

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 33 (1942)
Heft: 4

Artikel: Der Ausgleichsvorgang beim Ansprechen von Ueberspannungsableitern und seine Berechnung unter Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit der Widerstände
Autor: Meyer, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061637>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 03.04.2025

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

fahren auskommen kann, oder ob es zweckmässiger ist, solche Verbindungen nach dem im Ausland schon häufig angewandten Schweissverfahren herzustellen.

Herr B. Rey, Elektra Birseck, Münchenstein: Mit Aluminium-Lötverbindungen haben wir bereits Versuche gemacht bei Kabelmuffen und andern. Ich glaube, es ist den Herren allen bereits bekannt, dass die Kabelwerke ein Lötmetall herausgebracht haben, ähnlich wie Zinn, und ein pulverförmiges hygroskopisches Salzgemisch als Bindemittel, welches aus der Flammenfärbung zu schliessen wahrscheinlich eine Kalium-Metallsalz-Verbindung ist. Es lässt sich damit sehr gut löten. Man muss die Lötstelle vorher sorgfältig reinigen, mit Asbest abbinden, auf schätzungsweise 350° erwärmen und dann ganz leicht löten. Wir haben, wie gesagt, bereits einige Versuche mit Aluminium-Kupfer-Verbindungen gemacht; die Lötstellen sind sehr gut gelungen, nur müssen nachher die Verbindungsstellen verstrichen und vollständig verschlossen werden. Das scheint mir nun eine etwas kritische Sache zu sein. Die Kabelfabriken verlangen, dass die Enden mit einem Lack oder etwas ähnlichem vollständig überdeckt werden. Gefühlsmässig fragt man sich, warum man das machen muss. Es scheinen also Verbindungen zu sein, die sich an der Luft nicht vollständig halten. Das in wässriger Lösung sonst neutrale Bindemittel erzeugt aber beim Erhitzen stark saure Dämpfe. Dieses Lötmetall läuft nun leicht in die verseilten Kabeladern hinein, möglicherweise bis tief in die Isolation. Ob hier mit der Zeit eventuell Schäden an Metall oder an der Isolation zu beobachten sind, kann ich nicht beurteilen. Ueber den ganzen Lötvorgang ist von den Kabelfabriken eine ausführliche Anleitung erhältlich⁴⁾.

Der Vorsitzende: Je remercie M. Rey et puis dire que dans les câbleries on soude couramment les fils d'aluminium entre eux. Les fils étant chauffés pour effectuer la soudure, ils subissent un recuit qui diminue leur résistance mécanique

⁴⁾ Vgl. Bulletin SEV 1941, Nr. 24, S. 664—667.

dans le voisinage immédiat de la soudure. C'est pourquoi il ne faut pas admettre plus d'une soudure dans la même section d'un câble pour ligne aérienne; il faut si possible employer des fils assez longs pour faire la longueur complète d'un câble; si des soudures sont inévitables, il faut les espacer le plus possible le long du câble.

Les fabriques de machines qui font des bobinages en aluminium soudent aussi couramment ce métal.

Herr R. Iselin, EW Basel: Herr Kleiner hat von der Korbbildung gesprochen, eine Erscheinung, die zum Glück sehr selten und nur bei Höchstspannweiten auftritt. Nach unseren Erfahrungen auf der 40 km langen Freileitung (150 kV) Bickigen-Basel kann Korbbildung auftreten bei ganz grossen Ueberlastungen der Stahl-Aluminium-Seile durch Rauhreif und Schnee. Bei solchen Ueberbeanspruchungen machen beide Leitermaterialien die gleiche Längenänderung mit. Weil sich die Stahlseele nach der Entlastung, infolge ihrer Elastizität, annähernd wieder auf die ursprüngliche Länge einstellt — was bei dem Aluminiumleiter nicht der Fall ist —, finden örtliche Aufstauhungen im Drall der Aluminiumdrähte, die sogenannte Korbbildung, statt.

Der Vorsitzende: Je puis ajouter ce que beaucoup d'entre vous savent aussi, qu'on soude actuellement des fils d'aluminium simplement en présentant bout à bout leurs extrémités chauffées jusqu'à la fusion. Il n'est fait emploi d'aucune poudre à souder ou autre produit. Pour effectuer l'opération il faut évidemment être outillé convenablement et acquérir l'habileté nécessaire; c'est un travail délicat qu'on ne réussit pas du premier coup.

Personne ne demandant plus la parole je voudrais vous dire, avant de clore cette discussion, que chacun de vous est libre de faire à la séance de cet après-midi toutes les communications qu'il lui plaira et en particulier de répéter celles qui viennent d'être faites.

Je lève notre assemblée en remerciant sincèrement tous ceux qui ont alimenté la discussion et aussi ceux qui lui ont prêté leur attention.

Der Ausgleichsvorgang beim Ansprechen von Ueberspannungsableitern und seine Berechnung unter Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit der Widerstände

Von H. Meyer, Baden

621.316.933

Beim Ansprechen von Ableitern, die betriebsmässig an eine Wechselfspannung (Netz) geschaltet sind, entstehen, wie K. Berger erstmals gezeigt hat, Ausgleichsvorgänge, die die Ableiter mehr beanspruchen, als bisher angenommen wurde. In diesem Aufsatz sollen die Betrachtungen Bergers ergänzt werden, einerseits durch Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit der Ableiterwiderstände, andererseits durch die an Hand eines durchgerechneten Beispiels ermöglichte Beurteilung der verschiedenen massgebenden Grössen.

