ist;
- b) der Ausgleichsstrom, der mit dem Wert  $i_{L0}$  beginnt;
- c) der von der Wechselspannung  $f=50/s$  erzeugte «Ableiter-Wechselstrom  $i_{\sim x}$ ».

In Fig. 9 bis 11 ist diese Unterscheidung nicht möglich, da die Bestandteile b) und c) ineinander

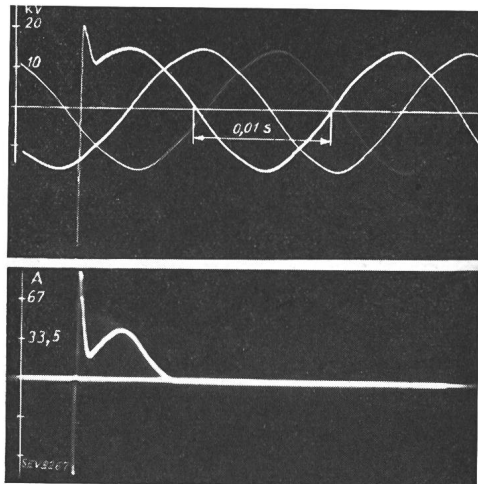


Fig. 12.

Ausgleichsvorgang beim Löschen des Stroms eines Ableiters, dessen Ansprechen vor Erreichen des Scheitelwerts der Wechselspannung erfolgt.  
Oben Spannungskurve  
Unten Stromkurve.

Infolge des raschen Rückgangs des Ausgleichsstroms wird anschliessend der «Ableiterwechselstrom» deutlich sichtbar.

greifen. Bisher war es üblich, den «Stoßstrom» und den «nachfolgenden Netzstrom» zu unterscheiden. Dabei wurde dieser häufig dadurch bestimmt, dass während einer kurzen Zeit von wenigen Perioden eine Wechselspannung an den Ableiterwiderstand gelegt wurde.

Eine genauere Festlegung des Begriffs des «nachfolgenden Netzstromes» ist daher nötig; sie kann auf 2 Arten geschehen:

1. Durch Unterscheidung der oben genannten 3 Komponenten, wobei aber beim Löscheversuch die Unterscheidung der beiden Komponenten b) und c) im allgemeinen nicht möglich ist.

2. Durch Unterscheidung der bisherigen 2 Begriffe («Stoßstrom» und «nachfolgender Netzstrom»), wobei dieser Begriff als gesamter, vom Transformator beim Funktionieren des Ableiters gelieferter Ableiterstrom zu fassen ist. Die Fassung nach 2 ist auch energetisch richtig, da auch während des Ausgleichvorganges elektrische Arbeit aus der EMK in den Ableiter geliefert wird. Sodann ist ja infolge der Spannungsabhängigkeit des Widerstandes auch der bei rein sinusförmiger Wechselspannung stationär entstehende «Ableiter-Wechselstrom  $i_{\sim x}$ » nicht sinusförmig, sondern verzerrt, so dass von einem «betriebsfrequenten Strom» streng nicht gesprochen werden kann.

In dieser Arbeit wird daher unter dem Begriff «nachfolgender Netzstrom» der gesamte, vom Transformator dem Ableiter zugeführte Strom verstanden. Der nur in einem getrennten Versuch unter stationärer Wechselspannung bestimmbare Wechselstrom im Ableiter wird als «Ableiter-Wechselstrom  $i_{\sim x}$ » bezeichnet. Zunächst soll nun noch die infolge des Ausgleichsvorganges dem Ableiter vom Transformator zugeführte Energie  $A_{a0}$  berechnet werden.

$$A_{a0} = \int_{t_z}^{t_z + T_a} u_{px} \cdot i_p dt = \int_{t_z}^{t_z + T_a} u_{px} \cdot \left[ i_{L0} - \frac{1}{L} \int_{t_z}^{t_z + t} (u_{px} - e) dt' \right] dt \quad (15)$$

