

# Ersatzschaltungen für Blitzableiter

Autor(en): **Wiesinger, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins :  
gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen  
Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes  
Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **62 (1971)**

Heft 19

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915856>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Ersatzschaltungen für Blitzableiter <sup>1)</sup>

Von J. Wiesinger, München

621.316.933;621.3.012.8

## 1. Einführung

Der Blitzstrom, der in den Blitzableiter eines zu schützenden Objektes fließt, ist infolge des relativ hohen Innenwiderstandes des Blitzkanales im k $\Omega$ -Bereich als eingepprägter Strom anzusehen.

Im folgenden sollen nun die zeitlich veränderlichen Spannungen analysiert werden, die infolge des Blitzstromes an geerdeten Blitzableitern auftreten. Hierzu werden die Ableiter als Wanderwellenleitungen, die mit einem Ohmschen Erdungswiderstand abgeschlossen sind, und als LC-Kreise, die durch den Erdungswiderstand bedämpft werden, dargestellt.

Das prinzipielle Verhalten der Ersatzschaltungen wird an Hand der Beanspruchung mit einem idealisierten, in 1  $\mu$ s auf 80 kA ansteigenden und dann konstant bleibenden Blitzstrom untersucht. Die Stromänderung von 80 kA/ $\mu$ s entspricht etwa dem 5-%-Wert bei negativen multiplen Abwärtsblitzen [1]<sup>2)</sup>.

Schliesslich wird noch untersucht, unter welchen Voraussetzungen der Ohmsche Widerstand der Ableiter für die Stromaufteilung auf die einzelnen Ableiter massgebend ist.

## 2. Wanderwellenleitung mit konzentriertem Ohmschen Erdungswiderstand

Für Blitzstoßströme lässt sich ein Blitzableiter in erster Näherung darstellen als eine verlustlose Wanderwellenleitung mit längs der Leitung konstantem Wellenwiderstand  $\Gamma$  und konstanter Wellenausbreitungsgeschwindigkeit  $v_0$ ; diese Leitung ist mit einem konzentrierten Ohmschen Erdungswiderstand  $R_e$  abgeschlossen. Fig. 1 zeigt die Ersatzschaltung eines geerdeten Blitzableiters mit den im folgenden verwendeten Bezeichnungen.

Für die Induktivität pro m,  $l_0$ , ergibt sich je nach angenommener Blitzstromschleife bei Ableiterlängen  $l$  von 3...30 m und Ableiterdurchmessern  $d$  von 3,5...8 mm ein Wert nach [2, S. 160] von etwa 1,2...1,8  $\mu$ H/m. Als Mittelwert kann  $l_0 = 1,5$   $\mu$ H/m angenommen werden. Damit folgt für die Kapazität pro m:

$$c_0 = \frac{1}{v_0^2 l_0} = 7,4 \text{ pF/m}$$

und für den Wellenwiderstand eines einzelnen Ableiters:

$$\Gamma = 450 \text{ } \Omega$$

Bei  $n$  gleich langen, parallel liegenden Ableitern mit jeweils dem Wellenwiderstand  $\Gamma_i$  muss anstelle von  $\Gamma$  mit dem resultierenden Wellenwiderstand  $\Gamma_{res}$  gerechnet werden:

$$\Gamma_{res} = \frac{\Gamma_i}{n}$$

$$\Gamma_i = \Gamma + (n-1) \Gamma' \quad (1)$$

<sup>1)</sup> Erweiterte Fassung eines Referates auf der 11. Internationalen Blitzschutzkonferenz am 13. bis 17. September 1971 in München.

<sup>2)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Der durch die Gegeninduktivität und Verkettungskapazität gegebene Koppelwellenwiderstand  $\Gamma'$  eines Ableiters kann je nach dem Abstand  $a$  der Ableiter voneinander Werte zwischen 0 und  $\Gamma$  annehmen:

$$\Gamma' = 0 \text{ für } a \rightarrow \infty$$

$$\Gamma' = \Gamma \text{ für } a \rightarrow 0$$

Die Berechnung der Spannung an den Ableitern, also zwischen dem Einschlagpunkt  $A$  und der Erdeführung  $B$ , sowie am Erdungswiderstand, also zwischen den Punkten  $B$  und  $C$  der Fig. 1 erfolgt zweckmässig mit dem graphischem Bergeron-Verfahren [3], für das von H. Dommel ein universelles Rechenprogramm für Digitalrechner ausgearbeitet wurde [4]. Das Bergeron-Verfahren beruht auf der Elimination der Zeit aus den Telegraphengleichungen, so dass für eine von  $A$  nach  $B$  laufende Wanderwelle  $\partial u/\partial i = -\Gamma$ , für eine von  $B$  nach  $A$  laufende Wanderwelle  $\partial u/\partial i = +\Gamma$  ist.

