SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

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

ADMINISTRATION:
Zürich, Stauffacherquai 36 ❖ Telephon 5 17 42
Postcheck-Konto VIII 8481

XXXII. Jahrgang | Nº 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 kleinerm 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 anderseits nach Verschwinden der Ueberspannung sofort oder bei einem natürlichen Nulldurchgang des nachfliessenden Netzstromes definitiv unterbricht.

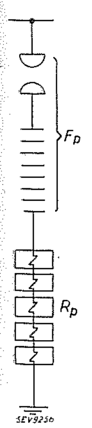


Fig. 1.
Prinzipschema eines Ueberspannungsableiters
R_p Spannungsabhängiger Widerstand.
F_p Funkenstrecke

Der strombegrenzende «Widerstand» des Ableiters muss stark spannungsabhängig sein, weil er einerseits bei Spannungen unterhalb der Ueberschlagspannung der zu schützenden Isolation Stoßströme von mehreren 1000 A ableiten muss (Blitzeinschlag in die Freileitungen), und weil er anderseits 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 spannungsabhängigen 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).

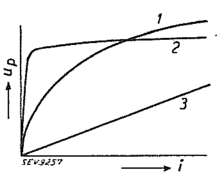


Fig. 2.
Restspannung-Strom-Charakteristiken (Schutzkennlinien).
1 Spannungsabhängiger Widerstand (allgemein)
2 Ventilartiger Widerstand
3 Ohmscher Widerstand

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 anderseits auch so vorgehen, dass während eines einzigen Stromstosses die in jedem Moment zusammengehörigen Strom-Spannungs-Werte 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. Aehnlich 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 gemessenen Strom-Spannungs-Verlaufs an einem modernen Ableiterwiderstand. Im Gegensatz zur spitzigen 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.

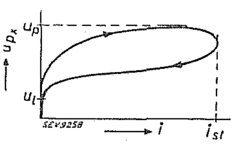


Fig. 3.
Stoss-Charakteristik (Klemmenspannung-Strom) eines spannungsabhängigen Widerstands

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.

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 [1]).

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.

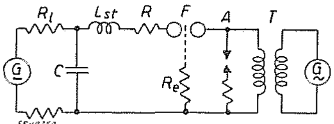


Fig. 4a.

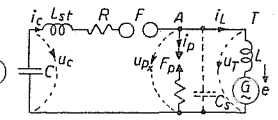


Fig. 4b.

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
$G_\sim$ Wechselstromquelle
T Transformator
L Induktivität der Wechselstromquelle samt Transformator
C_s Streukapazität der Wechselstromquelle
R_e 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-

[1]) 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

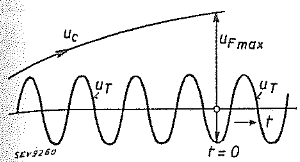


Fig. 5.
Spannungsverlauf beider Elektroden der Funkenstrecke F.
u_c Ladespannung der Stosskapazität C
u_T Wechselspannung des Transformators T
$u_F = u_c - u_T$ Spannung über die Funkenstrecke

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 Stossfunkenstrecke F wird die auf u_c geladene Stossbatterie 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 Stosskreises C—R—L_{st}—A ergeben. Dieser Kreis wird so eingestellt, dass die gewünschten Werte der Stossprüfströme 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 Stossvorgang 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 Löschversuch.

a) Ausgleichsvorgang während der Dauer des Stossstroms 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)

$$i_c = i_p + i_L, \tag{2}$$

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

$$u_{px} = u_T = L \cdot \frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t} - e \tag{3}$$

$$\text{solange } i_p > 0, \text{ ist auch } u_{px} > 0, \tag{4}$$

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

Für $i_p < 0$ würde dagegen $u_{px} < 0$, z. B. $= - u_v$. Infolge der vom Stosskreis an den Transformator T gelegten Ableiter-Klemmenspannung u_{px} muss nach Gl. (3) im Transformator T ein Strom entstehen, der gegeben ist durch

$$\frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t} = \frac{e + u_{px}}{L} \quad \text{oder} \quad i_L = \frac{1}{L}\int_0 (e + u_{px})\,\mathrm{d}t \tag{6}$$