Unter den gleichen Annahmen wie für Gl. (14) entsteht:

$$\begin{aligned} A_{a0} &= \int_{t_z}^{t_z + T_a} u_{px} \left( i_{L0} - \frac{u_{pa} - E\sqrt{2}}{L} \cdot t \right) dt \\ &\cong u_{pa} \left( i_{L0} T_a - \frac{u_{pa} - E\sqrt{2}}{L} \cdot \frac{T_a^2}{2} \right) \\ &\simeq u_{pa} \left( \frac{u_{p0} + E\sqrt{2}}{L} \cdot T_0 T_a - \frac{u_{pa} - E\sqrt{2}}{L} \cdot \frac{1}{2} T_a^2 \right) \\ A_{a0} &\simeq u_{pa} \cdot \frac{(E\sqrt{2} + u_{p0})^2}{u_{pa} - E\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{2} \frac{T_0^2}{L} = \\ &\quad \frac{u_{pa}}{E\sqrt{2}} \cdot \frac{(u_{p0} + E\sqrt{2})^2}{u_{pa} - E\sqrt{2}} \cdot \frac{\omega I_K \sqrt{2}}{2} \cdot T_0^2 \\ &\simeq \pi \cdot \frac{u_{pa}}{E} \cdot \frac{(u_{p0} + E\sqrt{2})^2}{u_{pa} - E\sqrt{2}} \cdot f \cdot I_K \cdot T_0^2 \end{aligned}$$

mit  $L = \frac{E}{\omega I_K}$

Auch dieses Resultat lässt sich einfach erklären: Bei konstanter Restspannung  $u_{pa}$  ist die aufgenommene Energie unter Benützung der Gl. (8') und (14):

$$A_{a0} = u_{pa} \cdot \frac{i_{L0}}{2} \cdot T_a = \frac{u_{pa}}{E} \cdot \frac{(u_{p0} + E\sqrt{2})^2}{u_{pa} - E\sqrt{2}} \cdot \pi f I_K \cdot T_0^2 \quad (16)$$

Man erkennt daraus, dass die Ausgleichsenergie-Aufnahme  $A_{a0}$  gross wird, wenn  $(u_{pa} - E\sqrt{2})$  klein wird, und dass bei konstanter Gesamt-Stossdauer  $T_0$  die Energie wächst mit grösserem Kurzschluss-Strom der Prüfanlage, d. h. bei grösserer Kurzschlussleistung der Wechselstromquelle.

Schliesslich interessiert auch noch die relative Grösse der Ausgleichsenergie im Verhältnis zur thermischen Energie  $A_n$  des unter Einfluss von Wechselspannung ohne vorangehenden Stoss entstehenden Ableiter-Wechselstromes  $i_{\sim x}$  (Scheitelwert).

Unter der Annahme eines sinusförmigen Stroms  $i_{\sim x} = i_{\sim} \cdot \cos \omega t$  (Widerstand nicht spannungsabhängig) würde

$$A'_{\sim} = \int_0^{\omega t = \pi/2} E\sqrt{2} \cos \omega t \cdot i_{\sim} \cos \omega t \cdot dt = \frac{1}{8f} \sqrt{2} E i_{\sim} \quad (17)$$

und somit

$$\frac{A_{a_0}}{A'_{\sim}} = 8 \pi f^2 \cdot \frac{u_{pa}}{E^2} \frac{(u_{p_0} + E\sqrt{2})^2}{u_{pa} - E\sqrt{2}} \cdot \frac{I_K \sqrt{2}}{i_{\sim}} \cdot T_0^2$$

$$\simeq 36 \frac{u_{pa}}{E^2} \frac{(u_{p_0} + E\sqrt{2})^2}{u_{pa} - E\sqrt{2}} \cdot \frac{I_K}{i_{\sim}} \cdot f^2 T_0^2 \quad (17')$$

Wird dagegen der Ableiterwechselstrom  $i'' = i_{\sim} \cos 3\omega t$  angesetzt, was dem Verhalten der spannungsabhängigen Widerstände wesentlich näher kommt, so lässt sich  $A_{\sim}$  angenähert darstellen als

$$A''_{\sim} = \int_0^{3\omega t = \pi/2} E\sqrt{2} \cos \omega t \cdot i_{\sim} \cos 3\omega t \cdot dt \simeq \frac{\sqrt{2} E i_{\sim}}{3\omega} \simeq \frac{\sqrt{2} E i_{\sim}}{6\pi f}$$

und somit

$$\frac{A_{a_0}}{A''_{\sim}} \simeq 6\pi^2 f^2 \cdot \frac{u_{pa}}{E^2} \cdot \frac{(u_{p_0} + E\sqrt{2})^2}{u_{pa} - E\sqrt{2}} \cdot \frac{I_K \sqrt{2}}{i_{\sim}} \cdot T_0^2$$

$$\simeq 85 \frac{u_{pa}}{E^2} \frac{(u_{p_0} + E\sqrt{2})^2}{u_{pa} - E\sqrt{2}} \cdot \frac{I_K}{i_{\sim}} \cdot f^2 T_0^2 \quad (17'')$$

Schliesslich interessiert noch der Vergleich der Ausgleichsenergie mit der Stossenergie  $A_{st}$ , welche sich darstellen lässt als  $A_{st} \simeq u_{p_0} i_{st} T_H$ , wo