### 2.1 Beispiel I

Es soll der zeitliche Verlauf der Spannungen bei einem Blitzeinschlag in mehrere, parallelgeschaltete, gleich lange

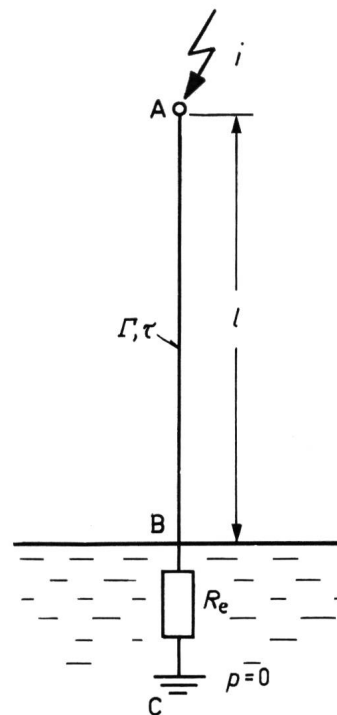


Fig. 1

**Ableiter als Wanderwellenleitung mit Ohmschen Erdungswiderstand**

$i$  Blitzstrom (A);  $\Gamma = \sqrt{\frac{l_0}{c_0}}$  Wellenwiderstand ( $\Omega$ );  $l_0$  Induktivität pro m (H/m);  $c_0$  Kapazität pro m (F/m);  $\tau = l \sqrt{l_0 c_0} = l/v_0$  Laufzeit (s);  $l$  Ableiterlänge (m);  $v_0 = 3 \cdot 10^8$  Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes (m/s);

$R_e$  Erdungswiderstand ( $\Omega$ );  $p=0$  Bezugspotential (V);

$A$  Einschlagpunkt;  $B$  Erdeführungspunkt;  $C$  Bezugspunkt

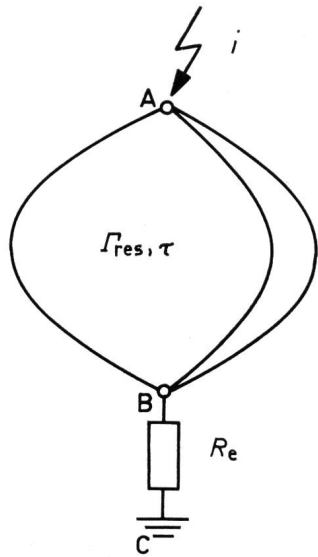


Fig. 2  
**Parallele Ableiter gleicher Länge**  
 $\Gamma_{res}$  resultierender Wellenwiderstand  
 Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Ableiter (Fig. 2) bestimmt werden. Der resultierende Wellenwiderstand  $\Gamma_{res}$  sei  $200 \Omega$  und die Länge  $l$  der Ableiter  $15 \text{ m}$  entsprechend einer Laufzeit  $\tau$  von  $50 \text{ ns}$ ; der Erdungswiderstand  $R_e$  sei  $1$  bzw.  $10 \Omega$ .

Der Blitzstrom  $i$  habe den in Fig. 3a gezeigten idealisierten Verlauf.

Die nach dem Bergeron-Verfahren für  $R_e = 1 \Omega$  und  $R_e = 10 \Omega$  ermittelten Spannungen an der Einschlagstelle  $u_A$ , also

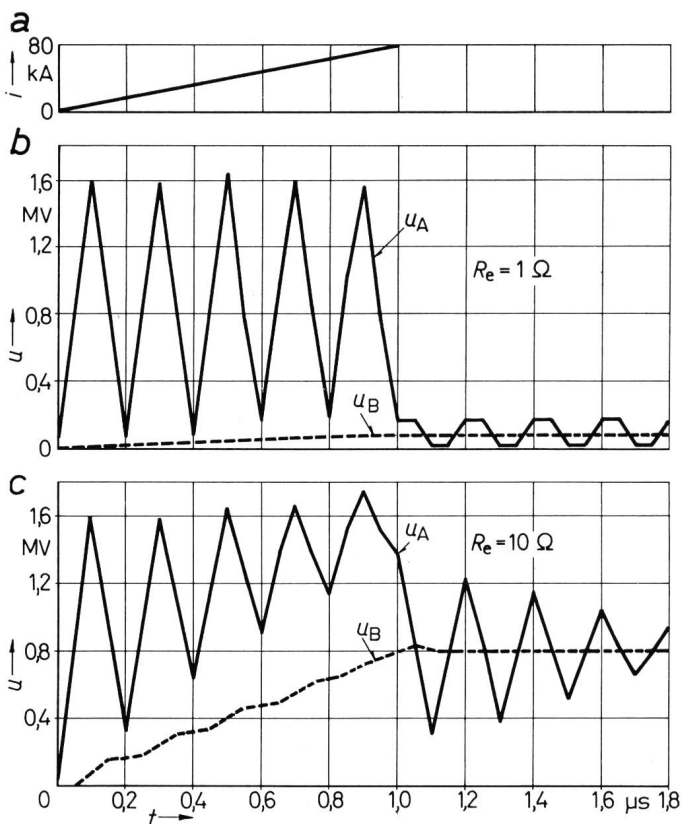


Fig. 3  
**Spannungen an einer Anordnung gemäss Fig. 2**

$i$  Blitzstrom;  $R_e$  Erdungswiderstand;  $u_A$  Spannung zwischen  $A$  und  $C$  der Fig. 2;  $u_B$  Spannung zwischen  $B$  und  $C$  der Fig. 2;  $t$  Zeit  
 Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1 und im Text

zwischen  $A$  und  $C$  der Fig. 2, sowie an der Erdeführung  $u_B$ , also zwischen  $B$  und  $C$  der Fig. 2, sind in den Fig. 3b und 3c dargestellt.