K. Berger a montré pour la première fois que les parafoudres reliés normalement à un réseau à courant alternatif sont, lorsqu'ils fonctionnent, le siège de processus d'équilibre qui sollicitent beaucoup plus fortement le parafoudre qu'on ne le pensait. L'auteur de cet article complète les considérations de K. Berger, d'une part en tenant compte de la relation qui existe entre la tension et la résistance du parafoudre et, d'autre part, en interprétant, à l'aide d'un exemple numérique, les différentes grandeurs qui entrent en jeu.

I. Einleitung

Beim Ansprechen von Ableitern, die betriebsmässig an eine Wechselfspannung (Netz) geschaltet sind, haben diese nicht nur den kurzzeitigen Stossstrom abzuleiten und hierauf den durch die Netzspannung erzeugten und durch die Widerstandscharakteristik auf einen kleinen Wert begrenzten stationären betriebsfrequenten Strom bis zur Löschung auszuhalten, sondern sie werden noch durch Ausgleichsvorgänge beansprucht, worauf K. Berger¹⁾ erstmalig hingewiesen hat. Zweck dieser Ausführungen soll sein, in Anbetracht der Wichtigkeit des Problems die Betrachtungen Bergers in dem Sinne zu ergänzen, dass einerseits die Ausgleichs-

vorgänge berechnet werden bei Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit der Ableiterwiderstände, und dass andererseits an Hand von Beispielen eine Beurteilung der Bedeutung der verschiedenen mitspielenden Grössen ermöglicht wird.

2. Allgemeines über den Ausgleichsvorgang

Der Ausgleichsvorgang kommt dadurch zustande, dass während der Ableitung des Stoßstromes, wobei am Ableiter die Restspannung besteht, auch ein Strom in die Induktivität der speisenden Anlage (Transformator) fliesst; dieser Induktivitätsstrom und die damit verbundene magnetische Energie kann nach beendigter Ableitung des Stoßstromes nicht plötzlich verschwinden, sondern verursacht

¹⁾ Bull. SEV 1941, Nr. 12, S. 257.

im allgemeinen eine Rückzündung des Ableiters und ein Abklingen des Induktivitätsstromes über den Ableiterwiderstand.

Betrachten wir die Verhältnisse, die z. B. beim Löschversuch bestehen, an Hand der Fig. 1. Der Stoßstrom wird vom Kondensator C über die Induktivität L_{St} , den Dämpfungswiderstand R_{St} , die Funkenstrecke F und den Ableiter A zur Erde ge-

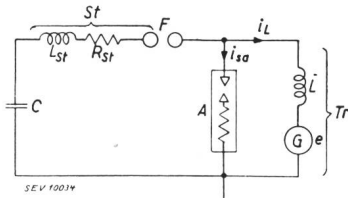


Fig. 1. Schaltschema der Löschprüfung eines Ableiters.

St Stossanlage. C Stosskapazität. L_{St} Induktivität des Stosskreises. R_{St} Widerstand des Stosskreises. A Ableiter. L Streuung des Transformators. F Trennfunkensstrecke. Tr Speisetransformator. G Ersatzspannungsquelle des speisenden Netzes (Speisetransformator). e EMK des Netzes.

führt. Während der Stoßstrom i_{su} durch den Ableiter fließt, besteht am Ableiter die Restspannung u_p , und es muss im speisenden Transformator, welcher an einem unendlich starken Netz angeschlossen gedacht ist und durch die EMK e und die Streuinduktivität L dargestellt wird, ein Strom i_L zu fließen beginnen. Für den weiteren Verlauf der Vorgänge ist es nun wichtig, ob nach Beendigung des Stossvorganges die Funkenstrecke F löscht und der Stossgenerator wieder vom Netz getrennt ist, oder ob die Netzspannung den Lichtbogen an der Funkenstrecke weiter bestehen lässt. Wir werden unsere weiteren Betrachtungen hauptsächlich auf den ersten Fall der nach dem Stoss abgetrennten Stossanlage beziehen, da dies den Verhältnissen im praktischen Betrieb entspricht, wo die Ueberspannungen ja nicht durch eine Stossanlage, sondern durch den Blitz verursacht werden und der Blitz nach erfolgter Ableitung die Vorgänge im Netz auch nicht mehr beeinflusst.

Nachdem nun der Stoßstrom abgeleitet ist, kann der Induktivitätsstrom i_L nicht plötzlich verschwinden, sondern es entsteht in L eine solche Spannung $L \cdot \frac{di}{dt}$, dass der Ableiter wieder anspricht und der Strom i_L über den Ableiter abklingen kann. Wie Fig. 2a und 2b zeigen, ergibt sich für den Ableiter die grösste Beanspruchung, wenn der Stoss die um-

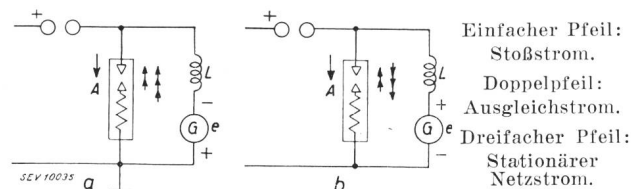


Fig. 2.