$u_{p_0}$  mittlere Restspannung während des Stosses,  
 $i_{st}$  Scheitelwert des Stoss-Stromes (Fig. 3),  
 $T_H$  Halbwertsdauer des Stoss-Stromes,

somit

$$\frac{A_{a_0}}{A_{st}} = \frac{u_{pa}}{E u_{p_0}} \cdot \frac{(u_{p_0} + E\sqrt{2})^2}{u_{pa} - E\sqrt{2}} \cdot \pi f T_0 \cdot \frac{T_0}{T_H} \cdot \frac{I_K}{i_{st}} \quad (18)$$

**Beispiel:** Wie früher sei  $T_0 = 100 \mu s$ ,  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $T_H = 30 \mu s$ ,  $I_K \sqrt{2} = 1000 \text{ A}$ ,  $i_{\sim} = 20 \text{ A}$ ,  $i_{st} = 5000 \text{ A}$ ,  $u_{p_0} = 2E\sqrt{2}$ ,  $u_{pa} = 1,5 E\sqrt{2}$ .

$$\frac{A_{a_0}}{A_{\sim}} \simeq 85 \cdot \frac{3^2 \cdot 1,5}{0,5} \cdot \frac{1000}{20\sqrt{2}} \cdot 2500 \cdot 10^{-8} \simeq 2,0$$

$$\frac{A_{a_0}}{A_{st}} \simeq \frac{1,5}{2} \cdot \frac{3^2}{0,5} \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{100}{30} \cdot \frac{706}{5000} \simeq 0,10.$$

Die Ausgleichsenergie  $A_a$  macht somit in diesem Fall ca. 10% der Stossenergie und ca. 200% der bis zum Nulldurchgang gelieferten Energie des ausschliesslich unter Wechselspannung entstehenden Ableiter-Wechselstromes aus. Sie ist gegenüber diesem nicht zu vernachlässigen, spielt aber im ganzen noch keine sehr wesentliche Rolle. Das gilt im allgemeinen, solange nur  $T_0 \ll \frac{1}{f}$  bleibt, und das Ver-

hältnis  $\frac{I_K}{i_{\sim}}$  nicht grösser als ca. 30 ist.

c) *Ausgleichsvorgang nach dem Aufhören des Stossstroms im Ableiter bei weiterhin angeschlossenem Stossgenerator.*

Im Zeitpunkt  $t = T_0$  soll wie unter b) der Ableiterstrom löschen, dagegen nicht mehr die Fun-

kenstrecke  $F$  des Stossgenerators; es handelt sich also hier um den Fall, wo  $i_c$  länger dauert als  $i_p$ .

Dieser Fall kommt bei der Prüfung von Ableitern vor, wenn nicht spezielle Massnahmen für die künstliche Löschung von  $i_c$  getroffen werden (Beblasung der Funkenstrecke  $F$ , Spitzen-Funkenstrecke statt der Kugel-Funkenstrecke  $F$ , Schmelzsicherung im Stromkreis  $C - A$  usw.).

Im Stromkreis der Fig. 7 gilt (mit  $i_{pa} = 0$ ):

$$\text{Für } t < T_0: u_c - L_{st} \frac{di_c}{dt} - i_c R = u_{px}$$

$$\text{Für } t = T_0: u_{c_0} - \left( L_{st} \frac{di_c}{dt} + i_c R \right) = u_l.$$

$$\text{Sofern } L_{st} \cdot \frac{di_c}{dt} + i_c R \ll u_c$$

wird somit  $u_{c_0} \simeq u_l =$  Löschspannung des Ableiters  $A$ .

Für  $t > T_0$  entsteht eine Schwingung zwischen  $C$  und  $L$  mit deren Anfangsspannung  $u_{c_0}$  und dem Anfangsstrom  $i_{L_0}$ . Die Schwingungen der Spannung  $u_c$  sowie des Stromes  $i_c$  erfolgen mit der Eigenfrequenz  $f_e$ :

$$f_e = \frac{\nu}{2\pi}, \text{ wo } \nu = \sqrt{\nu_0^2 - \alpha_2^2} =$$

$$\sqrt{\frac{1}{C(L_{st} + L)} - \frac{R^2}{4(L + L_{st})^2}} \quad (20)$$

In der Regel kann  $L_{st}$  gegenüber  $L$  vernachlässigt werden. Für kleine  $R$  wird überdies

$$\nu \simeq \nu_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{T} \quad (20')$$