Aus diesen Figuren erkennt man:

a) Während des konstanten Blitzstromanstieges  $di/dt = 80 \text{ kA}/\mu\text{s}$  in der Zeit  $t = 0..1 \mu\text{s}$  steigt die Spannung am Erdungswiderstand  $u_B$ , von geringfügigen Schwingungen überlagert, etwa linear an und verbleibt, nachdem der Blitzstrom seinen Maximalwert  $\hat{I}$  erreicht hat, etwa auf einem konstanten Wert  $\hat{I}R_e$ .

b) Die Spannung an dem Blitzableiter ( $u_A - u_B$ ), schwingt während des Blitzstromanstieges um den Wert  $\Gamma_{res} \tau \cdot di/dt$ . Die Schwingung wird gedämpft gemäss einer Zeitkonstanten  $T_d = \Gamma_{res} (\tau/R_e)$ ; somit wird die schwingende Spannung bei  $R_e = 10 \Omega$  wesentlich wirksamer bedämpft als bei  $R_e = 1 \Omega$ .

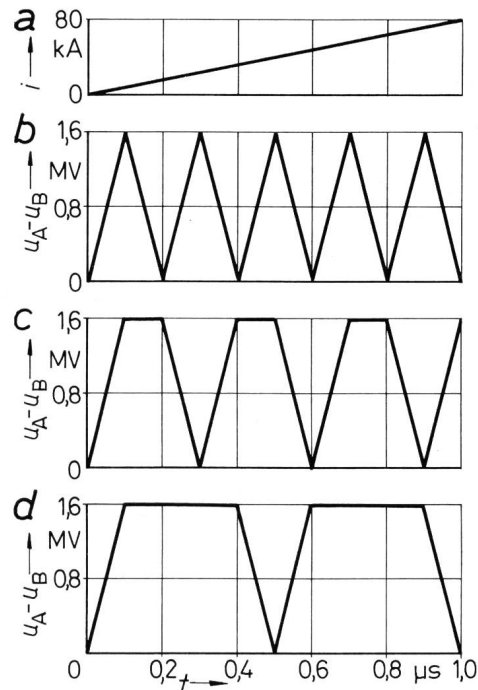


Fig. 4  
**Spannungen an Blitzableitern mit verschiedenen Erdungswiderständen**  
 $u_A - u_B$  Spannung zwischen Einschlagpunkt und Erdeführung  
 Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1 und 2

c) Auch bei dem Übergang in den konstanten Blitzstrom  $\hat{I}$  bei  $t = 1 \mu\text{s}$  wird eine Schwingung angeregt, die durch die Wahl des Zeitpunktes  $t = 1 \mu\text{s}$  hier zufällig zu einer geringeren Spannung ( $u_A - u_B$ ) bei  $R_e = 1 \Omega$  gegenüber  $R_e = 10 \Omega$  führt!

Allgemein erhält man für eine Anordnung nach Fig. 2 bei einer Blitzstromänderung  $di/dt$  als Mittelwert der an den Ableitern auftretenden Spannung:

$$(u_A - u_B)_m = \Gamma_{res} \tau \cdot di/dt$$

Die bei  $R_e = 0$  bzw.  $R_e \ll \Gamma_{res}$  maximal mögliche Spannung an den Ableitern ist:

$$(u_A - u_B)_{max} = 2 \Gamma_{res} \tau \cdot di/dt \quad (2)$$

Für die Periodendauer der Ableiterspannung gilt:

$$T = 4\tau \quad (3)$$

Bei  $di/dt = 80 \text{ kA}/\mu\text{s}$ ,  $\Gamma_{res} = 200 \Omega$  und  $\tau = 50 \text{ ns}$  wird:

$$(u_A - u_B)_{max} = 1,6 \text{ MV}$$

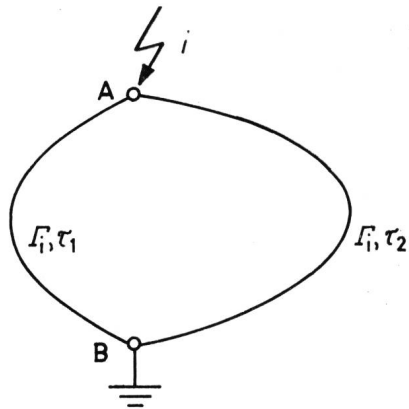


Fig. 5  
**Parallele Ableiter verschiedener Länge**  
 $\Gamma_i$  Wellenwiderstand nach Gl. (1)  
 Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

und

$$T = 0,2 \mu\text{s}$$

Mit zunehmendem  $R_e$  wird die maximale Ableiterspannung geringer!

Es sei darauf hingewiesen, dass die ermittelten Spannungen ( $u_A - u_B$ ) bezogen sind auf den Blitzstromkreis;  $u_A$  ist die Spannung, auf die sich der Einschlagpunkt gegenüber der weiteren Umgebung anhebt. Die Spannung, die z. B. im Inneren eines zu schützenden Gebäudes auftritt, kann wesentlich geringer sein als die Spannung ( $u_A - u_B$ )<sub>max</sub>. (Hierauf wird im Abschnitt 3 noch näher eingegangen.)