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

$$\frac{\mathrm{d}i_L}{\mathrm{d}t} = \frac{E\sqrt{2}\cos\omega t + u_{px}}{L} \quad \text{und}$$

$$i_L = \frac{1}{L}\int_0^t (E\sqrt{2}\cos\omega t + u_{px})\,\mathrm{d}t \tag{7}$$

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

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

Darin bedeuten:

$$\left.\begin{array}{l}
E \text{ die EMK (Effektivwert),} \\
T_0 \text{ die Gesamtdauer des Stoßstromes im Ableiter, } T_0 \ll \frac{1}{f} \\
u_{p0} \text{ die mittlere Restspannung am Ableiter während der Zeit } T_0, \\
u_{p0} = \frac{1}{T_0} \cdot \int_0^{T_0} u_{px} \cdot \mathrm{d}t, \\
L \text{ die Streuinduktivität der speisenden Wechselstromquelle,} \\
i_{L0} \text{ Transformatorstrom am Ende der gesamten Stoßstromdauer im Ableiter.}
\end{array}\right\} \tag{9}$$

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:

$$L \simeq \frac{E\sqrt{2}}{\omega I_K\sqrt{2}} = \frac{E^2}{\omega P_K} = \frac{\varepsilon E^2}{\omega P}$$

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

ε = 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

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

$$i_{L_0} = (1+2)\cdot 2\cdot\pi\cdot 50\cdot 1000\cdot 100\cdot 10^{-6} \cong 94\ \text{A}.$$

Dieser Strom ist klein gegenüber den üblichen Stoßströmen.

b) *Ausgleichsvorgang nach dem gleichzeitigen Löschen des Stoßstroms im Ableiter und im Stossgenerator.*

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 momentan 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

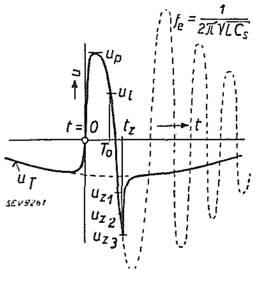


Fig. 6.
Spannungsverlauf beim Ansprechen eines Ableiters im Prüfkreis nach Fig. 4.
u_T Spannung am Transformator T
u_p Restspannung am Ableiter A nach dem Ansprechen im Moment $t = 0$.
u_l Löschspannung am Ableiter im Zeitpunkt $t = T_0$.
u_{z1} - u_{z2} - u_{z3} Spannungswerte von Rückzündungen im Zeitpunkt $t = t_z$.

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

$$u_{T\,max} \simeq i_{L0}\sqrt{\frac{L}{C_s}} \tag{10}$$

z. B. $L = 0{,}03$ H, $C_s = 1000$ pF, $i_{L0} = 94$ A, $u_{T max} \cong 520$ 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.

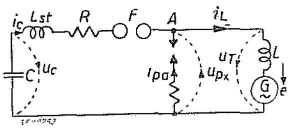


Fig. 7.
Prinzipschema des Prüfstromkreises während des Ausgleichsvorgangs im Ableiter $(t > t_z)$.

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

Dann gilt:

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

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

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

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:

$$-L\int_{t_z}^{t_z+t'} di_L = L\,(i_{L_0} - i_L) = \int_{t_z}^{t_z+t'} (u_{px} - e)\ dt \tag{12}$$

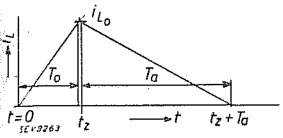
i_L wird zu Null für einen Zeitpunkt $t = t_z + T_a$:

$$L\,i_{L_0} = \int_{t_z}^{t_z+T_a} (u_{px} - e)\,dt = \int_{t_z}^{t_z+T_a} (u_{px} - E\sqrt{2}\cos\omega t)\ dt \tag{13}$$