Mit den genannten Anfangswerten von  $u_l$  und  $i_{L_0}$  ergibt sich eine Amplitude des Schwingstroms, die sich einfach berechnen lässt zu:

$$i_{c \max} = i_{L \max} =$$

$$(u_l + E\sqrt{2} \cos \omega T_0) \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{T_0^*}{T}\right)^2} \quad (21)$$

$$\text{mit } T_0^* = T_0 \cdot \frac{u_{p_0} + E\sqrt{2}}{u_l + E\sqrt{2}}$$

Dabei gilt stets die Voraussetzung des ersten Ansprechens des Ableiters im Spannungsmaximum  $e = E$  (Fig. 5). Der Strom erreicht seinen höchsten Wert nach mehr als  $1/4$  und weniger als  $1/2$  der Periode der Eigenschwingung  $2\pi \sqrt{LC} = 2\pi T$ , d. h. für

$$\frac{\pi}{2} T < t_m < \pi T$$

Fig. 13 gibt den Spannungsverlauf an Stosskapazität und Transformator wieder. Die Figur ist der Fig. 6 durchaus analog, mit dem einzigen Unterschied der tiefern Eigenfrequenz  $f_e$ , weil an Stelle der frühern Streukapazität  $C_s$  nun die grosse Stosskapazität  $C$  getreten ist.

Praktisch kommt die Schwingung auch hier nicht voll zur Ausbildung, weil der Ableiter bei

irgendwelchen Spannungen  $u_{z1}$ ,  $u_{z2}$ ,  $u_{z3}$  wieder zündet.

Somit besteht gegenüber dem Fall b) nur ein zahlenmässiger Unterschied, nämlich jener, dass der Ableiter nicht bei einem Strom  $i_{L0}$  im Transformator rückzündet, sondern bei einem unter Um-

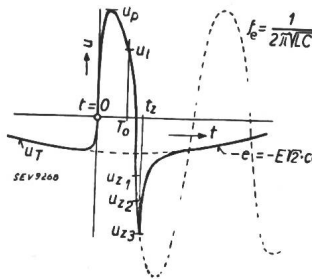


Fig. 13.

Wie Fig. 6, dagegen:

$f$ : Eigenfrequenz der Wechselstromquellen-Induktivität  $L$  mit der Stosskapazität  $C$ .

ständen grössern Zündstrom  $i_z$ , von dem infolge nicht näher bekannter Ansprechspannung (Rückzündspannung) des Ableiters nur gesagt werden kann, dass er zwischen  $i_{L0}$  und  $i_{Lmax}$ , d. h. im folgenden Bereich liegt<sup>1)</sup>:

$$i_{L0} < i_z < (u_l + E\sqrt{2} \cos \omega T_0) \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \frac{\sqrt{LC + T_0^2}}{LC} \\ \approx \frac{u_l + E\sqrt{2}}{L} \sqrt{LC + T_0^2}$$

Dabei haben wir wieder  $T_0 \approx t_z \ll \frac{1}{f}$  gesetzt, d. h. einen gegenüber der Betriebsperiode kurzdauernden Stoss angenommen. Durch Einführen des Stromes  $i_{L0} = \frac{1}{L}(u_{p0} + E\sqrt{2}) \cdot T_0$  kann auch geschrieben werden

$$i_{L0} < i_z < \frac{u_l + E\sqrt{2}}{u_{p0} + E\sqrt{2}} i_{L0} \cdot \frac{\sqrt{LC + T_0^2}}{T_0} = \\ = \frac{u_l + E\sqrt{2}}{u_{p0} + E\sqrt{2}} \cdot i_{L0} \cdot \frac{\sqrt{T^2 + T_0^2}}{T_0} \quad (22)$$

oder

$$\frac{i_z}{i_{L0}} = 1 \text{ bis } \frac{u_l + E\sqrt{2}}{u_{p0} + E\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{T^2 + T_0^2}}{T_0} \quad (22')$$

je nach dem Rückzündmoment.

Wir können somit alle unter b) abgeleiteten Werte auf den Fall c) übertragen, insbesondere Gl. (13)

$$i_z L = \int_{t_z}^{t_z + T_a} (u_{px} - E\sqrt{2} \cos \omega t) dt \quad (23)$$

und Gl. (14) mit Benützung von Gl. (22')

$$\frac{T_a}{T_0} = \frac{u_{p0} + E\sqrt{2}}{u_{pa} - E\sqrt{2}} \left[ 1 \text{ bis } \frac{u_l + E\sqrt{2}}{u_{p0} + E\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{T^2 + T_0^2}}{T_0} \right] \quad (24)$$

<sup>1)</sup> Herr Dr. Meyer, Baden, macht mich darauf aufmerksam, dass theoretisch auch erst Zündung im Maximum der in Fig. 13 gestrichelten Spannungskurve denkbar ist. Dort gilt  $i_L = i_z = 0$ , womit der Grenzfall festgelegt ist, in dem der Ausgleichsvorgang verschwindet ( $0 < i_z < i_{Lmax}$ ).

