

Bestimmung der induzierten Spannungen in der Umgebung von Blitzableitern und hieraus abgeleitete Dimensionierungsrichtlinien

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): **61 (1970)**

Heft 15

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-915962>

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.

Bestimmung der induzierten Spannungen in der Umgebung von Blitzableitern und hieraus abgeleitete Dimensionierungsrichtlinien ¹⁾

Von J. Wiesinger, München

1108-1124

Für die optimale Dimensionierung von Blitzschutzanlagen für Personen, Gebäude und technische Anlagen ist es von Bedeutung, die in der Umgebung von Blitzableitern in verschiedenartigen Schleifen induzierten Spannungen infolge der Blitzstromänderungen zu kennen, um die zulässigen Näherungen und Sicherheitsabstände festlegen zu können. Es wird deshalb ein Verfahren angegeben, mit dem auf Grund von Charakteristiken, die von den geometrischen Abmessungen abhängen, die induzierten Spannungen für eine Reihe grundsätzlicher, im Blitzableiterbau häufig anzutreffender Leitungsführungen ermittelt und die notwendigen Sicherheitsabstände wesentlich exakter festgelegt werden können, als es mit den bisher in der Blitzschutztechnik üblicherweise angewandten Regeln möglich ist. Zum leichteren Verständnis sind in die Abhandlung einfache Berechnungsbeispiele eingefügt.

Le dimensionnement optimal des installations de parafoudre pour la protection des personnes, des immeubles et des installations techniques implique la connaissance des tensions induites dans les boucles rapprochées du parafoudre et causées par les modifications du courant de la foudre; ces données permettent de déterminer les distances de sécurité admissibles. Le procédé indiqué, basé sur des caractéristiques dépendantes des dimensions géométriques, permet de déterminer les tensions induites dans une série de tracés de lignes fréquentes dans la construction des parafoudres et de préciser les distances de sécurité bien plus exactement qu'avec les règles usuelles de la technique des parafoudres. La compréhension de l'exposé est facilitée par de simples exemples de calcul.

1. Einführung

Dank der sich nahezu über ein Vierteljahrhundert erstreckenden mühevollen oszillographischen Registrierung der vielgestaltigen Blitzströme auf dem Monte San Salvatore unter der Leitung von Prof. Berger [1]²⁾, die eine Vielzahl von Erkenntnissen über das physikalische Geschehen der Blitzentladung erbracht hat, steht nunmehr auch den Ingenieuren und Technikern, die sich mit der Projektierung und Erstellung von Blitzschutzanlagen zu befassen haben, ein statistisch fundiertes Wissen über die einzelnen Parameter der Blitzströme zur Verfügung. Da nach den heutigen Erkenntnissen die Blitzströme praktisch als eingeprägte Stoßströme anzusehen sind, die also von der baulichen Gestaltung und den Erdungsverhältnissen der getroffenen Objekte unabhängig sind, können nunmehr unter Zugrundelegung der Blitzstromdaten die Anlagen zum Blitzschutz von Menschen und Gebäuden sowie von technischen Einrichtungen, wie Sendetürme, Satellitenstationen und Energieverteilungsanlagen, wesentlich optimaler dimensioniert werden, als es bei einem nur empirischen Herantasten an die geeignete Ausführungsform etwa auf Grund der Beobachtung der erzielten Schutzwirkung von erstellten Blitzschutzanlagen möglich gewesen wäre.

Dieser Entwicklung zu einer immer vollkommeneren Gestaltung der Blitzableiter Rechnung tragend, wird in der vorliegenden Arbeit ein bisher noch nicht befriedigend geklärtes Problem behandelt, das sich mit der Bestimmung der in der Umgebung von Blitzableitern induzierten Spannungen befasst. Diese Spannungen sollen im folgenden für einige prinzipielle, im Blitzableiterbau häufig anzutreffende Schleifenanordnungen bestimmt werden mit Hilfe der Berechnung des magnetischen Flusses und unter Beachtung der in Blitzableitern zu erwartenden

den Blitzstromänderungen. Mit der Kenntnis der induzierten Spannungen kann dann u. a. auf die zulässige Leitungsführung von Blitzableitern und auf die einzuhaltenden Sicherheitsabstände bei nicht zur Blitzschutzanlage gehörenden metallischen Leitungen geschlossen werden mit einer wesentlich grösseren Genauigkeit, als es bisher mit vielfach verwendeten Faustregeln möglich ist.

Verwendete Buchstabensymbole

a, b, x_0, y_0	Strecken
$dx, dy, d\xi$	Längenelemente
di/dt	Blitzstromänderung
g	geometrische Charakteristik (1/m)
G	geometrische Charakteristik (m)
H	magnetische Feldstärke
i	Blitzstrom
l	Teillänge eines Blitzableiters
n	Anzahl der parallelen Blitzableiter
r	Radius des Blitzableiters
s	Sicherheitsabstand
U	Betrag der induzierten Spannung
u_s	Betrag der auf die Blitzstromänderung bezogenen induzierten Spannung
x, y, ξ	Koordinaten
2γ	Öffnungswinkel
μ	Permeabilität
μ_0	Permeabilität des leeren Raumes
Φ	magnetischer Fluss

Um den anzugehenden Themenkomplex etwas näher zu erläutern, sei zunächst gemäss Fig. 1 eine vereinfachte Blitzschutzanlage an einem turmartigen Gebäude (4) betrachtet. Wenn es aus bautechnischen Gründen notwendig ist, den Blitzableiter (1) nicht gerade zur Erde zu führen, sondern beispielsweise mit einer U-förmigen Umleitung zu versehen, so

¹⁾ Erweiterte Fassung eines Vortrages auf der Hauptversammlung des Ausschusses für Blitzableiterbau e. V. (ABB) am 11. und 12. Juni 1970 in Goslar.