Setzen wir den Mittelwert der Restspannung des Ausgleichs $u_{pa} = \frac{\int_{t_z}^{t_z+T_a} u_{px}\cdot dt}{T_a}$ und machen die Voraussetzung, dass $T_a \ll {}^1/_f$ und somit $e = E\sqrt{2}\cos\omega t \simeq E\sqrt{2}$, so folgt $Li_{L_0} = (u_{pa} - E\sqrt{2})\,T_a$, oder durch Einsetzen des Wertes i_{L0} aus Gl. (8):

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

Dieses Resultat liegt sehr nahe: Zum Entstehen des Stromes i_{L0} ist der Spannungsimpuls $T_0 \cdot (u_{po} + E\sqrt{2})$ 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_{p0} 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



T_0 Dauer des Stoßstroms im Ableiter
T_a Dauer des Ausgleichsstroms im Ableiter
t_z Zeitpunkt der Rückzündung des Ableiters
i_{L0} Transformatorstrom am Ende der Stossdauer

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 $\frac{T_a}{T_0} = \frac{2+1}{1{,}5-1} = 6$, $T_a = 600\ \mu s$.

Die Dauer von T_a ist ein Vielfaches von T_0 und würde nach Gl. (13) für $u_{pa} = E\sqrt{2}$ sogar ∞, weil dann i_L nicht abnehmen kann. Doch ist die Voraussetzung $T_a \langle\langle 1/f$ 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

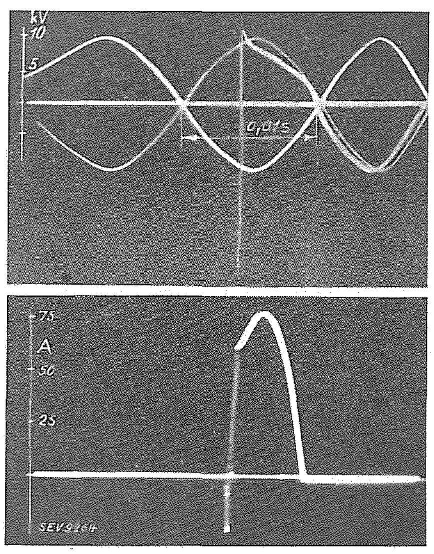


Fig. 9.
Beispiel eines Ableiters, dessen Löschspannung etwas unter die Wechselstrom-EMK sinkt.
Oben Spannungskurve
Unten Stromkurve.
Die anfängliche Zunahme des Ausgleichsstroms ist deutlich ersichtlich: Ausgleichsbeanspruchung hoch.
(Der Stoßstrom wird durch die kurze Spitze nach unten nicht maßstäblich 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-

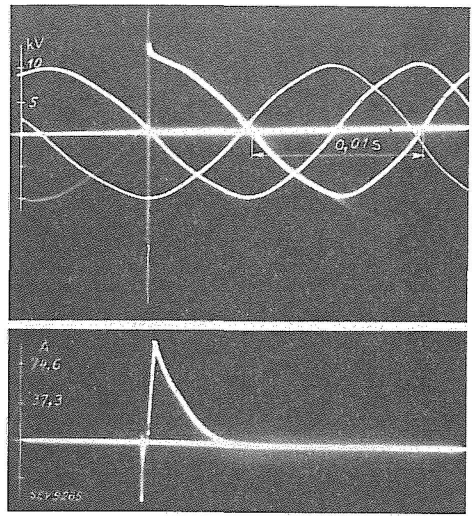


Fig. 10.
Ueblicher Ausgleichsvorgang beim Löschen des Ableiterstroms
($L \simeq 0{,}03$ H, $C \simeq 1\ \mu F$)
Oben Spannungskurve
Unten Stromkurve (vergleiche Fig. 8).