Ferner die in den Ableiter gesteckte Ausgleichsenergie entsprechend Gl. (16)

$$A_a = \frac{u_{pa} \cdot i_p \cdot T_a}{2} = \frac{u_{pa}}{E\sqrt{2}} \cdot \frac{(u_{p0} + E\sqrt{2})^2}{u_{pa} - E\sqrt{2}} \cdot \pi f I_K \sqrt{2} \\ \cdot \left[ T_0^2 \text{ bis } \frac{u_l + E\sqrt{2}}{u_{p0} + E\sqrt{2}} (T_0^2 + T^2) \right] \quad (25)$$

ebenso die entsprechenden Ausdrücke zu Gl. (17) und (18): Die relative Energieaufnahme durch den Ausgleichsvorgang bei der Prüfung eines Ableiters beträgt:

aus Gl. (17'') und (25)

$$\frac{A_a}{A_{st}} \approx 85 \frac{u_{pa}}{E^2} \frac{(u_{p0} + E\sqrt{2})^2}{u_{pa} - E\sqrt{2}} \cdot \frac{I_K}{i_{st}} \cdot f^2 \left[ T_0^2 \text{ bis } \frac{u_l + E\sqrt{2}}{u_{p0} + E\sqrt{2}} (T_0^2 + T^2) \right] \quad (26)$$

aus Gl. (18) und (25)

$$\frac{A_a}{A_{st}} \approx \pi \frac{u_{pa}}{E u_{p0}} \frac{(u_{p0} + E\sqrt{2})^2}{u_{pa} - E\sqrt{2}} \cdot f T_0 \cdot \frac{T_0}{T_H} \frac{I_K}{i_{st}} \left[ 1 \text{ bis } \frac{u_l + E\sqrt{2}}{u_{p0} + E\sqrt{2}} \frac{T_0^2 + LC}{T_0^2} \right] \quad (27)$$

Es ist ersichtlich, dass die Ausgleichsenergie im Ableiter im Fall c) gegenüber Fall b) höchstens im Maßstab

$$\frac{A_a}{A_{a0}} = \frac{u_l + E\sqrt{2}}{u_{p0} + E\sqrt{2}} \left[ \frac{T^2 + T_0^2}{T_0^2} \right]$$

zunimmt. Voraussetzung für obige Gleichungen ist stets, dass der Ausgleichsvorgang kurz sei gegenüber der Viertelperiode der Betriebsfrequenz, d. h.

$$T_0 \ll \frac{1}{f} \quad T = \sqrt{LC} \ll \frac{1}{f} \quad (28)$$

$u_l$  Löschspannung im Ableiter,

$u_{p0}$  Mittlere Restspannung des Ableiters während des Stoßstroms,

$E\sqrt{2}$  Scheitelwert der EMK, zugleich Wechselspannung im Moment, wo der Ableiter anspricht.

*Beispiel:* In Ergänzung des Beispiels unter b) sei hier noch  $T = \sqrt{LC} = 200 \mu s$ , ferner die Löschspannung  $u_l : E\sqrt{2}$

$= 1,2$ . Dann wird  $A_a : A_{a0} = 1$  bis  $2,2 \left[ \frac{200^2 + 136^2}{100^2} \right] = 1$  bis  $4,3$ .

Die Voraussetzung, dass  $T_0 \ll 1/f$  und  $T \ll 1/f$  ist auch für  $T$  noch erfüllt, indem  $200 \mu s \ll 5000 \mu s$ .

Mit  $T = \sqrt{LC} = 500 \mu s$  wird  $A_a / A_{a0}$  bereits  $= 1$  bis  $21,2$ .

Würde der Kreis  $LC$  noch langsamer schwingen, so dürfte nicht mehr während des ganzen Ausgleichsvorganges mit konstanter EMK  $e = E\sqrt{2}$  gerechnet werden; die Gl. (22)...(27) geben dann zu hohe Werte. Zur Berechnung müssten die Grundgleichungen 7—13—21—23 ausgewertet werden.

Es ist ersichtlich, dass im Fall des obigen Beispiels der Ausgleichsvorgang eine gewisse Rolle



spielt: Die Ausgleichsenergie kann das Mehrfache sowohl der reinen Stossenergie wie auch der Energie des Ableiter-Wechselstroms werden.