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

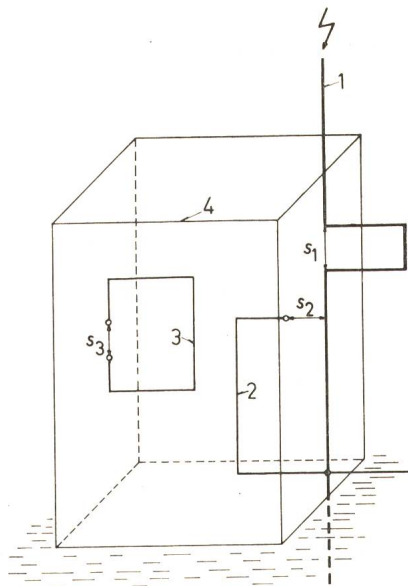


Fig. 1

Vereinfachte Blitzschutzanlage

1 Blitzableiter; 2 nicht zur Blitzschutzanlage gehörende Leitung; 3 Leiterschleife; 4 Gebäude; s_1, s_2, s_3 Sicherheitsabstände

muss mit Sicherheit ein Überschlag entlang der Strecke s_1 ausgeschlossen werden, d.h. es darf die zulässige Eigennäherung des Ableiters nicht unterschritten werden. Weiterhin muss für die in das blitzgeschützte Gebäude eingeschleifte metallische Leitung (2), die zur Vermeidung von unliebsamen Potentialdifferenzen vorschriftsmässig an einem Punkt mit dem Blitzableiter verbunden ist, eine überschlagsichere Strecke s_2 realisiert werden, d.h. die zulässige Näherung einer nicht als Blitzableitung vorgesehenen Leitung an den Blitzableiter muss festgelegt werden. Schliesslich ist auch die in einer metallischen Schleife (3) in der Nähe des Blitzableiters induzierte Spannung von Interesse, die bei einem zu knapp bemessenen Sicherheitsabstand s_3 nach einem Überschlag einen sehr hohen Strom in der Schleife zur Folge haben könnte.

Zur Festlegung der Sicherheitsabstände s_1 und s_2 wird heute üblicherweise eine Dimensionierungsrichtlinie herangezogen, wie sie in Fig. 2 veranschaulicht ist [2]. Es wird davon ausgegangen, dass bei Einhaltung eines Sicherheitsabstandes s , der grösser oder höchstens gleich ein Zwanzigstel der entsprechenden Blitzableiterteillänge l gewählt wird, die Gefahr eines Überschlages während des steilen Anstieges des Blitzstromes

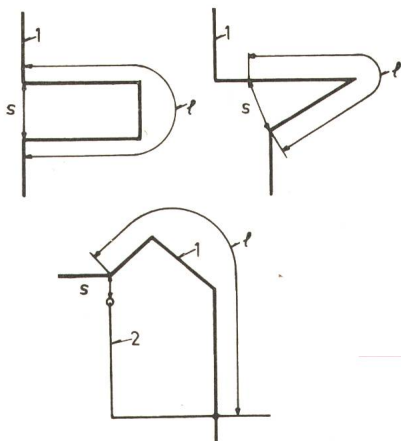


Fig. 2

Zur Festlegung der Sicherheitsabstände nach [2]

1 Blitzableiter; 2 nicht zur Blitzschutzanlage gehörende Leitung; l Teillänge des Blitzableiters; s Sicherheitsabstand

hinreichend gebannt ist. Diese Vorschrift, die für viele überschlägige Abschätzungen in der Praxis durchaus akzeptabel sein mag, kann aber nicht in allen Fällen befriedigen, insbesondere wenn unkonventionelle Blitzschutzfragen zu lösen sind. Deshalb wird im folgenden ein Verfahren erarbeitet, das es gestattet, auf einfache Weise zumindest bei grundsätzlichen und typischen Anordnungen von Blitzableitern und Schleifen die induzierten Spannungen zu bestimmen und die notwendigen Sicherheitsabstände festzulegen.

2. Grundlagen

Im folgenden werden zunächst die Methoden der Berechnung der magnetischen Flüsse dargelegt, aus denen sich unter Einbeziehung des Blitzstromanstieges die induzierten Spannungen ergeben. Aus Gründen der einfachen Handhabung wird für die betrachteten Schleifen eine nur von geometrischen Grössen abhängige Charakteristik eingeführt.

Gemäss Fig. 3 wird ein Teilstück eines Blitzableiters (1) mit der Länge l betrachtet, das von einem Strom i in der Leiterachse durchflossen wird. Für die magnetische Feldstärke H_p am Orte P mit den Koordinaten x und y ergibt sich:

$$H_p = \int_{\xi=0}^{\xi=l} \frac{i}{4\pi} \cdot \frac{y d\xi}{[(x-\xi)^2 + y^2]^{3/2}} \quad (1)$$

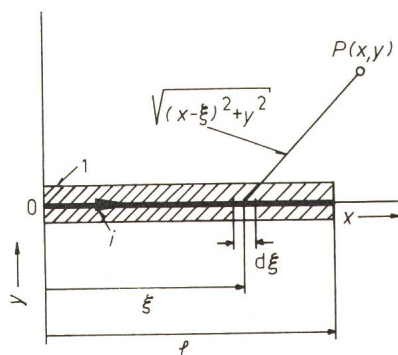


Fig. 3

Zur Bestimmung der magnetischen Feldstärke

1 Teilstück eines Blitzableiters; i Blitzstrom; l Teillänge des Blitzableiters; x, y, ξ Koordinaten; $d\xi$ Längenelement; $P(x,y)$ Punkt

beziehungsweise:

$$H_p = \frac{i}{4\pi} g$$

wenn

$$g = \frac{1}{y} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{y}{l-x}\right)^2}} + \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{y}{x}\right)^2}} \right] \quad (2)$$

g ist nur abhängig von den geometrischen Grössen der betrachteten Anordnung.

Für den magnetischen Fluss Φ in einem bestimmten Raum mit der Permeabilität μ um den Leiter gilt:

$$\Phi = \mu \frac{i}{4\pi} \iint g dx \cdot dy = \mu \frac{i}{4\pi} G \quad (3)$$

wobei die Grösse G , die fortan als geometrische Charakteristik bezeichnet werden soll, nur von geometrischen Abmessungen des stromdurchflossenen Leiters und einer den Fluss Φ einschliessenden Schleife abhängig ist.