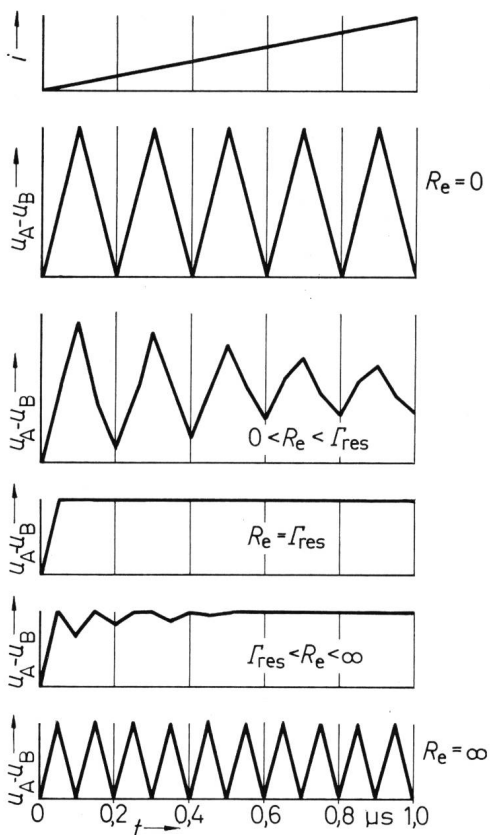


Fig. 6  
**Spannungen an einer Anordnung der Fig. 5**

$i$  Blitzstrom;  $u_A - u_B$  Spannung zwischen A und B der Fig. 5  
 Erklärungen siehe im Text

In Fig. 4 ist ergänzend der prinzipielle Verlauf der Spannungen an 15 m langen Blitzableitern nach Fig. 2, ( $u_A - u_B$ ), während eines konstanten Blitzstromanstieges bei verschiedenen Erdungswiderständen  $R_e$  aufgezeichnet. Der ungünstigste Fall ergibt sich für  $R_e = 0$ ! Der Fall  $R_e \geq \Gamma_{res}$  wird in der Praxis kaum erreicht.

Aus den bisherigen Ausführungen wird klar, dass die maximale Spannung an den Blitzableitern durch folgende Massnahmen klein gehalten werden kann:

- a) Niedriges  $\Gamma_{res}$  durch Parallelschaltung von Ableitern;
- b) Niedriges  $\tau$  durch möglichst kurze Ableiter;
- c) Hohes  $R_e$ .

### 2.2 Beispiel II

In einem weiteren Beispiel soll der zeitliche Verlauf der Spannung an zwei, gemäss Fig. 5 parallel liegenden, unterschiedlich langen Blitzableitern ermittelt werden, die an ihrem Ende kurzgeschlossen und mit  $R_e = 0$  geerdet sind.

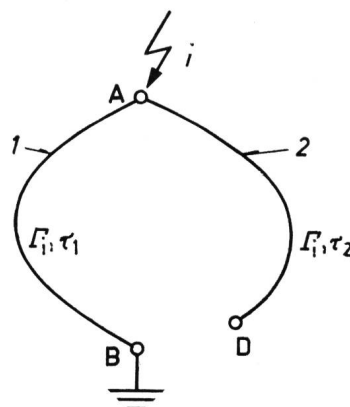


Fig. 7  
**Parallele Ableiter mit kurzgeschlossenem bzw. offenem Ende**  
 $\Gamma_i$  Wellenwiderstand nach Gl. (1)  
 Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Der Wellenwiderstand  $\Gamma_i$  wird zu  $400 \Omega$  angenommen, die Laufzeit des Ableiters 1  $\tau_1$  sei  $50 \text{ ns}$ , die Laufzeit des Ableiters 2  $\tau_2$  sei  $m\tau_1$ .

Während des konstanten Blitzstromanstieges (Fig. 6a) auf  $80 \text{ kA}$  innerhalb  $1 \mu\text{s}$  erhält man für  $m = 1$  die in Fig. 6b dargestellte Ableiterspannung ( $u_A - u_B$ ); für  $m = 2$  ergibt sich ( $u_A - u_B$ ) gemäss Fig. 6c, und für  $m = 4$  gemäss Fig. 6d.

Bei einer Anordnung nach Fig. 5 mit  $n$  parallelen, verschiedenen langen Ableitern gilt für die Periodendauer der Ableiterspannung:

$$T = \frac{4 \sum_{v=1}^n \tau_v}{\frac{v=1}{n}} \quad (4)$$

wenn die  $\tau_v$  die Laufzeit eines Ableiters ist.

Die maximal an den Ableitern auftretende Spannung ist in Analogie zu Gl. (2):

$$(u_A - u_B)_{\text{max}} = 2 \Gamma_{res} \tau_1 \cdot di/dt \quad (5)$$

Für obiges Zahlenbeispiel wird  $(u_A - u_B)_{\text{max}} = 1,6 \text{ MV}$

Die maximale Spannung an den Blitzableitern kann also klein gehalten werden durch:

- a) Niedriges  $\Gamma_{res}$  durch Parallelschaltung von Ableitern;
- b) Niedriges  $\tau$  eines Ableiters.

### 2.3 Beispiel III

In einem letzten Beispiel sei der zeitliche Verlauf der Spannungen an zwei, nach Fig. 7 parallel liegenden, unterschiedlich langen Ableitern ermittelt; der Ableiter 1 ist am Ende mit  $R_e = 0$  geerdet, der Ableiter 2 ist am Ende offen.