Stoss-, Ausgleichs- und stationäre Ströme im Ableiter bei verschiedener Synchronisierung des Zündstosses.

gekehrte Polarität der momentanen Netz-EMK aufweist und im Moment des Scheitelwertes der Netzspannung erfolgt, weil dann der Ausgleichstrom den grössten Wert annimmt (vgl. den folgenden Abschnitt) und mit dem stationären nachfliessenden Strom im gleichen Sinne fließt, beide somit ohne

Unterbruch ineinander übergehen und einen lange dauernden, resultierenden nachfliessenden Strom ergeben. Die folgenden Berechnungen beziehen sich daher vor allem auf diesen ungünstigen Fall; sie sind jedoch ohne Schwierigkeit auch auf andere Stosszeitpunkte anwendbar.

3. Die Amplitude des Induktivitätsstromes

a) Berechnung

Der Ausgleichstrom entsteht dadurch, dass während der Dauer des Ableitstromes die Restspannung u_p in Serie mit der EMK e einen Strom i_L nach Fig. 3 entstehen lässt, dessen Anstieg durch die Streuinduktivität L und den Transformatorwiderstand R bestimmt ist. Da die Dauer des abgeleiteten

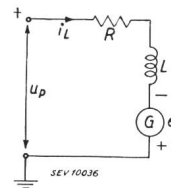


Fig. 3.

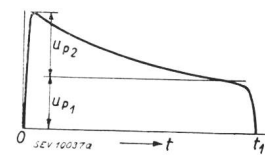


Fig. 4.

Fig. 3. Schaltung beim Entstehen des Induktivitätsstromes. Fig. 4. Verlauf der Restspannung am Ableiter während des Stossvorganges.

u_p Restspannung am Ableiter. u_{p1} Konstanter Teil der Restspannung. u_{p2} Abklingender Teil der Restspannung. R Widerstand des Speisetransformators. L Induktivität des Speisetransformators. e EMK des Speisetransformators.

Stoßstromes und damit der Restspannung u_p im allgemeinen sehr viel kleiner ist als eine Halbwelle der Netzspannung, so kann für die Berechnung die EMK e als konstant und für den ungünstigsten Fall gleich dem Scheitelwert $E \cdot \sqrt{2}$ der Netzspannung angenommen werden. Die Restspannung u_p ist für jeden Ableitstrom aus den Widerstandscharakteristiken bekannt; sie hat wegen der Spannungsabhängigkeit der Ableiterwiderstände und der Schleifenform ihrer Charakteristik im allgemeinen eine Form ähnlich Fig. 4. Zur Berechnung denken wir uns die Restspannung zusammengesetzt aus einem über die Stossdauer t_1 konstanten Anteil u_{p1} und einem mit der Zeitkonstanten T_u exponentiell abklingenden Anteil u_{p2} , so dass die den Induktivitätsstrom i_L erzeugende Spannung den folgenden Verlauf aufweist:

$$u = E \cdot \sqrt{2} + u_{p1} + u_{p2} \cdot e^{-\frac{t}{T_u}} \quad (1)$$

Die Zeitdauer t_1 , während der diese den Strom i_L erzeugende Spannung wirkt, kann zu ca. fünfmal der Zeitkonstanten T_i entsprechend dem ca. 7fachen der Halbwertsdauer T_H des Stoßstromes angenommen werden ²⁾:

$$t_1 \approx 5 T_i \approx 7 T_H \quad (2)$$

Bezeichnen wir die Zeitkonstante des Transformators mit T_0 , also

$$T_0 = \frac{L}{R} \quad (3)$$

²⁾ Die Zeit t_1 entspricht also derjenigen Zeit, die von Berger als «Gesamtdauer des Stoßstromes» eingeführt wurde.

so ergibt sich der Spannungsanstieg des Stromes i_L aus der Gleichung

$$i_L = \frac{u_{p1} + E \cdot \sqrt{2}}{R} \cdot \left(1 - \varepsilon^{-\frac{t}{T_0}}\right) + \frac{u_{p2}}{R} \left(\frac{T_u}{T_0 - T_u}\right) \left(\varepsilon^{-\frac{t}{T_0}} - \varepsilon^{-\frac{t}{T_u}}\right) \quad (4)$$

Der Endwert i_{L0} des Induktivitätsstromes ergibt sich durch Einsetzen der Zeit $t = t_1$ in die Gl. (4).

b) Beispiel

Bei der Löschprüfung eines Ableiters für 6,4 kV Nennspannung mit 2500 A Stoßstrom lagen die folgenden Daten vor:

$$\begin{aligned} E \cdot \sqrt{2} &= 7700 \sqrt{2} = 10900 \text{ V} \\ u_{p1} &= 8560 \text{ V} \\ u_{p2} &= 16500 \text{ V}, \quad T_u = 43 \mu\text{s} \\ L &= 0,03 \text{ H} \\ R &\approx 1 \Omega \quad \left. \vphantom{\begin{matrix} L \\ R \end{matrix}} \right\} T_0 = 30000 \mu\text{s} \\ t_1 &= 250 \mu\text{s} \end{aligned}$$

Es ergibt sich daraus $i_{L0} = i_1 + i_2 = 161 + 23 = 184 \text{ A}$, während mit oszillographischen Aufnahmen Ströme bis zum Wert von 177 A festgestellt wurden. In Anbetracht der der Rechnung zugrunde liegenden unsicheren Annahmen für die Transformator dämpfung R ist also eine sehr befriedigende Uebereinstimmung zwischen Rechnung und Messung vorhanden.