Bei dieser Rechnung ist der ohmsche Widerstand des Transformators vernachlässigt worden. Eine genaue Betrachtung müsste auch diesen und die dadurch bewirkte Dämpfung des Ausgleichsvorgangs berücksichtigen. Eine grundsätzliche Aenderung würde sich daraus nicht ergeben.

#### 4. Diskussion der Beanspruchung des Ableiters bei der Prüfung und durch langdauernden Blitzstrom.

Die *Ableitereigenschaften*, welche eine Rolle spielen, sind aus den Gl. (25)...(27) ersichtlich. Vor allem soll im Durchschnitt, oder noch besser in jedem Moment des Ausgleichsvorganges ein möglichst grosser Ueberschuss der Ableiter-Spannung  $u_{px}$  über die EMK  $e$  vorhanden sein. Beim Ansprechen im Spannungsmaximum speziell soll  $u_{px}$  möglichst grösser sein als der Scheitelwert  $E\sqrt{2}$ . Denn die Differenz  $(u_{px} - E\sqrt{2})$  bestimmt in der Hauptsache die Dauer des Ausgleichstroms im Ableiter. Da andererseits die grösste Restspannung  $u_p$  kleiner sein muss als die Isolationsfestigkeit der zu schützenden Anlage, ist in dieser Beziehung ein kleines Intervall  $u_p - u_{px}$ , d. h. ein möglichst ventilartiger Ableiter günstig.

Der *Einfluss der Prüfanlage* besteht zunächst darin, dass bei starker Wechselstromquelle  $I_k$  gross wird, weil die Streuung  $L$  klein wird. Bei näherem Zusehen ist dieser Einfluss vorhanden im Fall b), wo der Kapazitätsstrom mit dem Ableiterstrom im Moment  $t = T_0$  löscht und somit der Wert  $T = \sqrt{LC}$  nicht zu Bedeutung kommt. Es gilt dann der untere Grenzwert der Klammer, und demgegenüber wachsen  $A_a/A_{\sim}$  und  $A_a/A_{st}$  mit  $I_k$ , d. h. mit der Kurzschlussleistung der Prüfstromquelle.

Eine Grenze der Ableiter-Ausgleichsbeanspruchung wird offenbar erst dann erreicht, wenn die Voraussetzungen, die zu den Gl. (25)...(27) führen, nicht mehr erfüllt sind. Das ist der Fall, wenn im Schema Fig. 4 der Transformatorstrom  $i_L$  während der Stossdauer  $T_0$  annähernd die Grösse des Stossstromes  $i_c$  erreicht, d. h. wenn nicht mehr gilt  $i_L \ll i_c$  (Gl. 2'). Der Transformator kann in diesem Grenzfall den Ableiter vom Stossstrom wirksam entlasten, ihn aber anschliessend durch einen umgekehrt gerichteten Stoss belasten, dessen Dauer im

Verhältnis  $\left(\frac{u_{p0} + E\sqrt{2}}{u_{pa} - E\sqrt{2}}\right)$  grösser ist. Dieser Fall ist

zu erwarten bei der Prüfung von Ableitern mit starken Prüftransformatoren, insbesondere bei Ableitern kleiner Nennspannung (z. B. 1000 V). Darüber hinausgehend kann bei Niederspannungsableitern erfahrungsgemäss sogar der Fall auftreten, dass der Stoss die Wicklung des Transformators ohne Stauung durchfliesst, so dass der Ableiter überhaupt nicht anspricht. Für die Prüfung von Niederspannungsableitern darf somit die Kurzschlussleistung

des Prüftransformators einen gewissen Maximalwert nicht überschreiten.

Im Fall c) dagegen, wo der Kapazitätsstrom  $i_c$  länger dauert als der Stossstrom im Ableiter, wird in der Regel  $T = \sqrt{LC}$  grösser sein als  $T_0$ . Im Grenzfall, wo  $T \gg T_0$  ist, gilt der obere Grenzwert der Klammer und man erkennt, dass im Produkt  $I_k \cdot LC$  das Teilprodukt  $(I_k \cdot L)$  von der Grösse der Wechselstromquelle unabhängig wird. Somit wächst in diesem Grenzfall die Ausgleichsbeanspruchung des Ableiters nicht mit der Leistung der Wechselstromquelle, dagegen mit der Grösse der Kapazität  $C$ .