Der Wellenwiderstand  $\Gamma_i$  wird wieder zu  $400 \Omega$  angenommen, die Laufzeit des Ableiters 1,  $\tau_1$ , zu  $50 \text{ ns}$ .  $\tau_2$  ist  $m \tau_1$ .

Während des konstanten Blitzstromanstieges nach Fig. 8a werden für  $m = 1$  die in Fig. 8b aufgezeichneten Spannungen ( $u_A - u_B$ ) bzw. ( $u_D - u_B$ ) erhalten; für  $m = 2$  ergeben sich die in Fig. 8c und für  $m = 4$  die in Fig. 8d dargestellten Spannungsverläufe.

Für derartige Zweileiter-Anordnungen gilt für die Periodendauer der Spannungen ( $u_A - u_B$ ) und ( $u_D - u_B$ ):

$$T = 4(\tau_1 + \tau_2) \quad (6)$$

Die maximale am Ableiter 1 zwischen A und B sowie die am offenen Ende des Ableiters 2 zwischen D und B auftretende Spannung ist in Analogie zu den Gl. (2) und (5):

$$(u_A - u_B)_{\max} = (u_D - u_B)_{\max} = 2 \Gamma_i \tau_1 \cdot di/dt \quad (7)$$

Für das Zahlenbeispiel wird  $(u_A - u_B)_{\max} = (u_D - u_B)_{\max} = 3,2 \text{ MV}$ .

Man erkennt, dass die maximale Spannung an dem blitzstromführenden, kurzgeschlossenen Ableiter und am Ende eines offenen Leiters klein gehalten werden kann durch niedriges  $\tau$  des stromführenden Ableiters.

### 3. LC-Kreis mit Ohmschem Erdungswiderstand

Bei üblichen Blitzableiterlängen von einigen zehn  $m$  und den in Betracht zu ziehenden Blitzstromverläufen lässt sich für viele Betrachtungen die Wanderwellenleitung durch einen aus konzentrierten Elementen bestehenden  $LC$ - $R_e$ -Kreis ersetzen (Fig. 9a). Für praktische Fälle kann wegen der sehr kleinen Zeitkonstante  $T = R_e c_0 \cdot 1/2$  die parallel zu  $R_e$  liegende Kapazität vernachlässigt werden und es ergibt sich eine einfache Ersatzschaltung der Fig. 9b, die nur eine Induktivität des Ableiters,  $L = l_0 l$ , eine Verkettungskapazität zur Erde,  $C_e$ , und den Erdungswiderstand  $R_e$  enthält.

Bei in der Praxis üblichen  $R_e$ -Werten von einigen  $\Omega$  bis zu einigen zehn  $\Omega$  ist ein gedämpft schwingender Verlauf des Stromes  $i_L$  zu erwarten, wenn ein linear ansteigender Blitzstrom  $i$  angenommen wird:

$$i_L = \frac{di}{dt} \left\{ t - \frac{1}{\omega^2 T_d} + e^{-\frac{t}{T_d}} \left[ \left( \frac{1}{\omega^3 T_d^2} - \frac{1}{\omega} \right) \sin \omega t + \frac{1}{\omega^2 T_d} \cos \omega t \right] \right\} \quad (8)$$

wobei

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L C_e}} \quad \text{und} \quad T_d = \frac{L}{R_e}$$

Da in der Regel die Faktoren  $\frac{1}{\omega^2 T_d}$  und  $\frac{1}{\omega^3 T_d^2}$  vernachlässigt werden können, erhält man aus Gl. (8):

$$i_L \approx \frac{di}{dt} \left( t - e^{-\frac{t}{T_d}} \frac{1}{\omega} \sin \omega t \right) \quad (9)$$

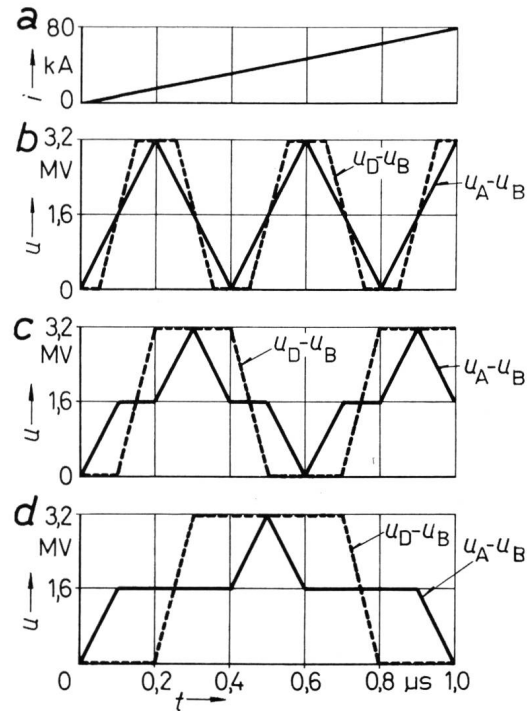


Fig. 8  
Spannungen an einer Anordnung gemäss Fig. 7  
 $i$  Blitzstrom;  $u_A - u_B$  Spannung zwischen A und B der Fig. 7;  
 $u_D - u_B$  Spannung zwischen D und B der Fig. 7  
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

und damit die Spannung an der Induktivität

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = u_A - u_B \approx L \frac{di}{dt} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T_d}} \cos \omega t \right) \quad (10)$$

unter der Voraussetzung, dass  $\frac{1}{\omega}$  und  $\frac{1}{\omega T_d} \ll 1$  sind.