Hat der Stoßstrom nicht wie oben angenommen die Form der exponentiellen Normalwelle $1/30 \mu\text{s}$, sondern beispielsweise die Form einer *sin-Halbwellen* gleicher Halbwertsdauer $T_H = 30 \mu\text{s}$, so ergeben sich unter sonst gleichen Annahmen:

$$\begin{aligned} t_1 &= 1,5 \cdot T_H = 45 \mu\text{s} \\ i_{L0} &= 29,2 + 15,3 = 44,5 \text{ A} \end{aligned}$$

Wie man sieht, ist der Induktivitätsstrom *ganz erheblich kleiner* als bei exponentieller Stromwelle, trotzdem der Einfachheit halber angenommen wurde, die Restspannung habe auch hier die gleiche Form wie im ersten Beispiel; tatsächlich würde der Induktivitätsstrom einen eher noch etwas kleineren Wert erreichen, weil hier die Restspannung auch rascher abklingt und eher die Form einer *cos-Viertelwellen* aufweist (Einfluss der schleifenförmigen Widerstandscharakteristik).

c) Diskussion und Folgerungen

Hier soll vor allem wieder der Fall der normalen exponentiellen Stromwelle betrachtet werden, wie diese in den Leitsätzen für Ueberspannungsableiter vorgesehen und auch aus den Ueberspannungsuntersuchungen als häufigst vorkommende Form festgestellt wurde. Wie aus dem zuerst berechneten Beispiel hervorgeht, ist der vom abklingenden Teil u_{p2} der Restspannung hervorgerufene Anteil des Induktivitätsstromes relativ sehr gering gegenüber demjenigen der vom konstanten und lange dauernden Anteil u_{p1} und der Netzspannung $E \sqrt{2}$ verursacht wird (23 A gegenüber 161 A). Dies ist leicht verständlich, da wegen der grossen Zeitkonstanten $T_0 = \frac{L}{R}$ des induktiven Kreises vor allem

die lange wirkenden Spannungen von Einfluss sind, woraus sich die grosse Bedeutung der Zeitdauer t_1 («Gesamtdauer des Stoßstromes») ergibt. Der Induktivitätsstrom wird in diesem Falle daher sehr wenig von der Höhe des Stoßstromes abhängen,

da diese zufolge der spannungsabhängigen Charakteristik des Ableiters nur einen kleinern Einfluss auf die Höhe der Restspannung ausüben und praktisch nur ihren abklingenden Anteil u_{p2} , daher nur den kleinen Stromanteil i_2 verändern wird. Der konstante Teil der Restspannung ist nämlich praktisch durch die Löschbedingungen des Ableiters gegeben und ist stets näherungsweise gleich dem Scheitelwert der maximalen Betriebsspannung. Anders ist es jedoch, wenn wir nicht mehr den bisher betrachteten, für die Ableiterbeanspruchung ungünstigsten Zeitmoment des Stosses gegenüber der Netzspannung zugrunde legen. Nehmen wir beispielsweise ein Zeitmoment für den Zündstoss, der um eine Halbwelle gegenüber dem bisher betrachteten verschoben ist, so ist für das konstante Glied der wirkenden Restspannung ($u_{p1} - E \sqrt{2}$) zu setzen, und dieses wird nach dem oben Gesagten annähernd zu null. In diesem Fall ist daher praktisch nur der Anteil i_2 des Induktivitätsstromes vorhanden, und dieser wird durch die Höhe des Stoßstromes nach den obigen Betrachtungen stärker beeinflusst. *Zusammenfassend ergibt sich also, dass ein stärkerer Einfluss der Stosshöhe auf den Induktivitätsstrom nur in jenen Stosszeitpunkten vorhanden ist, bei denen der Induktivitätsstrom an sich klein ist; im für den Ableiter ungünstigsten Fall, bei dem der Induktivitätsstrom den grössten Wert annimmt, ist die Höhe des Stoßstromes nur von geringerer Bedeutung.* Es geht weiter aus den Beispielen auch klar hervor, dass die Form und Dauer des Stoßstromes einen massgebenden Einfluss ausübt.

4. Ableiterausgleichstrom und Induktivitätsstrom

Ist die Stossanlage nach Beendigung des Stossvorganges wieder vom Netz abgetrennt und ist keine wesentliche Kapazität parallel zum Ableiter geschaltet, so entsteht an der Induktivität wie im Abschnitt 2 angegeben, eine solche Spannung $L \cdot \frac{di}{dt}$ dass der Ableiter rückgezündet wird und der Induktivitätsstrom über den Ableiter abklingen kann. Der Ausgangswert des Ableiterausgleichstromes ist daher in diesem Fall gleich dem vorhin berechneten Wert des Induktivitätsstromes.