Aus dem Induktionsgesetz und Gl. (3) ergibt sich für Schleifen in Luft mit der magnetischen Feldkonstanten $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ (H/m) der Betrag einer auf den Stromanstieg di/dt im Blitzableiter bezogenen induzierten Spannung u_s :

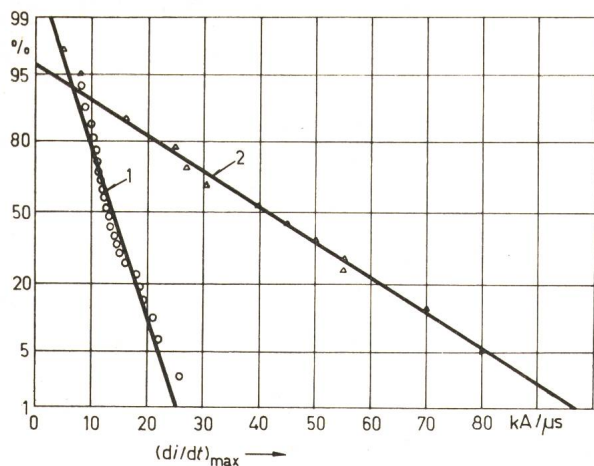


Fig. 4

Maximale Stirnstromteilheiten bei negativen Abwärtsblitzen ausgewertet nach Messungen in [3]

1 erster Teilblitz; 2 Folgeblitze; $(di/dt)_{max}$ maximale Blitzstromänderung

$$u_s = 0,1 |G| \left(\frac{kV}{kA/\mu s} \right) \quad (4)$$

wobei G in m einzusetzen ist.

Nach den Messungen von Berger und Vogelsanger [3] weisen über 80 % der Blitze negative Polarität auf, bestehen in der Mehrzahl der Fälle aus mindestens zwei Teilentladungen und haben weitaus grössere Stirnstromteilheiten als die relativ seltenen positiven Blitze. In Fig. 4 sind die prozentualen Häufigkeiten der maximalen Stromteilheiten für negative Abwärtsblitze angegeben, die in weitgehend ebenem Gelände und bei üblichen Bauhöhen normalerweise zu erwarten sind. Nach dieser Auswertung muss bei 1 % der Folgeblitze eine Stromteilheit von 96 kA/μs erwartet werden, während der Mittelwert bei 41,5 kA/μs liegt. Auf Grund dieses Ergebnisses erscheint es sinnvoll, für die Ermittlung der maximal zu erwartenden induzierten Spannungen einen Maximalwert des Stromanstieges von 100 kA/μs anzunehmen; hiermit erhält man für den Betrag der maximalen induzierten Spannung U :

$$U = 10 |G| \quad (kV) \quad (5)$$

wenn G in m eingesetzt wird.

$$G = \int_{x=0}^{x=x_0} \int_{y=r}^{y=y_0} g \, dx \cdot dy = 2 \left\{ \sqrt{x_0^2 + y_0^2} - \sqrt{x_0^2 + r^2} + r - y_0 + x_0 \ln \frac{y_0 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{x_0} \right)^2} \right]}{r_0 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{x_0} \right)^2} \right]} \right\} \quad (7)$$

Bei bekannter Durchschlagfeldstärke von Anordnungen in atmosphärischer Luft kann nun mit Hilfe von Gl. (5) der notwendige Sicherheitsabstand s errechnet werden. Im allgemeinen wird man als unteren Wert der elektrischen Festigkeit etwa 500 kV/m ansehen können, so dass sich für den Sicherheitsabstand an der möglichen Überschlagstelle ergibt:

$$s \geq 0,02 G \quad (m) \quad (6)$$

wenn G in m eingesetzt wird.

Wenn n gleichwertige parallele Blitzstromableiter vorhanden sind, die sich gegenseitig nicht wesentlich beeinflussen, kann der nach Gl. (6) für s erhaltene Wert durch den Faktor n geteilt werden.

Die Oszillogramme von negativen Folgeblitzströmen [3] legen die Annahme nahe, dass die für die Betrachtungen mass-

gebende Stromänderung in der Stirn in erster Näherung konstant ist; dies hat zur Folge, dass auch die Änderung des magnetischen Feldes konstant ist und somit während der Stirnzeit der Blitzströme als induzierte Spannungen in erster Näherung rechteckförmige Stoßspannungen mit einer Dauer um $1 \mu s$ zu erwarten sind. Wenn nun für die zu betrachtenden Überschlagstellen die Durchschlagfestigkeiten bei diesen Rechteckspannungen bekannt sind (sie sind für einige prinzipielle Anordnungen aus den in [4] angegebenen Rechteckstosskennlinien zu entnehmen), können natürlich diese Festigkeiten zur exakten Festlegung der Sicherheitsabstände herangezogen werden; dies führt in der Regel zu einer Reduzierung des Faktors 0,02 in Gl. (6).

Für die weiteren Betrachtungen seien nun noch folgende Annahmen getroffen: Der Ohmsche Spannungsfall des Blitzableiters wird vernachlässigt, da er in der Regel wesentlich geringer ist als die während des Blitzstromanstieges in der Umgebung des Ableiters induzierten Spannungen. Weiterhin werden in den betrachteten Blitzableitern und Schleifen quasi-stationäre Vorgänge angenommen, d.h. das Laufzeitverhalten wird nicht berücksichtigt; dies ist für die hier durchgeführten Berechnungen wohl zulässig, da bei einer Stromteilheit von 100 kA/μs die längenbezogene Stromdifferenz in einem Blitzableiter nur $1/3$ kA/m beträgt.

3. Geometrische Charakteristiken grundlegender Anordnungen

Im folgenden sollen zunächst die geometrischen Charakteristiken G zweier grundlegender Anordnungen berechnet werden, mit deren Hilfe auf Grund eines später dargelegten Superpositionsverfahrens noch weitere Charakteristiken prinzipieller Anordnungen bestimmt werden können.

3.1 Erste grundlegende Anordnung

Es wird ein Teilstück eines Blitzableiters mit der Länge l und dem Radius r gemäss Fig. 5 betrachtet, das vom Strom i durchflossen wird. Um diesen Leiter wird in der x - y -Ebene eine rechteckige Schleife mit den Abmessungen x_0 und $y_0 - r$ gelegt, so dass sie die schraffiert gezeichnete Fläche einschliesst. Unter Zugrundelegung der Gl. (2) gilt für die geometrische Charakteristik G dieser Schleife gemäss Gl. (3):

Wenn $r \ll x_0, y_0$, eine in sehr vielen Fällen gegebene Voraussetzung, vereinfacht sich Gl. (7):

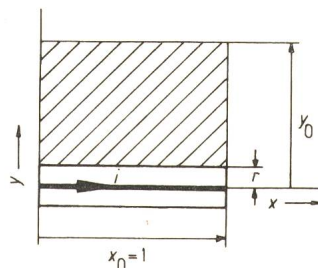


Fig. 5

Anordnung gemäss 3.1

i Blitzstrom; r Radius des Blitzableiters; x, y Koordinaten; x_0, y_0 Strecken; l Teillänge eines Blitzableiters

$$G = 2 x_0 \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{x_0}\right)^2} - 1 - \frac{y_0}{x_0} + \ln \frac{2 y_0}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{x_0}\right)^2} \right]} \right\} \quad (8)$$

Beispielsweise ergibt sich für eine Schleife mit den Abmessungen $x_0 = y_0 = 1$ m bei einem üblichen Radius des Blitzableiterstückes $r = 0,004$ m für G ein Wert von 9,48 m. Gemäss Gl. (5) und ihren Voraussetzungen muss in der betrachteten Schleife mit einer infolge der Blitzstromänderung induzierten Spannung U von 94,8 kV gerechnet werden, die nach Gl. (6) einen Sicherheitsabstand s von 0,47 m bedingen würde.