Der Einfluss der *Frequenz*  $f$  auf die Ausgleichsenergie  $A_a$  folgt aus Gl. (25): Im Fall b), wo  $T_0$  massgebend ist, nimmt  $A_a$  bei tieferer Frequenz ab, sofern die gleiche Wechselstrom-Prüfleistung, bzw.  $I_k$  zur Verfügung steht. Im Fall c) dagegen, wo  $T$  wesentlich wichtiger wird als  $T_0$ , ist zu bedenken, dass  $L$  bei gleicher Prüfleistung umgekehrt proportional der Frequenz ändert, so dass das Produkt  $f \cdot LC$  und damit  $A_a$  bei gleicher Prüfleistung oder gleichem Kurzschlussstrom  $I_k$  von der Frequenz nicht abhängen.

Die relative Bedeutung von  $A_a/A_{st}$  und  $A_a/A_{\sim}$  folgt aus den Gl. (26) und (27): Für  $A_a/A_{st}$  gilt das oben für  $A_a$  Gesagte.  $A_a/A_{\sim}$  nimmt mit fallender Frequenz ab, weil  $A_{\sim}$  mit fallender Frequenz wächst und zugleich auch  $A_a$  bei gleichem  $I_k$  mit fallender Frequenz sinkt (Fall b). Bei tieferer Frequenz sinkt somit die Bedeutung des Ausgleichsvorgangs.

*Langdauernder Stoss- oder Blitzstrom* ( $T_0$  und  $T_H$  gross) kommt auf eine grosse Dauer  $T_0$  heraus. Dieser Fall gehört somit zu den zuerst besprochenen, wo die Ableiterbeanspruchung mit der Grösse der Wechselstromquelle zunimmt. Die Auswertung des Falles  $T_0 > \frac{1}{f}$  soll hier nicht besprochen werden.

Im Gegensatz zur Stossbeanspruchung, für welche  $T_H$  massgebend ist, hängt die Ausgleichsbeanspruchung von der Gesamtdauer  $T_0$  des Stossstroms im Ableiter ab; denn während der Dauer  $T_0$  wird dem Transformator die gestörte Klemmenspannung  $u_{px}$  aufgedrückt, welche die Ursache des Ausgleichstroms ist.

#### 5. Vorläufige Diskussion der Ergebnisse für die Beanspruchung von Ableitern in Netzen.

Ein Einfluss des Netzes auf den Löschvorgang in Ableitern ist auf Grund der beschriebenen Erfahrungen grundsätzlich zu erwarten. Die bisherige Anschauung, wonach die Löschung eines Ableiters im Netz der Abschaltung eines Ohmschen Widerstands entspricht, ist deshalb ungenau, weil während des Stromflusses in diesem «Widerstand» eine vom Stossstrom erzwungene Klemmenspannung (Restspannung) dem Netz aufgedrückt wird.

Während die Berechnung des von dieser Fremd-EMK bewirkten Ausgleichsvorgangs im Prüfkreis einfach ist, entstehen aber bei der Berechnung des Ausgleichsvorgangs im ausgedehnten und verzweigten Netz beträchtliche rein mathematische Schwierigkeiten.

rigkeiten. Da andererseits auch noch keine experimentellen Bestätigungen über Art und Bedeutung des Netzeinflusses auf den Löschvorgang im Ableiter vorliegen, kann es sich hier nur um einen vorläufigen Vergleich des im Netz zu erwartenden Vorgangs mit dem experimentell abgeklärten Prüffeldfall handeln.

Vor allem ist hier daran zu erinnern, dass die Prüfung mit bis 20 % über die verkettete Betriebsspannung erhöhte Versuchs-Wechselspannung durchgeführt wird. Somit entspricht die Prüfung zunächst dem verschärften praktischen Fall des Ansprechens des Ableiters unter verketteter Spannung. Das trifft nur bei Netzen mit Polerdung (z. B. Fahrleitungen) betriebsmässig immer zu. Ähnlich ist es bei Netzen mit direkter Nullpunktserdung, sofern die Ableiter-Nennspannung tiefer als die verkettete Betriebsspannung gewählt wird. In Netzen ohne feste Nullpunktserdung (nicht geerdete und kompensierte Netze, also bei uns die Regel) kommt der dem Prüffall entsprechende schlimmste Betriebsfall nur vor, wenn während des Erdschlusses einer Phase Ableiter einer andern Phase ansprechen.

Das Hauptmerkmal des Netzes besteht wohl darin, dass hier parallel zum Ableiter stets mindestens eine Freileitung liegt. Sodann können die als einpolig geerdet vorausgesetzten Transformatoren sich mehr oder weniger weit entfernt vom blitzbetroffenen Ableiter befinden. Einige grundsätzliche Fälle sind in den Fig. 14...16 dargestellt.

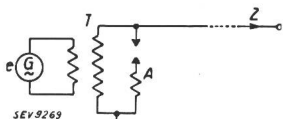


Fig. 14.