Diese Abtrennung der Stossanlage ist schon aus andern Gründen erwünscht (Vermeidung von Spannungsverzerrungen und von unkontrollierbaren Rückzündspannungen an der Funkenstrecke) und entspricht auch besser den Betriebsverhältnissen; die von Berger betrachteten Beziehungen für den Fall der nicht abgetrennten Stoßanlage sind jedoch aus einem andern Grunde von Interesse; sie gelten nämlich genau gleich für den Fall, bei dem an Stelle der Stossanlagenkapazität eine andere, z.B. eine Schutzkapazität parallel zum Ableiter liegt. Der Anfangswert i_0 des Ableiterausgleichstromes i verhält sich dabei zum vorhin berechneten Induktivitätsstrom i_{L0} nach der Beziehung

$$i_0 = K \cdot i_{L0} \quad (5)$$

wo der Faktor K nach den Betrachtungen in der genannten Arbeit von Berger je nach dem Wert der Ansprechspannung bei der Rückzündung des Ableiters innerhalb des ganzen Bereiches liegen kann:

$$0 < K < \sqrt{\frac{C}{L} \cdot \left(\frac{E\sqrt{2} + u_{p1}}{i_{L0}}\right)^2 + 1} \quad (6)$$

(Wir bringen diese Beziehung hier in etwas anderer, für die vorliegenden Betrachtungen zweckmässiger Form, als in der zitierten Arbeit.) Theoretisch könnte also bei Vorhandensein einer Kapazität C parallel zum Ableiter der Ableiterausgleichstrom ungünstigenfalls noch grösser sein als der Induktivitätsstrom nach Abschnitt 3. Um ein Bild über die in Frage kommenden Grössen zu geben, berechnen wir für die Verhältnisse im ersten Beispiel des Abschnittes 3 diejenige Kapazitätsgrösse C , die nötig wäre, um einen ungünstigenfalls um 20 % grösseren Ableiterausgleichstrom zu verursachen, als er ohne eine Kapazität vorhanden wäre. Die Durchrechnung ergibt hiebei eine Kapazität von $1,2 \mu F$, also eine für praktische Verhältnisse ganz bedeutende Grösse. Man sieht also, dass nur beim Vorhandensein einer sehr erheblichen Kapazität die Beziehungen (5) und (6) berücksichtigt werden müssen.

Ein Ableiter, der nicht in einer Prüfanlage mit dem relativ einfachen Schema der Fig. 1, sondern in einem Netz eingebaut ist, wird wohl stets durch mindestens eine Leitung, die parallel am Transformator angeschlossen ist, vom Ausgleichstrom entlastet. Es sei hier auf den Schlussabschnitt des Aufsatzes von Berger verwiesen und nur noch ergänzend bemerkt, dass, wenn es in diesem Fall überhaupt noch zu einer Rückzündung und somit zu einer Beanspruchung des Ableiters durch den Ausgleichsvorgang kommt, dies beim betrachteten ungünstigen Stosszeitpunkt eine Umladung der Leitung von der Spannung u_{p1} auf $-E\sqrt{2}$ erfordert, die Leitung also einen Strom von

$$i_n = \frac{u_{p1} + E\sqrt{2}}{Z} \approx \frac{2E\sqrt{2}}{Z}$$

(Z = Wellenwiderstand der Leitung) aufnimmt und so den Ableiter um diesen Strombetrag entlastet. Der Ableiterausgleichstrom hat somit nur noch den Anfangswert $i_0 = i_{L0} - i_n$.

Im ersten Beispiel ist in $i_n = \frac{19460}{500} = 39$ A, und es wird somit $i_0 = 184 - 39 = 145$ A. Wie man sieht, bewirkt also eine einzige Leitung schon eine erheblich ins Gewicht fallende Reduktion der Ableiterbeanspruchung; bei zwei und mehr Leitungen ist die Entlastung noch grösser und es tritt u. U. überhaupt keine Rückzündung und keine Beanspruchung des Ableiters durch den Ausgleichsvorgang mehr auf.

5. Der zeitliche Verlauf des Ableiterausgleichstromes bei spannungsabhängigen Widerständen

a) Berechnung

Wie erwähnt, kann der Induktivitätsstrom i_L nicht sofort verschwinden, und es erfolgt eine Rückzündung des Ableiters, worauf der weitere zeitliche Stromverlauf durch das Schema Fig. 5

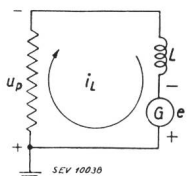


Fig. 5.
Schaltung beim Abklingen des Ableiterausgleichstromes.
 u_p Restspannung am Ableiter.
 L Induktivität des Speisetransformators
 e EMK (Ersatzspannungsquelle G)

dargestellt werden kann. Die Netzspannung e habe wieder den ungünstigsten Wert $e = E\sqrt{2}$ (für andere Zündzeitpunkte wäre der entsprechende Momentanwert der Netzspannung unter Berücksichtigung des Vorzeichens einzusetzen) mit der in der Figur angegebenen Polarität; sie soll ferner während der Dauer der Vorgänge als konstant angenommen werden, was i. a. ohne weiteres zulässig ist, da auch diese Ausgleichsvorgänge sich meist in Zeitdauern abspielen, die wesentlich kürzer sind

als eine Halbwelle der Betriebsspannung. Für den Ausgleichsvorgang gilt die Differentialgleichung:

$$L \cdot \frac{di}{dt} = (E\sqrt{2} - u_p) \quad (7)$$

wo der Transformatorwiderstand gegenüber dem sehr viel grösseren Ableiterwiderstand vernachlässigt ist. Da nun u_p eine durch die Widerstandscharakteristik gegebene Funktion von i ist, kann diese Gleichung nicht einfach integriert werden. Macht man für die Widerstandscharakteristik den üblichen Ansatz einer Potenzfunktion, z. B. $u_p = a \cdot i^b$, so ist die Lösung nur in Form einer unendlichen Reihe mit Potenzen von i möglich, die einerseits u. U. schlecht konvergiert und vor allem gar keine allgemeine Uebersicht über die Vorgänge gibt. Wir werden hier die Widerstandskennlinie im interessierenden Bereich durch eine *Logarithmuskurve* darstellen von der Form

$$u_p = a \cdot \ln(\beta i + 1) \quad (8)$$

wo a und β Konstanten des Widerstandes sind. Wie Fig. 6 zeigt, worin die oszillographisch bestimmte Charakteristik und die berechnete Kurve eingetragen

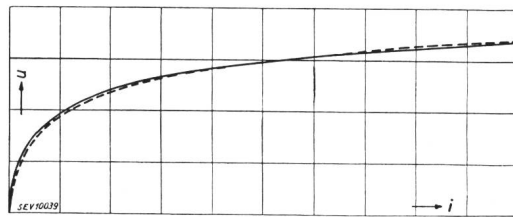


Fig. 6.

Kennlinie des spannungsabhängigen Widerstandes.
— wirkliche Charakteristik.
- - - logarithmische Ersatzkennlinie.

gen sind, stellt diese Beziehung die wirkliche Kennlinie mit sehr guter Annäherung dar.

Wir können nun schreiben:

$$\mu = \varepsilon^{-\frac{E\sqrt{2}}{\alpha}}, \quad E\sqrt{2} = -\alpha \cdot \ln \mu \quad (9)$$

und daher

$$(-E\sqrt{2} + u_p) = \alpha \cdot \ln \mu (\beta i + 1) \quad (10)$$

$$L \cdot \frac{di}{dt} = -\alpha \cdot \ln \mu (\beta i + 1)$$

$$\frac{di}{\ln \mu (\beta i + 1)} = -\frac{\alpha}{L} \cdot dt$$

$$\int \frac{d[\mu (\beta i + 1)]}{\ln \mu (\beta i + 1)} = -\frac{\alpha \mu \beta}{L} \int dt$$

$$\text{li} [\mu (\beta i + 1)] = -\frac{\alpha \mu \beta}{L} (t - t_0) \quad (11)$$

Die Funktion $y = \text{li}(x)$ ist unter dem Namen *Integrallogarithmus*³⁾ bekannt und gibt den gesuchten Zusammenhang zwischen der Zeit t und

³⁾ Vgl. z. B. Jahnke-Emde, Funktionentafeln, welche von der Funktion allerdings für nur den Zweig für $x > 1$ angeben; ferner die Reihenentwicklung in der «Hütte» Bd. I.

der Grösse $\mu(\beta i + 1)$, also dem Strom i ; wir haben sie in Fig. 7 und 8 für verschiedene Bereiche berechnet und aufgetragen.

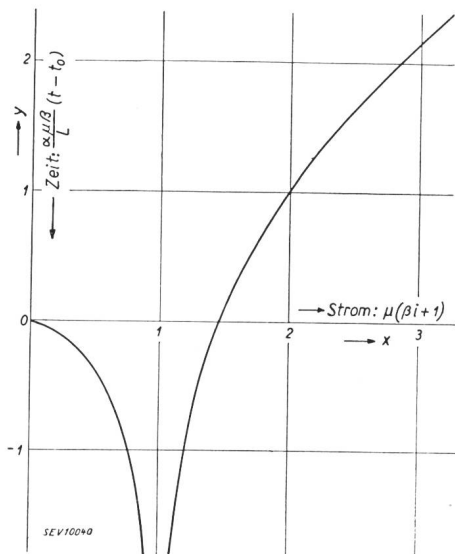


Fig. 7. Integrallogarithmus $y = li(x)$.

Verlauf des Ausgleichstromes i im Ableiter in Funktion der Zeit t .

Der Zeitmaßstab ist hierbei linear, der Strommaßstab ist weitgehend linear und zeigt erst bei kleinern Strömen ($\beta i \lesssim 1$) Abweichungen von der Linearität.

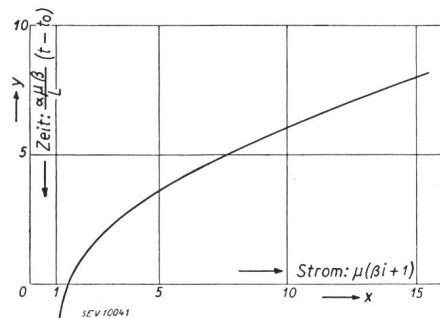


Fig. 8. Integrallogarithmus $y = li(x)$.

Verlauf des Ausgleichstromes i im Ableiter in Funktion der Zeit t .

b) Allgemeine Diskussion des Resultates

Das in Form der Gl. (11) abgeleitete Resultat ergibt eine sehr anschauliche Darstellung der Vorgänge, wie die nähere Betrachtung zeigt.