Somit ist die an einer Ableitung maximal auftretende Spannung:

$$(u_A - u_B)_{\max} \approx L \left( 1 + e^{-\frac{t}{T_d}} \right) \frac{di}{dt} \quad (11)$$

Für  $R_e = 0$  ergibt sich mit  $L = l_0 l$ :

$$(u_A - u_B)_{\max} \approx 2 l l_0 \cdot \frac{di}{dt} \quad (12)$$

in Analogie zur Gl. (2), die aus der Wanderwellenbetrachtung gewonnen wurde.

Es soll nun der Zusammenhang zwischen  $c_0 l$  und  $C_e$  untersucht werden.

Aus der Wanderwellenbetrachtung (Fig. 1) ergab sich:  $\tau = l \sqrt{l_0 c_0}$ ; aus der Schwingkreisbetrachtung [Fig. 9b und Gl. (8)] folgt mit  $L = l_0 \cdot l$ :

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{l_0 l C_e}} = \frac{2\pi}{T}$$

worin  $T$  die Periodendauer bedeutet.

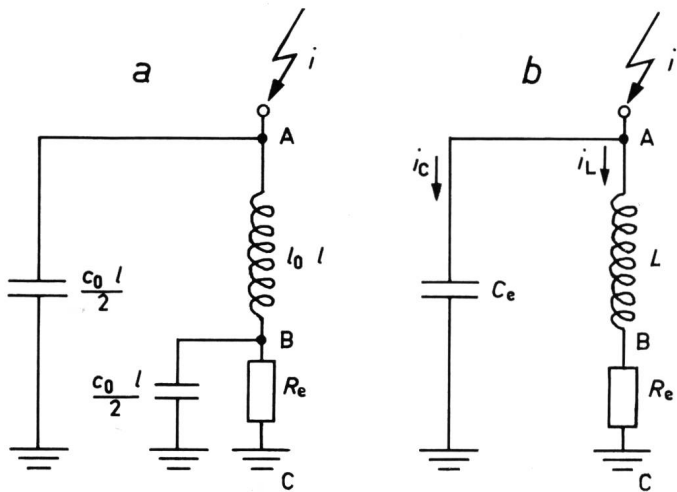


Fig. 9

Ableiter als LC-Kreis mit Ohmschen Erdungswiderstand

$i_L, i_C$  Teilströme (A);  $L$  Induktivität (H);  $C_e$  Verkettungskapazität zur Erde (F)

Bezeichnungen siehe Fig. 1 und Erklärungen im Text

Da  $T = 4 \tau$  sein muss, wird:

$$C_e = \frac{4}{\pi^2} c_0 l = 0,4053 c_0 l \quad (13)$$

### 3.1 Beispiel IV

Für parallelgeschaltete Blitzableiter nach Fig. 10 soll nun die Spannung ( $u_A - u_B$ ) einmal mit der Wanderwellenersatzschaltung nach Fig. 1, zum anderen mit der LC $R_e$ -Ersatzschaltung nach Fig. 9b während des Blitzstromanstieges von 80 kA/ $\mu$ s bestimmt werden.

Mit den Zahlenwerten  $\Gamma_{res} = 200 \Omega$  und  $l = 15$  m entsprechend  $\tau = 50$  ns ergibt sich:  $L_{res} = \Gamma_{res} \tau = 10 \mu$ H und  $C_e = 0,4053 L_{res} / \Gamma_{res}^2 = 101,3$  pF. In Fig. 11 sind die ermittelten Spannungen ( $u_A - u_B$ ) in einem gemeinsamen Diagramm aufgetragen. Aus Fig. 11 erkennt man, dass die nach den beiden Ersatzschaltungen erhaltenen Spannungen recht gut übereinstimmen, so dass in der Praxis in vielen Fällen durchaus mit einer einfachen Ersatzschaltung nach Fig. 9b gerechnet werden kann. Allerdings genügt es nicht, wenn das Verhalten bei Stoßströmen analysiert werden soll, die Ableiter nur durch Induktivitäten ohne Beachtung der Kapazitäten darzustellen!

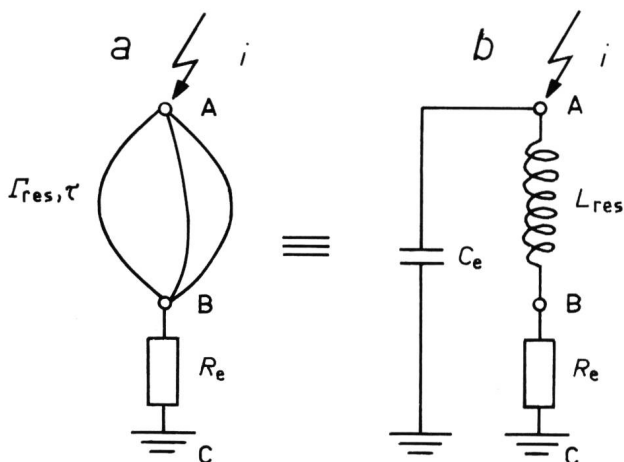


Fig. 10

Vergleich der Ersatzschaltungen für parallele Ableiter

$L_{res}$  resultierende Induktivität;  $\Gamma_{res}$  resultierender Wellenwiderstand

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1 und Fig. 9

Aus Gl. (11) geht hervor, dass die maximale Spannung am Blitzableiter klein gehalten werden kann durch:

- Niedriges  $L$ , das durch Parallelschaltung von Ableitern und kurze Ableiterlängen zu realisieren ist;
- Kleines  $T_d$  und damit hohes  $R_e$ .