Für den Fall der in y -Richtung unendlich ausgedehnten Schleife ($y_0 \rightarrow \infty$) würde sich aus Gl. (8) ergeben:

$$G = 2 x_0 \left(\ln \frac{2 x_0}{r} - 1 \right)$$

3.2 Zweite grundlegende Anordnung

Es wird wiederum ein in Fig. 6 dargestelltes Teilstück eines vom Strom i durchflossenen Blitzableiters von der Länge l und dem Radius r betrachtet. Die rechteckige, die schraffierte Fläche in der x - y -Ebene einschliessende Schleife, deren geometrische Charakteristik berechnet werden soll, hat die Abmessungen x_0 und $y_0 - r$. Mit den Gln. (2) und (3) ergibt sich für G dieser Schleife:

$$G = \int_{x=1}^{x=1+x_0} \int_{y=r}^{y=y_0} g \, dx \cdot dy = \sqrt{x_0^2 + r^2} + \sqrt{l^2 + r^2} + \sqrt{(x_0 + l)^2 + y_0^2} + y_0 - \sqrt{x_0^2 + y_0^2} - \sqrt{y_0^2 + l^2} - \sqrt{(x_0 + l)^2 + r^2} - r +$$

$$+ (x_0 + l) \cdot \ln \frac{y_0 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{x_0 + l}\right)^2} \right]}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{x_0 + l}\right)^2} \right]} - x_0 \cdot \ln \frac{y_0 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{x_0}\right)^2} \right]}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{x_0}\right)^2} \right]} - l \cdot \ln \frac{y_0 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{l}\right)^2} \right]}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{l}\right)^2} \right]} \quad (9)$$

Wenn $r \ll l, x_0, y_0$ angenommen werden kann, vereinfacht sich Gl. (9):

$$G = \sqrt{(x_0 + l)^2 + y_0^2} + y_0 - \sqrt{x_0^2 + y_0^2} - \sqrt{y_0^2 + l^2} + (x_0 + l) \cdot \ln \frac{2 y_0}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{x_0 + l}\right)^2} \right]} -$$

$$- x_0 \cdot \ln \frac{2 y_0}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{x_0}\right)^2} \right]} - l \cdot \ln \frac{2 y_0}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{l}\right)^2} \right]} \quad (10)$$

Für einen unendlich ausgedehnten Leiter ($l \rightarrow \infty$) – dieser Fall wird für Superpositionen häufig herangezogen werden – gilt:

$$G = \sqrt{x_0^2 + r^2} + y_0 - \sqrt{x_0^2 + y_0^2} - r + x_0 \cdot \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{x_0}\right)^2}}{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{x_0}\right)^2}} \quad (11)$$

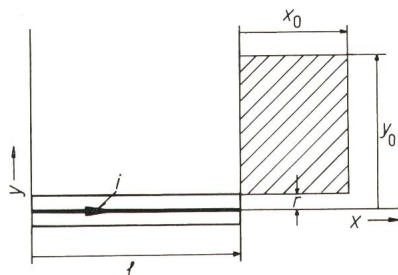


Fig. 6
Anordnung gemäss 3.2
Bezeichnungen siehe Fig. 5

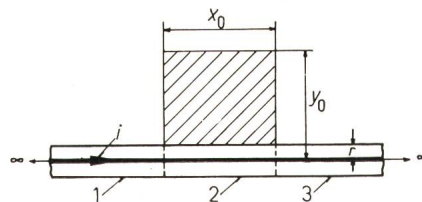


Fig. 7
Anordnung gemäss 4.1
1, 2, 3 Teilstücke des Blitzableiters
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 5

Für die weitere Voraussetzung $r \ll x_0, y_0$ wird schliesslich die Gl. (12) erhalten:

$$G = x_0 + y_0 - \sqrt{x_0^2 + y_0^2} + x_0 \cdot \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{y_0}{x_0}\right)^2}}{2} \quad (12)$$

Bei einer Schleife mit den Abmessungen $x_0 = y_0 = 1$ m errechnet sich für G ein Wert von 0,774 m, entsprechend einer nach Gl. (5) maximal zu erwartenden Spannung U von 7,74 kV und einem einzuhaltenen Sicherheitsabstand s nach Gl. (6) von 0,039 m.

4. Superposition von geometrischen Charakteristiken

Die im Abschnitt 3 behandelten geometrischen Charakteristiken von zwei grundlegenden Anordnungen können – ent-

sprechend der Superpositionsmöglichkeit magnetischer Felder – überlagert werden und somit die Charakteristiken weiterer

Anordnungen, die sich aus den grundlegenden Anordnungen zusammensetzen lassen, erhalten werden. Dies soll im folgenden an einigen auch für die Praxis bedeutsamen Beispielen erläutert werden.

4.1 Erstes Beispiel

In Fig. 7 ist ein unendlich ausgedehnter Blitzableiter mit dem Radius r dargestellt, der vom Strom i durchflossen wird. Gesucht ist die geometrische Charakteristik der in der x - y -Ebene liegenden rechteckigen Schleife mit den Abmessungen x_0 und $y_0 - r$, die die schraffierte Fläche einschliesst. G wird erhalten durch Superposition der durch die Leiterstücke 1, 2 und 3 bedingten geometrischen Charakteristiken G_1, G_2 und G_3 , die in den Abschnitten 3.1 und 3.2 berechnet wurden:

$$G = G_1 + G_2 + G_3 = 2 G_1 + G_2$$

G_1 wird nach Gl. (11), G_2 nach Gl. (7) bestimmt und man erhält die einfache Beziehung:

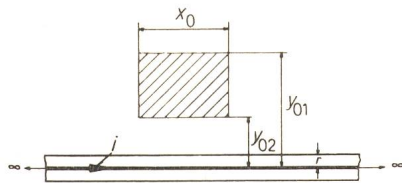


Fig. 8
Anordnung gemäss 4.2
Bezeichnungen siehe Fig. 5

$$G = 2 x_0 \cdot \ln \frac{y_0}{r} \quad (13)$$

Beispielsweise wird für G einer Schleife mit $x_0 = y_0 = 1$ m bei $r = 0,004$ m ein Wert von 11 m erhalten.