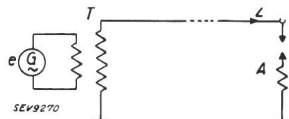


Fig. 15.

Fig. 14 hat mit dem Prüfkreis darin Ähnlichkeit, dass der Ableiter  $A$  sich unmittelbar beim geerdeten Transformator  $T$  befindet. Ein Ausgleichsstrom  $i_{L0}$  bzw.  $i_z$  wird daher im Transformator entstehen. Dagegen bleibt beim Löschen des Ableiters noch eine Leitung mit dem Wellenwiderstand  $Z$  am Transformator angeschlossen, durch welche der im Transformator entstandene Ausgleichsstrom abfliessen kann. Dabei entsteht die Leitungsspannung  $i_{L0} \cdot Z$  ( $Z$  = Wellenwiderstand des Leiters  $\cong 500$  Ohm). Ist diese Spannung kleiner als die Ansprechspannung des Ableiters, so entsteht keine Rückzündung; der Ausgleichsvorgang im Ableiter fällt weg. Ist die Spannung  $i_{L0}Z$  aber grösser als die Ansprechspannung, so entsteht ein ähnlicher Ausgleichsvorgang im Ableiter wie im Prüffeld. Von der Ausgleichsenergie im Ableiter lässt sich voraussagen, dass sie unter Voraussetzung gleicher Transforma-

tor-Kurzschlussleistung kleiner sein wird als im Prüffeld, weil mindestens ein Teil des Transformatorstromes auf die Leitung abfliesst, insbesondere, falls diese mehr als 10 km lang ist. Dieser Fall könnte im Prüffeld durch Zuschalten eines Ohmschen Widerstandes von 500 Ohm parallel zum Transformator nachgeahmt werden.

Fig. 15 zeigt einen Ableiter  $A$  am Ende einer langen unverzweigten Leitung  $Z$ . Beim Ansprechen entsteht auf der Leitung eine Wanderwelle mit der Höhe der Restspannung, die nach einiger Zeit auch zum geerdeten Transformator  $T$  gelangt. Der Ausgleichsstrom  $i_{L0}$  wird in veränderter Form wieder entstehen und es ist möglich, dass der Ableiter  $A$  beim Zurückfliessen der Welle  $i_{L0}Z$  zu einer Rückzündung veranlasst wird. Doch wird die im Leiter und insbesondere in der Erdrückleitung vorhandene Dämpfung die Ableiterbeanspruchung gegenüber dem Prüffeldfall eher vermindern.

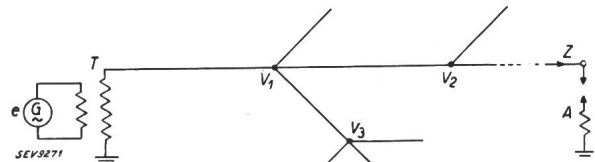


Fig. 16.

Fig. 16 zeigt schliesslich den Fall eines Ableiters  $A$  in einem vermaschten Netz, weit entfernt von geerdeten Transformatoren  $T$ . In diesem Fall wird von der auf der Leitung  $Z$  entstehenden Wanderwelle mit der Höhe der Restspannung nur ein unwesentlicher Bruchteil bis zum Transformator  $T$  gelangen. Der Ausgleichsvorgang wird hier jede praktische Bedeutung verlieren.

Im allgemeinen scheint daher die Ausgleichsbeanspruchung von Ableitern bei der Prüfung nach dem üblichen Schema (Fig. 4) grösser zu sein als im Netz. Es besteht in dieser Hinsicht eine Parallele bei der Prüfung von Hochleistungsschaltern. Im lokalen Prüfkreis entstehen dort im allgemeinen höhere Eigenfrequenzen der wiederkehrenden Spannung als in vermaschten Netzen. Vom dämpfenden Einfluss von Belastungswiderständen und Leitungen wird auch bei der Schalterprüfung abgesehen.

Nachdem sich nunmehr ein Einfluss des Prüfkreises auf den Löschvorgang im Ableiter erwiesen hat, dürfte es zweckmässig sein, den Löschvorgang auch in Netzen genauer abzuklären als dies bisher der Fall ist. Durch die vorliegende Untersuchung gewinnt auch die Frage nach der Gesamtdauer  $T_0$  von Blitzströmen wesentlich grössere Bedeutung. Weiter liefern die Betrachtungen einen Anhaltspunkt für die günstigste Bemessung und Konstruktion von Ableitern zur Reduktion ihrer Beanspruchung in Netzen.