## 4. Geometrische Charakteristik von Schleifen

Im folgenden soll nun in Ergänzung zu dem Ersatzschaltbild der Fig. 9b und der Gl. (11) bzw. (12) die Methode angegeben werden, mit der die in blitzableiternahen, metallischen Schleifen induzierten Spannungen und auch die Spannungen innerhalb eines Gebäudes zwischen dem Einschlagpunkt und der Erdführung eines Ableiters bestimmt werden können.

Die Induktivität  $L$  in Fig. 9b beinhaltet den gesamten magnetischen Fluss, der sich um den Blitzableiter ausbildet, und ist daher für den auf die Blitzstrombahn bezogenen induktiven Spannungsfall massgebend.

Die induzierten Spannungen, die an Schleifen innerhalb der blitzgeschützten Objekte auftreten, lassen sich zweckmässig mit

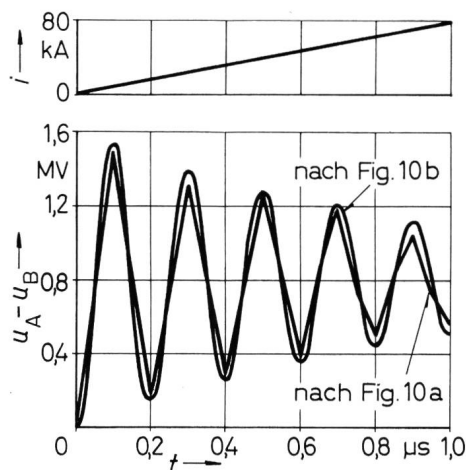


Fig. 11

Spannungen an Anordnungen der Fig. 10

$i$  Blitzstrom;  $u_A - u_B$  Spannung zwischen A und B der Fig. 10

Hilfe einer «Geometrischen Charakteristik»  $G$ , die in [1] eingehend erläutert ist, bestimmen.  $G$  ist dem die betrachtete Schleife durchsetzenden magnetischen Fluss proportional.

Für die in einer Schleife induzierte maximale Spannung gilt in Anlehnung an Gl. (12):

$$(u_s)_{max} = 2 \cdot 0,1 G di/dt \text{ (kV)} \quad (14)$$

wenn  $G$  in  $m$  und  $di/dt$  in kA/ $\mu$ s eingesetzt werden.

$G$  wird zweckmässig nach den in [1] angegebenen Verfahren ermittelt.

Einige Beispiele für mögliche Schleifenanordnung zeigt Fig. 12. Beachtenswert ist, dass die nach Gl. (14) ermittelte maximale Spannung für die Schleife 3,  $(u_{s3})_{max}$ , zwischen A und B kleiner ist als die nach Gl. (12) ermittelte Spannung  $(u_A - u_B)_{max}$ , da die Schleife 3 nur einen Teil des magnetischen Flusses um den Blitzableiter erfasst.

Bei einem anzustrebenden potentialmässigen Zusammenschluss aller metallischer Leiter mit der Blitzschutzanlage sind zur Festlegung der zulässigen Näherungen von Leiterenden an



die Blitzableiter nur die nach Gl. (14) ermittelten induzierten Spannungen massgebend.

### 5. Ohmscher Widerstand der Ableiter

Es soll abschliessend untersucht werden, bei welchen Blitzstrombeanspruchungen die Ohmschen Widerstände parallel liegender Ableiter für die Blitzstromaufteilung massgebend sind, so dass sich eine Ersatzschaltung nach Fig. 13 ergibt.

Liegen Ableiter unmittelbar nebeneinander, so sind die in den einzelnen Leitern fliessenden Blitzstromanteile  $i_1, i_2, \dots, i_n$  umgekehrt proportional zu den Leiterwiderständen  $R_1, R_2, \dots, R_n$ , wobei natürlich auch der Skineffekt in die Widerstände mit einzubeziehen ist. Liegen Ableiter weiter auseinander, so sind zwar für die Aufteilung des Blitzstoßstromanteiles fast ausschliesslich die in den Fig. 1 und 9 enthaltenen Leiterparameter massgebend; bei Blitzstromschwänzen dagegen mit sehr geringen Stromänderungen, wie sie in der Regel bei positiven Abwärtsblitzen vorkommen, ebenso auch bei Aufwärtsblitzen [5] sind die Leiterwiderstände für die Stromaufteilung massgebend. Das Kriterium hierfür ist, dass für den Strom  $i_n$  in einem Ableiter gilt:

$$l_0 \frac{di_n}{dt} < \frac{\rho}{q} i_n \quad (15)$$

wenn  $\rho$  der spezifische Widerstand und  $q$  der Leiterquerschnitt ist.