4.2 Zweites Beispiel

Es ist die geometrische Charakteristik einer rechteckigen Schleife gesucht, die eine schraffierte Fläche mit den Abmessungen x_0 und $y_{01} - y_{02}$ gemäss Fig. 8 einschliesst; die Schleife befindet sich in der Nähe eines unendlich ausgedehnten, vom Strom i durchflossenen Blitzableiters mit dem Radius r . Die gesuchte Charakteristik G ergibt sich durch Superposition der nach Gl. (13) gegebenen Charakteristiken:

$$G = 2 x_0 \left(\ln \frac{y_{01}}{r} - \ln \frac{y_{02}}{r} \right) = 2 x_0 \cdot \ln \frac{y_{01}}{y_{02}} \quad (14)$$

Zum Beispiel ergibt sich für G bei $x_0 = y_{02} = 1$ m und $y_{01} = 2$ m ein Wert von 1,39 m. Dieser Wert ist bei gleichen Schleifenabmessungen wesentlich kleiner als der im Beispiel zu Gl. (13) ermittelte Wert. Man erkennt, wie wesentlich die Lage der Schleifen für die Höhe der induzierten Spannungen ist.

4.3 Drittes Beispiel

Es wird eine rechteckige Schleife zwischen zwei parallelen Blitzableitern gemäss Fig. 9 betrachtet. Jeder der beiden unendlich ausgedehnten Leiter mit dem Radius r wird vom Strom $i/2$ durchflossen. Die Charakteristik G der Schleife um die schraffiert gezeichnete Fläche mit den Abmessungen x_0 und $y_{022} - y_{021}$ bzw. $y_{012} - y_{011}$ ergibt sich aus der Superposition der nach Gl. (14) gegebenen Charakteristiken.

Wenn die beiden Leiter gleichsinnig vom Strom durchflossen werden, ist:

$$G = 2 x_0 \left(\ln \frac{y_{022}}{y_{021}} - \ln \frac{y_{012}}{y_{011}} \right) = 2 x_0 \cdot \ln \frac{y_{022} y_{011}}{y_{012} y_{021}} \quad (15)$$

Bei gegensinnigem Stromfluss in den beiden Leitern ergäbe sich:

$$G = 2 x_0 \cdot \ln \frac{y_{022} y_{012}}{y_{011} y_{021}}$$

4.4 Superpositionsregeln

Die angeführten Beispiele haben das Superpositionsprinzip deutlich gemacht:

a) Die durch verschiedene gerade Leiterstücke in einer Schleife bedingten geometrischen Charakteristiken können addiert bzw. subtrahiert werden (siehe Beispiel im Abschnitt 4.1). Zur vorzeichenrichtigen Einführung der einzelnen G kann beispielsweise vereinbart werden: Man sieht das Leiterstück entlang in Richtung des Stromes; wenn die von der Schleife eingeschlossene Fläche links vom Leiterstück oder seiner Verlängerung liegt, wird der betreffende Wert von G positiv gezählt, wenn die Fläche rechts liegt, dagegen negativ.

b) Die unbekannte Charakteristik einer bestimmten Schleife kann durch die Superposition der einzelnen G -Werte bekannter Schleifen gewonnen werden (siehe Beispiele in den Abschnitten 4.2 und 4.3).

Für die Superpositionen werden insbesondere die Gl. (7) bis (12) sowie auch (13) bis (16) heranzuziehen sein.

5. Geometrische Charakteristiken von häufiger vorkommenden Anordnungen

Im folgenden werden die Charakteristiken einiger, bei Blitzableitern häufiger anzutreffenden Anordnungen näher behandelt, die darüber hinaus wieder für Superpositionen herangezogen werden können, um weitere interessierende Schleifenbildungen zu erfassen.

5.1 Erste Anordnung

Es wird ein vom Strom i durchflossenes rechteckiges Blitzableiterstück mit dem Radius r und den Seitenlängen a und b gemäss Fig. 10 betrachtet. Wenn angenommen wird, dass $r \ll a, b$ ist, ergibt sich für G der die schraffierte Fläche einschliessenden Schleife durch Superposition der nach Gl. (8)

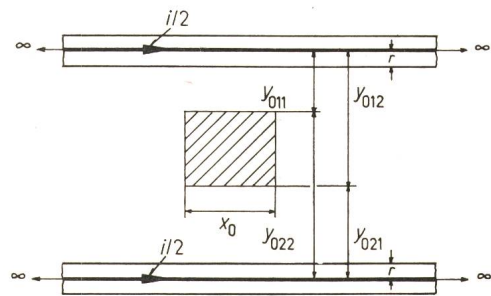


Fig. 9
Anordnung nach 4.3
 $i/2$ halber Blitzstrom; $y_{011}, y_{021}, y_{012}, y_{022}$ Strecken
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 5

gegebenen Beziehung, wobei für x_0 und y_0 dieser Gleichung die entsprechenden Werte a und b einzusetzen sind:

$$G = 2 \cdot 2a \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} - 1 - \frac{b}{a} + \ln \frac{2b}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2}\right]} \right\} + 2 \cdot 2b \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2} - 1 - \frac{a}{b} + \ln \frac{2a}{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}\right]} \right\} \quad (16)$$

Für eine quadratische Schleife mit $a = b$ vereinfacht sich Gl. (17):

$$G = 8a \left(\ln \frac{a}{r} - 0,77 \right) \quad (17)$$

Beispielsweise ergibt sich für $a = 1$ m bei $r = 0,004$ m für G ein Wert von 38 m.

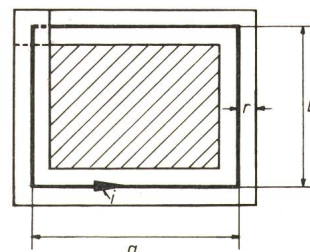


Fig. 10
Anordnung nach 5.1
ohne Zuleitungen
 a, b Strecken
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 5

Für ein rechteckiges Blitzableiterstück mit unendlich langen Zuleitungen nach Fig. 11 wird, wieder unter der Voraussetzung $r \ll a, b$, für G der die schraffierte Fläche einschliessenden Schleife durch Superpositionen der Charakteristiken nach den Gln. (17) und (12) folgende Beziehung erhalten:

$$G = G_{G1.(17)} + 2(a + b - \sqrt{a^2 + b^2}) + a \cdot \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2}}{2} + b \cdot \ln \frac{1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}}{2} \quad (18)$$

Mit der Kenntnis von G dieser Anordnung kann beispielsweise ermittelt werden, für welche Spannung die sich überkreuzenden Leitungsteile gegeneinander isoliert werden müssen, um einen Überschlag zu vermeiden.