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-

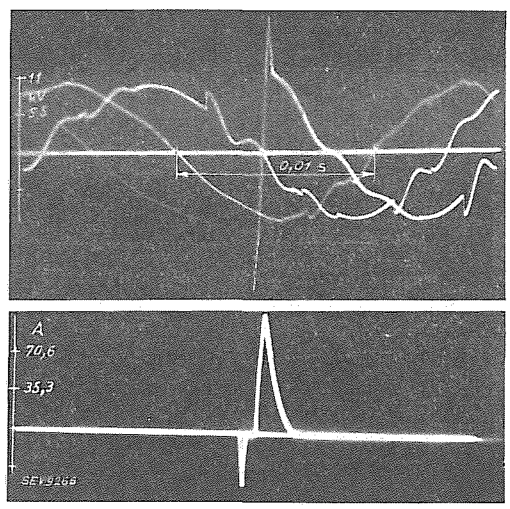


Fig. 11.
Ueblicher Ausgleichsvorgang beim Löschen eines Ableiterstroms ($L \simeq 0{,}03$ H, $C \simeq 9\ \mu F$).
Oben Spannungskurve
Unten Stromkurve (vergleiche Fig. 8).
Infolge der kleinern Eigenfrequenz f_0 wird die Strompause bis zum Rückzündmoment merklich länger (vergleiche Fig. 10).

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

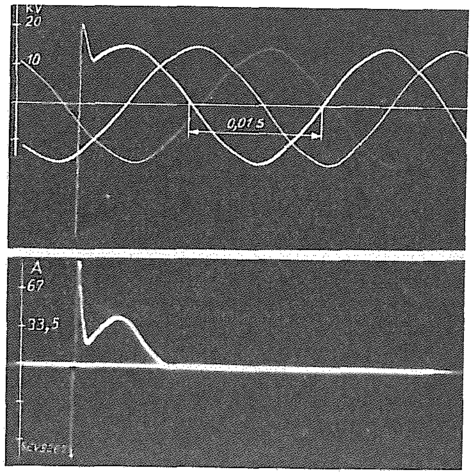


Fig. 12.
Ausgleichsvorgang beim Löschen des Stroms eines Ableiters, dessen Ansprechen vor Erreichen des Scheitelwerts der Wechselspannung erfolgt.
Oben Spannungskurve
Unten Stromkurve.
Infolge des raschen Rückgangs des Ausgleichsstroms wird anschliessend der «Ableiterwechselstrom» deutlich sichtbar.

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 Löschversuch 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 $i_\sim$ » 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 $i_\sim$ » bezeichnet. Zunächst soll nun noch die infolge des Ausgleichsvorganges dem Ableiter vom Transformator zugeführte Energie A_{a0} berechnet werden.

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

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

$$A_{a0} = \int_{t_z}^{t_z+T_a} u_{px}\left(i_{L0} - \frac{u_{pa}-E\sqrt{2}}{L}\cdot t\right)dt$$

$$\cong u_{pa}\left(i_{L0}T_a - \frac{u_{pa}-E\sqrt{2}}{L}\cdot\frac{T_a^2}{2}\right)$$

$$\simeq u_{pa}\left(\frac{u_{p0}+E\sqrt{2}}{L}\cdot T_0T_a - \frac{u_{pa}-E\sqrt{2}}{L}\cdot\frac{1}{2}\,T_a^2\right)$$

$$A_{a0} \simeq u_{pa}\cdot\frac{(E\sqrt{2}+u_{p0})^2}{u_{pa}-E\sqrt{2}}\cdot\frac{1}{2}\frac{T_0^2}{L} =$$

$$\frac{u_{pa}}{E\sqrt{2}}\cdot\frac{(u_{p0}+E\sqrt{2})^2}{u_{pa}-E\sqrt{2}}\cdot\frac{\omega I_K\sqrt{2}}{2}\cdot T_0^2$$

$$\simeq \pi\cdot\frac{u_{pa}}{E}\cdot\frac{(u_{p0}+E\sqrt{2})^2}{u_{pa}-E\sqrt{2}}\cdot f\cdot I_K\cdot T_0^2$$

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

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

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

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 $i_\sim$ (Scheitelwert).