Zuerst ist zu bemerken, dass der Integrallogarithmus vor allem im Gebiete der grössern Ströme viel gestreckter, linearer verläuft als z. B. die Exponentialkurve; dies ist im vorliegenden Problem auch sehr gut verständlich, denn da zufolge der Spannungsabhängigkeit der Widerstände die Spannung am Ableiter z. B. bei abnehmendem Strom sich vorerst nur sehr wenig ändert, so muss auch der Faktor $L \cdot \frac{di}{dt}$ und damit die Stromabnahme sich weniger ändern als bei der für konstanten Widerstand gültigen Exponentialfunktion.

Der gefundene Zusammenhang in Form der Integrallogarithmuskurve hat eine Unendlichkeitsstelle für den Abszissenwert 1, d. h. dieser Wert wird erst für $t = \infty$ erreicht. Dies entspricht dem Stromwert i_∞ in der Beziehung

$$\mu(\beta i_\infty + 1) = 1 \tag{12}$$

daher $\ln[\mu(\beta i_\infty + 1)] = 0$

$$-\ln \mu = \ln(\beta i_\infty + 1)$$

$$-\alpha \cdot \ln \mu = \alpha \cdot \ln(\beta i_\infty + 1)$$

$$E \cdot \sqrt{2} = \alpha \cdot \ln(\beta i_\infty + 1) = u_{p\infty} \tag{13}$$

d. h. i_∞ ist gerade der stationäre, unter dem Einfluss der Netzspannung $E \sqrt{2}$ durch den Ableiter fließende Strom.

Je nachdem nun also der anfänglich vorhandene Ausgleichstrom i_0 (berechnet im vorigen Abschnitt) kleiner oder grösser ist als der stationäre, unter dem Einfluss der Netzspannung im Ableiter fließende Strom i_∞ , so strebt der Strom dem stationären Endwert i_∞ zu je entsprechend dem Kurvenzweig links oder rechts der vertikalen Asymptote $x = 1$. [Ist nämlich $i_0 > i_\infty$, so ist $u_p > E \sqrt{2}$ und daher wegen Gl. (10) die Grösse $\ln \mu(\beta i + 1)$ positiv, $\mu(\beta i + 1)$ also grösser als 1; ist umgekehrt $i_0 < i_\infty$, so ist $u_p < E \sqrt{2}$, $\ln \mu(\beta i + 1)$ negativ und $\mu(\beta i + 1) < 1$.]

Der Ausgleichstrom geht also langsam entsprechend den dargestellten Kurven in den stationären Endwert über und geht dann mit diesem durch null; die Löschfunkenstrecken des Ableiters löschen spätestens bei diesem Nulldurchgang. In günstigen Fällen vermögen die Löschfunkenstrecken jedoch die Löschung schon vor dem natürlichen Nulldurchgang des Stromes zu bewirken, und der Ausgleichstrom klingt dann ab bis auf null, ohne auf dem stationären Endwert zu bleiben, wie es unsere, ohne Berücksichtigung der Löschwirkung durchgeführte Rechnung ergeben würde.

c) Beispiel

Wir haben wieder für das erste Beispiel des Abschnittes 3 das Abklingen des Ausgleichstromes

nach den obigen Ausführungen berechnet. Das Resultat ist in Fig. 9 zusammen mit dem oszillographisch bestimmten Stromverlauf aufgetragen, und man ersieht eine sehr gute Uebereinstimmung zwischen Berechnung und Messung.

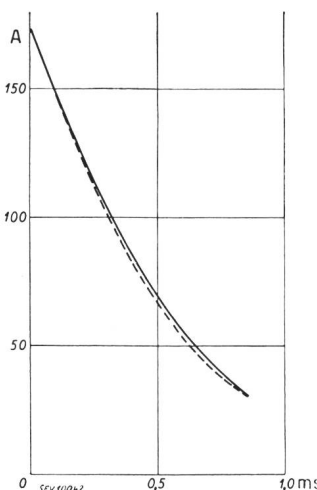


Fig. 9. Berechneter und gemessener Verlauf des Ableiterausgleichstromes.

d) Folgerungen

Man kann sich nun fragen, ob sich durch geeignete Wahl der Widerstandscharakteristik die Beanspruchung des Ableiters durch den abklingenden Ausgleichstrom wesentlich beeinflussen lasse. Hierbei ist zu beachten, dass der Verlauf der

Widerstandskennlinie in der Nähe des Löschpunktes massgebend ist, da die abklingenden Ausgleichströme ja dem stationären nachfolgenden Netzstrom i_∞ zustreben. Man wird nun den Löschpunkt so festlegen, dass hiebei der stationäre Strom gerade von den Löschfunkenstrecken mit Sicherheit noch bewältigt werden kann. Dadurch ist der massgebende mittlere Widerstandswert in der Nähe des Löschpunktes festgelegt und damit auch der mittlere Verlauf des abklingenden Ausgleichstromes. Man könnte also, um einen rascher abklingenden Ausgleichstrom und damit kleinere Beanspruchung zu erzielen, nur noch eine Kennlinie wählen, deren Spannung bei Strömen über dem stationären Löschstrom i_∞ möglichst rasch ansteigt; das widerspricht aber dem primären Interesse an möglichst niedrigen Restspannungen. Man sieht also, dass der Verlauf des Ausgleichstromes vom Ableiter aus nicht wesentlich im Sinne kleinerer Beanspruchung beeinflusst werden kann, ohne andere wichtige Eigenschaften zu verschlechtern.