5.2 Zweite Anordnung

Es wird eine Anordnung der Fig. 12 betrachtet: Ein im rechten Winkel abknickender, unendlich ausgedehnter Blitzableiter mit dem Radius r wird vom Strom i durchflossen. Die geometrische Charakteristik einer die schraffierte Fläche einschliessenden Schleife mit den Abmessungen $a - r$ und $b - r$ berechnet sich mit Hilfe der Gln. (2) und (3):

$$G = 2(\sqrt{a^2 + b^2} + r\sqrt{2} - \sqrt{a^2 + r^2} - \sqrt{b^2 + r^2}) - r \cdot \ln \frac{a \cdot b(1 + \sqrt{2})}{r^2} + a \cdot \ln \frac{b^2 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{a}\right)^2}\right]}{r^2 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2}\right]} + b \cdot \ln \frac{a^2 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{b}\right)^2}\right]}{r^2 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}\right]} + r \cdot \ln \frac{r^2 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{r}\right)^2}\right] \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{r}\right)^2}\right]}{ab} \quad (19)$$

Für $r \ll a, b$ vereinfacht sich Gl. (19):

$$G = 2(\sqrt{a^2 + b^2} - a - b) + a \cdot \ln \frac{2b^2}{r^2 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2}\right]} + b \cdot \ln \frac{2a^2}{r^2 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}\right]} \quad (20)$$

Gl. (20) kann auch aus der Superposition der G -Werte gemäss den Gln. (8) und (10) gewonnen werden.

Für eine quadratische Schleife mit $a = b$ ergibt sich aus Gl. (20):

$$G = 4a \left(\ln \frac{a}{r} - 0,39 \right) \quad (21)$$

Wenn $a = 1$ m und $r = 0,004$ m, errechnet sich G zu 20,5 m.

5.3 Dritte Anordnung

Es wird mit Hilfe der Gln. (2) und (3) die geometrische Charakteristik einer rechteckigen Schleife mit den Abmessungen $a - 2r$ und $b - 2r$ nach Fig. 13 ermittelt, die die schraffierte Fläche in einem unendlich ausgedehnten U-förmigen Blitzableiter umschliesst. Der Leiterradius ist r , der Leiterstrom i .

$$G = 2(2\sqrt{a^2 + (b - r)^2} + r\sqrt{2} - \sqrt{r^2 + (b - r)^2} - \sqrt{a^2 + r^2}) + a \cdot \ln \frac{(b - r)^2 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{r}{a}\right)^2}\right]}{r^2 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b - r}{a}\right)^2}\right]} + b \cdot \ln \frac{a[b - r + \sqrt{r^2 + (b - r)^2}]}{r[b - r + \sqrt{a^2 + (b - r)^2}]} + r \cdot \ln \frac{r^2 [r + \sqrt{a^2 + r^2}] [r + \sqrt{r^2 + (b - r)^2}] [b - r + \sqrt{a^2 + (b - r)^2}]}{a^2 (b - r)^2 [b - r + \sqrt{r^2 + (b - r)^2}] (1 + \sqrt{2})^2} \quad (22)$$

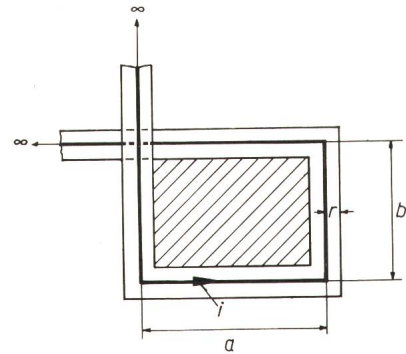


Fig. 11
Anordnung nach 5.1
mit Zuleitungen
 a, b Strecken

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 5

Für $r \ll a, b$ vereinfacht sich Gl. (22) zu der in Gl. (23) für G angegebenen Beziehung, die auch wieder aus der Superposition der G -Werte gemäss den Gln. (8) und (10) gewonnen werden kann:

$$G = 4(\sqrt{a^2 + b^2} - a - b) - 2 \left\{ a \cdot \ln \frac{r^2 \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2}\right]}{2b^2} + b \cdot \ln \frac{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2}\right]}{2a} \right\} \quad (23)$$

Für eine quadratische Schleife mit $a = b$ ergibt sich aus Gl. (23):

$$G = 6a \left(\ln \frac{a}{r} - 0,52 \right) \quad (24)$$

Für $a = 1$ m und $r = 0,004$ m errechnet sich für G ein Wert von 30 m.

5.4 Vierte Anordnung

Eine weitere, im Blitzableiterbau relativ häufig anzutreffende Leitungsführung ist in Fig. 14 dargestellt: Ein U-förmiges Blitzableiterstück mit im rechten Winkel abgehenden unendlich langen Zuleitungen hat den Radius r und wird vom Strom i durchflossen. Die von der betrachteten Schleife eingeschlossene, schraffiert gezeichnete Fläche hat die Abmessungen $a - 2r$ und $b - 2r$. Für G dieser Anordnung ergibt sich eine schon recht umfangreiche Beziehung:

$$\begin{aligned}
G = 2 & \left\{ 2\sqrt{(a+r)^2 + (b-r)^2} + 2\sqrt{(a-r)^2 + (b-r)^2} + 4 \cdot \sqrt{2} \cdot r - 2\sqrt{(a+r)^2 + r^2} - 2\sqrt{(a-r)^2 + r^2} - 4\sqrt{(b-r)^2 + r^2} + \right. \\
& + a \cdot \ln \frac{(b-r)^2 [a+r + \sqrt{(a+r)^2 + r^2}] [a-r + \sqrt{(a-r)^2 + r^2}]}{r^2 [a+r + \sqrt{(a+r)^2 + (b-r)^2}] [a-r + \sqrt{(a-r)^2 + (b-r)^2}]} + \\
& + b \cdot \ln \frac{(a+r) [b-r + \sqrt{(b-r)^2 + r^2}]^2}{r [b-r + \sqrt{(a-r)^2 + (b-r)^2}] [b-r + \sqrt{(a+r)^2 + (b-r)^2}]} + \\
& + r \cdot \ln \frac{[a+r + \sqrt{(a+r)^2 + r^2}] [a-r + \sqrt{(a-r)^2 + (b-r)^2}]}{(a+r)^2 (b-r)^2 [a+r + \sqrt{(a+r)^2 + (b-r)^2}]} \cdot \\
& \cdot \frac{[b-r + \sqrt{(a-r)^2 + (b-r)^2}] [b-r + \sqrt{(a+r)^2 + (b-r)^2}]}{[a-r + \sqrt{(a-r)^2 + r^2}] [b-r + \sqrt{(b-r)^2 + r^2}]^2} \cdot \\
& \left. \cdot \frac{[r + \sqrt{(a+r)^2 + r^2}] [r + \sqrt{(a-r)^2 + r^2}] [r + \sqrt{(b-r)^2 + r^2}]^2}{(1 + \sqrt{2})^4} \right\} \quad (25)
\end{aligned}$$

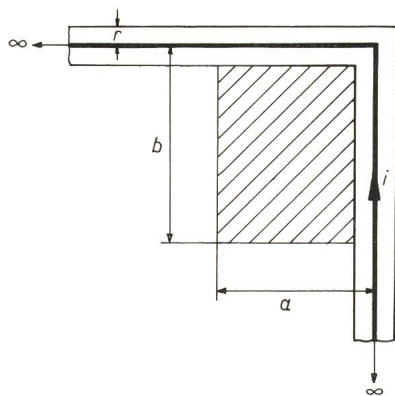


Fig. 12
Anordnung nach 5.2
Bezeichnungen siehe Fig. 5 und 11

Gl. (25), die insbesondere zur Festlegung der zulässigen Eigennäherung bei Blitzableitern von Bedeutung ist, wurde in Fig. 15 für den bei Blitzableitern üblichen Radius $r = 0,004$ m graphisch ausgewertet: Es wird G als Funktion der Seitenlänge $b = s + 2r$ dargestellt; Parameter ist die Seitenlänge a . In dem schraffiert gezeichneten Bereich ist die Gl. (6) nicht mehr erfüllt, d.h. es muss hier mit einem Überschlag längs s während des Blitzstromanstieges gerechnet werden, wenn der gesamte Blitzstrom über den betrachteten Blitzableiter fließt und für die Strecke s eine Festigkeit von 500 kV/m angenommen wird. Zum Vergleich ist auch die nach [2] sich ergebende Grenzkurve eingezeichnet.

Wenn, wie für praktische Fälle meist zutreffend, $r \ll a, b$ angenommen werden kann, lässt sich Gl. (25) vereinfachen:

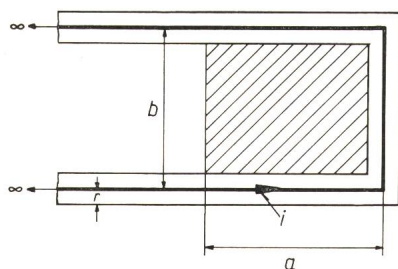


Fig. 13
Anordnung nach 5.3
Bezeichnungen siehe Fig. 5 und 11

$$G = 8(\sqrt{a^2 + b^2} - a - b) - \quad (26)$$

$$- 2 \left\{ 2a \cdot \ln \frac{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{b}{a}\right)^2} \right]}{2b} + b \cdot \ln \frac{r \left[1 + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2} \right]^2}{4a} \right\}$$

Für den Fall $a = b$ ergibt sich aus Gl. (26):

$$G = 6a \left(\ln \frac{a}{r} - 1,03 \right) \quad (27)$$

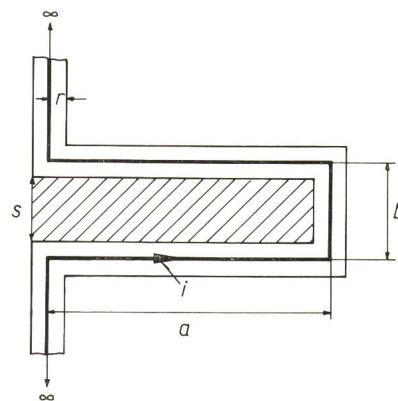


Fig. 14
Anordnung nach 5.4
 s Sicherheitsabstand
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 5 und 11

Aus dieser Gleichung errechnet sich G bei $a = 1$ m und $r = 0,004$ m zu 27 m.

5.5 Fünfte Anordnung

Hinsichtlich der zulässigen Eigennäherungen von Blitzableitern ist sicherlich auch eine Leitungsführung nach Fig. 16 interessant. Ein dreieckförmiges Leiterstück mit dem Radius r , vom Strom i durchflossen, ist mit unendlich ausgedehnten Zuleitungen versehen. Für die Bestimmung des notwendigen Sicherheitsabstandes bzw. des zulässigen Öffnungswinkels 2γ ist die Kenntnis der geometrischen Charakteristik der die schraffiert gezeichnete Fläche einschliessenden Schleife Voraussetzung. Da sich für G ein recht umfangreicher Ausdruck ergibt, sei hier auf seine Wiedergabe verzichtet und statt dessen in Fig. 17 für $r = 0,004$ m G abhängig vom Öffnungswinkel 2γ aufgetragen, wobei als Parameter die Dreiecklänge a eingeführt ist. Im schraffierten Bereich dieser Figur ist Gl. (6) nicht erfüllt,