Bei  $l_0 = 1,5 \mu\text{H/m}$  ist diese Bedingung ohne Berücksichtigung des Skineffektes erfüllt, wenn

$$\frac{di_n}{dt} < \frac{i_n}{1187}$$

für einen 10-mm<sup>2</sup>-Kupferleiter, bzw. < 2267 für einen 50-mm<sup>2</sup>-Eisenleiter. Für den Kupferleiter muss beispielsweise bei  $i_n = 500 \text{ A}$   $di_n/dt < 593 \text{ A/ms}$  sein, eine Bedingung, die bei

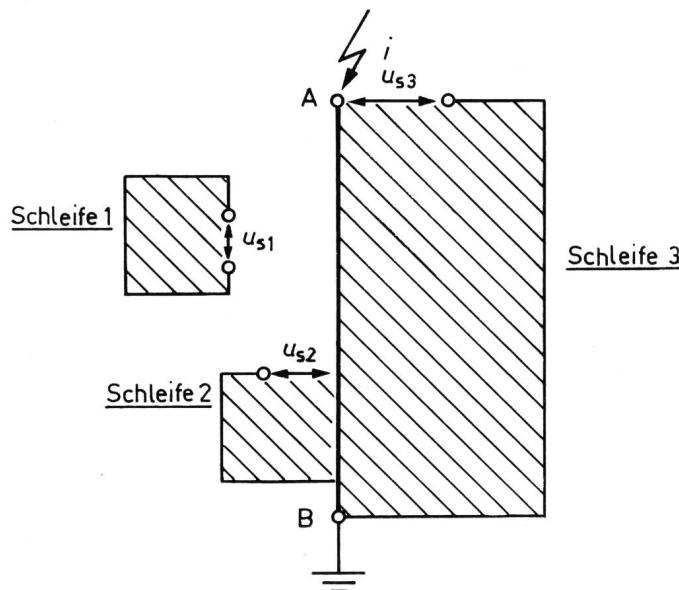


Fig. 12

Leiterschleifen in Ableiternähe

$u_s$  Schleifenspannung

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

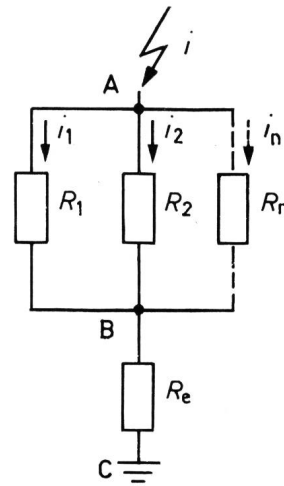


Fig. 13

Stromaufteilung an Ableitern nach den Ohmschen Widerständen  $i_1, i_2, i_n$  Teilströme;  $R_1, R_2, R_n$  Ohmsche Ableiterwiderstände  
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Stromschwänzen von Abwärtsblitzen und bei Aufwärtsblitzen in der Regel erfüllt ist.

### 6. Zusammenfassung

Ausgehend von der Darstellung einer Blitzableitung als Wanderwellenleitung und ihrer Analyse mit Hilfe des Bergeron-Verfahrens wird eine LC-Ersatzschaltung abgeleitet. Für eine Reihe von in der Praxis vorkommenden Leiteranordnungen werden einfache Beziehungen für die maximalen Spannungen zwischen dem Einschlagpunkt und der Erdeführung erarbeitet, die sich während des Anstieges von Blitzstoßströmen ergeben.

Es zeigt sich, dass die Spannungen an Blitzableitern zwischen Einschlagpunkt und Erdeführung klein gehalten werden können durch Parallelschaltung von Ableitern und kurze Leiterlängen mindestens eines Ableiters. Höherohmige Erdungswiderstände reduzieren durch ihre dämpfende Wirkung die Ableiterspannungen.

Weiterhin wird auf eine Methode hingewiesen, mit der in Schleifen induzierte Spannungen bestimmt werden können — Voraussetzung für die Festlegung zulässiger Näherungen.

Schliesslich wird betrachtet, unter welchen Voraussetzungen der Ohmsche Leiterwiderstand für die Stromaufteilung bei parallelen Ableitern von Bedeutung ist.

### Literatur

- [1] J. Wiesinger: Bestimmung der induzierten Spannungen in der Umgebung von Blitzableitern und hieraus abgeleitete Dimensionierungsrichtlinien. Bull. SEV 61(1970)15, S. 669...676.
- [2] H. Kärner: Die Erzeugung steilster Stoßspannungen hoher Amplitude. Dissertation der Technischen Hochschule München, 1967.
- [3] H. Prinz, W. Zaengl und O. Völcker: Das Bergeron-Verfahren zur Lösung von Wanderwellenaufgaben. Bull. SEV 53(1962)15, S. 725...739.
- [4] H. W. Dommel: A method for solving transient phenomena in multiphase systems. Power Systems Computation Conference Proceedings 2(1966)3, Report 5/8, p. 1...23.
- [5] K. Berger und E. Vogelsanger: Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 56(1965)1, S. 2...22.

### Adresse des Autors:

Priv.-Doz. Dr.-Ing. J. Wiesinger, Wiss. Rat am Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der TU München, Arcisstr. 21, D-8 München 2.