Unter der Annahme eines sinusförmigen Stroms $i'_{\sim x} = i_\sim\cdot\cos\omega t$ (Widerstand nicht spannungsabhängig) würde

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

und somit

$$\frac{A_{a0}}{A'_{\sim}} = 8\pi f^2 \cdot \frac{u_{pa}}{E^2}\,\frac{(u_{p0}+E\sqrt{2})^2}{u_{pa}-E\sqrt{2}} \cdot \frac{I_K\sqrt{2}}{i_{\sim}} \cdot T_0^2$$

$$\simeq 36\,\frac{u_{pa}}{E^2}\,\frac{(u_{p0}+E\sqrt{2})^2}{u_{pa}-E\sqrt{2}} \cdot \frac{I_K}{i_{\sim}} \cdot f^2 T_0^2 \tag{17'}$$

Wird dagegen der Ableiterwechselstrom $i''_{\sim} = i_{\sim} \cdot \cos 3\,\omega t$ 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

$$\frac{A_{a0}}{A''_{\sim}} \simeq 6\pi^2 f^2 \cdot \frac{u_{pa}}{E^2} \cdot \frac{(u_{p0}+E\sqrt{2})^2}{u_{pa}-E\sqrt{2}} \cdot \frac{I_K\sqrt{2}}{i_{\sim}} \cdot T_0^2$$

$$\simeq 85\,\frac{u_{pa}}{E^2}\,\frac{(u_{p0}+E\sqrt{2})^2}{u_{pa}-E\sqrt{2}} \cdot \frac{I_K}{i_{\sim}} \cdot f^2 T_0^2 \tag{17''}$$

Schliesslich interessiert noch der Vergleich der Ausgleichsenergie mit der Stossenergie A_{st}, welche sich darstellen lässt als $A_{st} \cong u_{p0}\, i_{st}\, T_H$, wo

u_{p0} mittlere Restspannung während des Stosses,
i_{st} Scheitelwert des Stoss-Stromes (Fig. 3),
T_H Halbwertdauer des Stoss-Stromes,

somit

$$\frac{A_{a0}}{A_{St}} = \frac{u_{pa}}{E\,u_{p0}} \cdot \frac{(u_{p0}+E\sqrt{2})^2}{u_{pa}-E\sqrt{2}} \cdot \pi f T_0 \cdot \frac{T_0}{T_H} \cdot \frac{I_K}{i_{St}} \tag{18}$$

Beispiel: Wie früher sei $T_0 = 100\,\mu s$, $f = 50$ Hz, $T_H = 30\,\mu s$, $I_k\sqrt{2} = 1000$ A, $i_{\sim} = 20$ A. $i_{st} = 5000$ A, $u_{p0} = 2E\sqrt{2}$, $u_{pa} = 1{,}5\,E\sqrt{2}$.

$$\frac{A_{a0}}{A_{\sim}} \cong 85 \cdot \frac{3^2 \cdot 1{,}5}{0{,}5} \cdot \frac{1000}{20\sqrt{2}} \cdot 2500 \cdot 10^{-8} \simeq 2{,}0$$

$$\frac{A_{a0}}{A_{st}} \cong \frac{1{,}5}{2} \cdot \frac{3^2}{0{,}5}\,\pi \cdot 50 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{100}{30} \cdot \frac{706}{5000} \simeq 0{,}10.$$

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 Verhältnis $\frac{I_K}{i_{\sim}}$ 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 Funkenstrecke 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 $i_{pa} = 0$):

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

$$\text{Für } t = T_0:\; u_{c0} - \left(L_{St}\frac{di_c}{dt} + i_c R\right) = u_l.$$

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

wird somit $u_{c0} \simeq u_l$ = Löschspannung des Ableiters A.