6. Der zeitliche Verlauf der Spannung am Ableiter beim Ausgleichsvorgang

Da am Ableiter die gegenseitige Beziehung zwischen Strom und Spannung durch die Charakteristik der spannungsabhängigen Widerstände [Gl. (8)] gegeben ist, bestimmt das Resultat der Berechnung des Ausgleichstromes im Abschnitt 5 auch den zeitlichen Verlauf der Spannung am Ableiter. Aus der Diskussion des Verlaufes des Ausgleichstromes ergibt sich daher, dass, je nachdem der anfänglich vorhandene Ausgleichstrom i_0 kleiner oder grösser ist als der stationäre, unter dem Einfluss der Netzspannung im Ableiter fliessende Strom i_∞ , auch die Spannung am Ableiter, ausgehend von einem Anfangswert $u_0 = a \cdot \ln(\beta i_0 + 1)$, der kleiner, bzw. grösser ist als der stationäre Spannungswert, diesem Endwert zustrebt.

Es hängt also rein von der zufälligen Grösse des Anfangswertes des Ableiterausgleichstromes i_0 im

Vergleich zum stationären Wert des Ableiterstromes ab, ob der Ausgleichstrom, bzw. die Spannung am Ableiter von tiefern oder höhern Werten aus dem stationären Endwert zustrebt, und es ist dies in keiner Beziehung etwa ein kennzeichnendes Merkmal eines Ableiters.

Unserer bisherigen Berechnung lag nun immer die Annahme einer konstanten EMK $E \cdot \sqrt{2}$ zugrunde, oder es wurde, mit andern Worten, vorausgesetzt, dass die Ausgleichvorgänge sich in Zeiten abspielen, die wesentlich kürzer sind als eine Viertelswelle der speisenden Netzspannung. Diese Voraussetzung, welche meistens, stets aber mindestens für den Beginn der Ausgleichvorgänge erfüllt ist, erlaubte die Berechnung mit Berücksichtigung der Spannungsabhängigkeit der Widerstände und die Herleitung einer sehr anschaulichen Form des Resultates. Dauert nun aber der Ausgleichvorgang länger als entsprechend der gemachten Voraussetzung, so ist folgendes Verhalten zu erwarten. Strom und Spannung nehmen zuerst den bisher berechneten Verlauf. Ist $i_0 > i_\infty$, so wird nun die Netzspannung beim betrachteten Fall des synchronisierten Stosses schon vor Beendigung des Ausgleichvorganges abzunehmen beginnen, und der Endwert i_∞ wird daher später erreicht; Strom und Spannung bleiben für längere Zeit über den entsprechenden stationären Werten. Ist $i_0 < i_\infty$, so bewirkt die schon vor Beendigung des Ausgleichvorganges abnehmende Netzspannung, dass die Spannung am Ableiter den Maximalwert der Netzspannung gar nicht erreicht, ebenso bleibt der Strom i dauernd unterhalb dem Maximalwert des stationären Stromes, und das Spannungsszillogramm vermittelt den Eindruck eines u. U. sehr grossen scheinbaren Spannungsabfalles. Tatsächlich kann hier jedoch nicht von einem Spannungsabfall im üblichen Sinne gesprochen werden, so wenig bei $i_0 > i_\infty$ von Spannungserhöhung die Rede sein wird, sondern es handelt sich dem Wesen nach um eine dem Ausgleichvorgang entsprechende Restspannung.

Neues tragbares elektrisches Universal-Scheinwerfergerät

Von Th. Hauck, St. Moritz

683.852

Es wird ein bequem tragbares Scheinwerfergerät beschrieben, das vorwiegend für den alpinen Rettungsdienst gedacht, aber auch für Feuerwehren, Polizei, Bergbahnen, Freileitungskontroll- und Störungsdienst gute Dienste leisten kann.

Description d'un projecteur électrique portatif pour skieurs et varappeurs, spécialement étudié pour les colonnes de secours en montagne, mais qui peut également servir aux corps des Sapeurs-pompiers, à la police, aux chemins de fer de montagne, au service de contrôle pour les lignes aériennes électriques.

In frühern Publikationen ¹⁾ berichteten wir über ein tragbares elektrisches Scheinwerfergerät, das ursprünglich vorwiegend für den alpinen Rettungsdienst gedacht war. Das damals beschriebene Gerät hat seit 1938 nicht nur im Dienst der alpinen Rettungsstation St. Moritz bei verschiedenen sommerlichen und winterlichen Rettungsexpeditionen seine

Eignung bewiesen, sondern hat sich ausserdem als vorzüglicher Helfer im Feuerwehrdienst (Elektrikerkorps) und im Dienste von Ueberland-Elektrizitätswerken bei der Kontrolle und bei Reparaturarbeiten an Freileitungen, besonders in gebirgigen Gegenden für Skipatrouillen gut bewährt.

Es ist der persönlichen Initiative von Herrn Dr. med. Campell, Pontresina, derzeitiger Zentralpräsident des SAC, zu verdanken, dass der damaligen Erstaufführung eine zweite, verbesserte Auflage

¹⁾ «Die Alpen», Monatsschrift des SAC, 1939, Heft 2, 2. Teil; Bull. SEV 1939, Nr. 7; Kongressbericht des V. internat. Kongresses für Rettungswesen Zürich/St. Moritz 1939, S. 339.