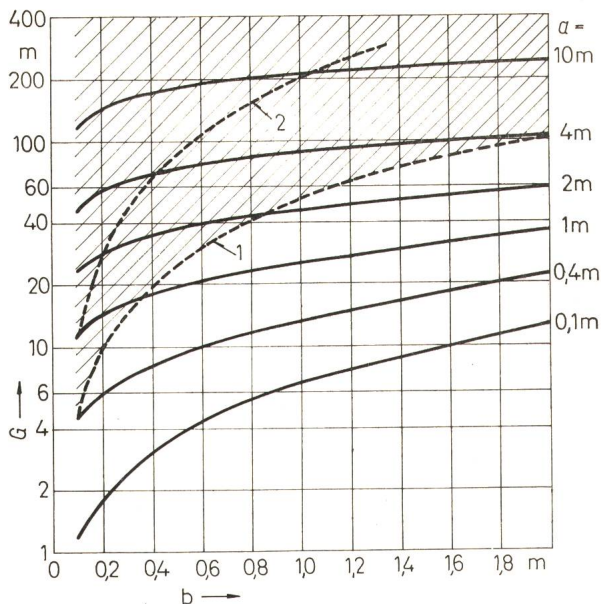


Fig. 15

Darstellung der Gl. (25) für $r = 0,004 \text{ m}$

1 Grenzcurve nach Gl. (6); 2 Grenzcurve nach [2]; G geometrische Charakteristik; a, b Strecken

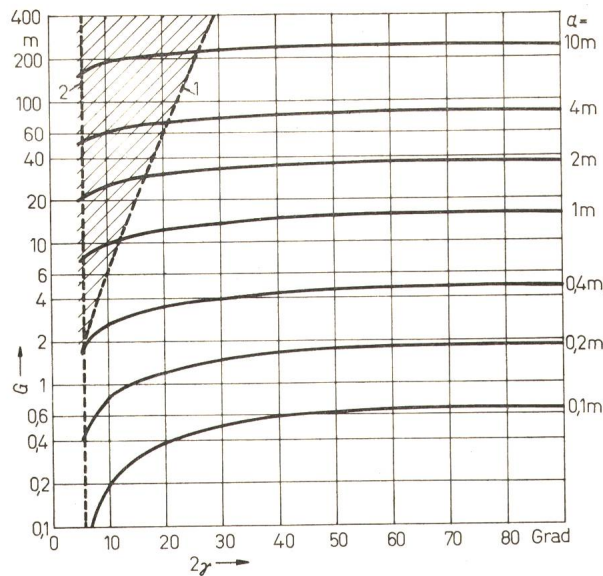


Fig. 17

Geometrische Charakteristik der Anordnung nach 5.5 für $r = 0,004 \text{ m}$
1 Grenzcurve nach Gl. 6; 2 Grenzcurve nach [2]; G geometrische Charakteristik; 2γ Öffnungswinkel; a Strecke

6. Schlussbetrachtung

d.h. in diesem Bereich kann ein Überschlag längs s nicht ausgeschlossen werden, wenn der gesamte Blitzstrom durch den betrachteten Blitzableiter fließt; im Gegensatz zu der in [2] festgelegten Bestimmung ist kein allgemein gültiger, von a unabhängiger Grenzwinkel anzugeben.

Unter der wohl vielfach zulässigen Annahme $r \ll a$ ist die Beziehung für G in Gl. (28) angegeben:

$$G = 2a \left[\frac{r}{a} \left(\text{ctg } 2\gamma + \frac{1}{\sin 2\gamma} + \frac{1}{\cos \gamma} \right) - \text{tg } \gamma (1 - 2 \sin \gamma) - 1 - \sin \gamma \cdot \sqrt{(1 + \text{tg } \gamma)^2 + (1 - \text{ctg } \gamma)^2} + \right. \\ \left. + \ln \frac{4 \left(\frac{a}{r} - \text{tg } \gamma \right) \left(\frac{a}{r} - \text{ctg } 2\gamma \right)}{1 + \frac{1}{\sin \gamma}} + \sin \gamma \cdot \ln \frac{\sin^2 \gamma (1 - \sin \gamma) \left(1 + \frac{r}{a \cos \gamma} \right) \left[\sqrt{(1 + \text{tg } \gamma)^2 + (1 - \text{ctg } \gamma)^2} + 1 + \text{tg } \gamma \right]^2}{(1 + \sin \gamma)^3} + \right. \\ \left. + 2 \sin^2 \gamma \cdot \ln \frac{\sin \gamma \sqrt{(1 + \text{tg } \gamma)^2 + (1 - \text{ctg } \gamma)^2} + 1 - \text{tg } \gamma - 2 \sin^2 \gamma}{2 \cos^2 \gamma} + \cos 2\gamma \cdot \ln \frac{\sin \gamma + \frac{r}{a \sin 2\gamma}}{1 + \sin \gamma} \right] \quad (28)$$

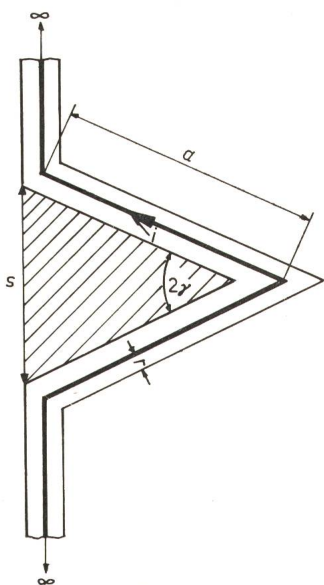


Fig. 16

Anordnung nach 5.5
 2γ Öffnungswinkel

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 5, 11 und 14

Der Verfasser wurde zu der vorliegenden Arbeit angeregt durch die Entwicklung und Dimensionierung blitzsicherer Zelte, die sehr unkonventionelle Schutzmassnahmen bedingen. Die hier erarbeiteten Berechnungsgrundlagen, insbesondere die Einführung einer anschaulichen geometrischen Charakteristik zur Bestimmung der durch die Blitzströme in der Um-

gebung von Blitzableitern induzierten Spannungen und der hieraus resultierenden Festlegung der notwendigen Sicherheitsabstände wird aber sicherlich für jeden von Interesse sein, der sich mit der optimalen Ausführung von Blitzschutzanlagen zu befassen hat, insbesondere, da eine Reihe von Leitungsführungen, die für Blitzableiter typisch sind, in einheitlicher Form präsentiert wird.

Abschliessend möchte der Verfasser Dipl.-Ing. H. Mirsch und R. Schiebeler für die Hilfe bei den Berechnungen und numerischen Auswertungen im Rahmen ihrer Diplomarbeiten vielfach danken.

Literatur

- [1] H. Prinz und J. Wiesinger: 25 Jahre Monte San Salvatore. Bull. SEV 59(1968)23, S. 1107...1108.
- [2] Ausschuss für Blitzableiterbau (ABB): Blitzschutz und allgemeine Blitzschutz-Bestimmungen. 8. Auflage. Berlin, VDE-Verlag, 1968.
- [3] 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.
- [4] J. Wiesinger: Funkenstrecken unter Steilstoßspannungen und ihre Bedeutung für die Isolationskoordination. Bull. SEV 60(1969)15, S. 672...682.

Adresse des Autors:

Priv.-Doz. Dr.-Ing. Johannes Wiesinger, Oberingenieur im Institut für Hochspannungs- und Anlagentechnik der TH München, Arcisstrasse 21, D-8 München 2.