Für $t > T_0$ entsteht eine Schwingung zwischen C und L mit deren Anfangsspannung u_{c0} und dem Anfangsstrom i_{L0}. Die Schwingungen der Spannung u_c sowie des Stromes i_c erfolgen mit der Eigenfrequenz f_e:

$$f_e = \frac{\nu}{2\pi},\ \text{wo}\ \nu = \sqrt{\nu_0^2 - \alpha_2} = \sqrt{\frac{1}{C\,(L_{St}+L)} - \frac{R^2}{4\,(L+L_{St})^2}} \tag{20}$$

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

$$\nu \simeq \nu_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{T} \tag{20'}$$

Mit den genannten Anfangswerten von u_l und i_{L0} ergibt sich eine Amplitude des Schwingstroms, die sich einfach berechnen lässt zu:

$$i_{c\,max} = i_{L\,max} = (u_l + E\sqrt{2}\cos\omega T_0) \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{T_0^*}{T}\right)^2} \quad \text{mit}\ T_0^* = T_0 \cdot \frac{u_{p0} + E\sqrt{2}}{u_l + E\sqrt{2}} \tag{21}$$

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-

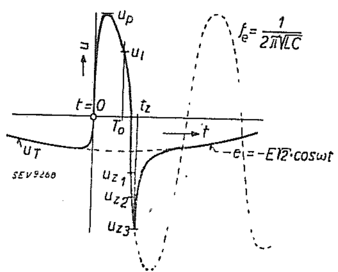


Fig. 13.
Wie Fig. 6, dagegen:
f_e Eigenfrequenz der Wechselstromquellen-Induktivität L mit der Stosskapazität C.

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 [1]:

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

Dabei haben wir wieder $T_0 \simeq t_z \ll \frac{1}{f}$ 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

$$i_{L0} < i_z < \frac{u_l + E\sqrt{2}}{u_{p0}+E\sqrt{2}}\, i_{L0}\cdot\frac{\sqrt{LC+T_0^{*2}}}{T_0} =$$
$$= \frac{u_l + E\sqrt{2}}{u_{p0}+E\sqrt{2}}\cdot i_{L0}\,\frac{\sqrt{T^2+T_0^{*2}}}{T_0} \tag{22}$$

oder

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

je nach dem Rückzündmoment.

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

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

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

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

[1]) 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 $(0 < i_z < i_{L\,max})$.

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

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

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)

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

aus Gl. (18) und (25)

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

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.

$$T_0 = \ll \frac{1}{f} \qquad T = \sqrt{LC} \ll \frac{1}{f} \tag{28}$$

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 $T = \sqrt{LC} = 200$ µs, ferner die Löschspannung $u_l : E\sqrt{2} = 1{,}2$. Dann wird $A_a : A_{a0} = 1$ bis $\frac{2{,}2}{3}\left[\frac{200^2+136^2}{100^2}\right] = 1$ bis 4,3. Die Voraussetzung, dass $T_0 \ll 1/f$ und $T \ll 1/f$ ist auch für T noch erfüllt, indem 200 µs ≪ 5000 µs.

Mit $T = \sqrt{LC} = 500$ µs 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 anderseits 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) führten, 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. Da anderseits 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 erhöhter 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. Aehnlich 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.

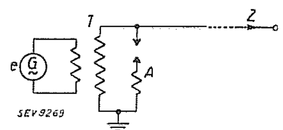


Fig. 14.

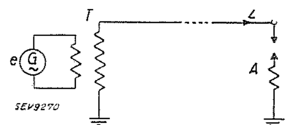


Fig. 15.

Fig. 14 hat mit dem Prüfkreis darin Aehnlichkeit, 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 Transformator-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.

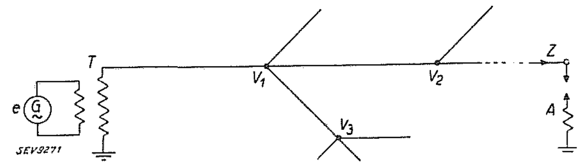


Fig. 16.

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.