Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 55 (1964)
Heft: 3

Artikel: Blitzsichere Freileitungen
Autor: Schwab, F.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916675

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

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

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

Download PDF: 02.10.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV)
und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Blitzsichere Freileitungen

Von *F. Schwab*, Zürich

621.315.1 : 621.316.98

Auf Grund der Annahme, dass nur die Schlagweite zwischen Blitzkopf und Erde darüber entscheidet, wo ein Blitz einschlägt, und der Erkenntnis, dass die entscheidende oder kritische Schlagweite direkt mit dem Scheitelwert des Blitzstromes zusammenhängt, kann auf einfache Weise entschieden werden wo ein Blitz einschlagen wird. Diese physikalische Grundlage des Einschlagvorganges ersetzt die bisherigen unsicheren Schutzwinkeltheorien: Unter Berücksichtigung dessen, dass in ein Phasenseil mit kleinen Stromscheitelwerten einschlagende Blitze den Hochspannungsleitungen keinen Schaden zufügen können, wird der Schutzwert von Erdseilen an einigen Beispielen gezeigt.

En admettant que seule la distance disruptive entre la tête de l'éclair et la terre est décisive pour qu'un impact se produise, et sachant que cette distance critique dépend de la valeur de crête du courant d'éclair, on peut déterminer fort simplement quel sera le point d'impact de la foudre. Ce principe physique du processus d'impact remplace maintenant les théories incertaines, basées sur l'angle de protection. En tenant compte du fait que des éclairs atteignant un câble de phase avec de faibles valeurs de crête de courant ne peuvent pas endommager les lignes à haute tension, l'auteur montre par des exemples la valeur de protection de ces câbles.

Freileitungen unterliegen zwei Störeinwirkungen durch atmosphärische Entladungen: Durch Blitzeinschlag in die Masten oder ins Erdseil mit Rücküberschlag auf ein Phasenseil, oder durch einen direkten Einschlag in ein Phasenseil. Der erste Fall ist bei den heutigen Höchstspannungsleitungen von nur verschwindender Bedeutung, wegen den bis zu 4,4 m langen Isolatorenketten und wegen dem Mechanismus des Vorwachsens des Blitzleitkanals.

Die früher angewendeten Schutzraumtheorien basierten auf empirischen Annahmen ohne physikalische Grundlagen und wurden, da sie nicht befriedigen konnten, immer wieder abgewandelt. Der sog. Blitzschutzwinkel wurde allmählich von 90° auf 45°, 30° und noch weiter herabgesetzt ohne dass ein 100-%iger Schutz erreicht werden konnte [1] [1]). Erst die Blitzforschung der letzten zwanzig Jahre konnte physikalisch erwiesene Grundlagen schaffen, die ein Bild über die Schutzwirkung von Erdseilen und Blitzableitern ergaben. Der Vorwachsmechanismus des Leitblitzes konnte erstmals mit Hilfe der schnell rotierenden Boys-Kameras untersucht werden [2; 3], und es zeigte sich, dass der Leitkanal ruckweise in Stufen von 10...100 m mit zeitlichen Ruhepausen von 40...120 µs von der Wolke gegen Erde vorwächst. Der so aufgebaute Leitkanal verhält sich wie ein geladener elektrischer Leiter, wobei die Spannung zwischen dem Kopf des Leitkanals und der Erde in jedem Moment ungefähr konstant bleibt [4]. Der Überschlag vom Blitzkopf zur Erde findet statt, sobald die mittlere Feldstärke auf ca. 3 kV/cm angestiegen ist. Neueste Messungen der 50-%-Überschlagsspannung mit Wechselspannung ergaben einen Scheitelwert von 2800 kV bei 8,5 m, was einer mittleren Feldstärke von 3,3 kV/cm entspricht [5]. Die letzte Schlagweite des Blitzes ist bestimmt durch diese Feldstärke und die Spannung des Blitzkanals, wobei es sich herausstellte, dass der Einfluss der Form und des Ortes der Gegenelektrode sehr gering ist: Schon die Berechnung der elektrostatischen Feldänderung durch ein 50 m über dem Erdboden angeordnetes Erdseil mit Hilfe einer einfachen Spiegelung zeigt, dass in einem horizontalen Abstand von 50 m die Störung des ursprünglich homogenen Feldes durch das Erdseil nur noch 10 % beträgt. Messungen im elektrolytischen Trog mit 50 Hz und 10 kHz ergaben, dass beim stufenweisen Vorwachsen des Leitblitzes der Einfluss des Erdseiles auf einen noch kleineren Raum reduziert wird, und dass eine merkliche Beeinflussung der Vorwachsrichtung des Blitzes erst näher als 12 m vom Erdseil beobachtet werden kann. Die Schutzwirkung auf grössere Distanzen solcher und ähnlicher Anordnungen wurde bis heute eher überschätzt.

Die Spannung des Blitzkopfes gegenüber Erde hängt mit der Ladung des Blitzkanals zusammen [6]. Die Ladungsdichte, d. h. die auf die Längeneinheit bezogene Ladung des Kanals ist am Kopf am grössten und nimmt gegen die Wolke exponentiell ab. Der Fehler, der durch die Annahme einer linearen Ladungsverteilung entsteht, ist klein, da der massgebende Faktor, die mittlere elektrische Feldstärke, hauptsächlich vom unteren Teil des Blitzkanals bestimmt wird. Diese Ladung bestimmt auch den Stromstoss des Hauptblitzes, so dass für jede Blitzkanalladung und somit für jeden Scheitelwert des Hauptblitzstromes die Feldstärke am Erdboden und die Schlagweite berechnet werden können, über die sich der Blitzstromkreis auf Erde schliesst [6]. Dabei ist es gleich, ob diese Schlagweite durch eine Fangentladung von der Erde nach oben oder als letzte Stufe des nach unten vorwachsenden Blitzes überwunden wird [7]. Somit entscheidet nur noch die räumliche Lage der geerdeten Objekte, wo der Blitz einschlagen wird. Das heisst, wenn die kritische mittlere Feldstärke von 3 kV/cm erreicht ist, entscheidet in erster Näherung nur die Distanz vom Blitzkopf zum Erdseil, oder zu einem Phasenseil bzw. zur Erde darüber, welches der drei Objekte vom Blitz getroffen wird.

Es stellt sich in erster Linie die Frage, von welcher Stromstärke an ein Blitzeinschlag in ein Phasenseil der Freileitung

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

gefährlich werden kann, mit anderen Worten, wann ein Überschlag über die Isolatorenkette zu befürchten ist. Wird ein Phasenseil einer Freileitung vom Blitz getroffen, so drückt dieser der Leitung in jedem Fall seinen Strom auf. Für die entstehende Spannungswelle ist somit der Wellenwiderstand des Phasenseiles gegen Erde massgebend. Da der Blitz hohe Frequenzen enthält, kann in der Erde eine Stromverdrängung an die Oberfläche angenommen werden, so dass nur mit dem elektrischen Feld in der Luft gerechnet werden muss. Unter dieser Voraussetzung können der Induktivitätsbelag L' (μH/km) und der Kapazitätsbelag C' μF/km) berechnet und daraus der Wellenwiderstand Z der Leiter bestimmt werden [8]:

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = 138 \log \frac{4h}{d} \qquad [\Omega]$$

h Höhe des Leiters über Boden; d Durchmesser des Leiters.

Der Äquivalentdurchmesser für Zweierbündel berechnet sich zu:

$$d' = 2\sqrt{D\, r_0}$$

D Abstand der zwei Leiter; r_0 Radius eines Leiters.

Für den 380-kV-Bündelleiter mit $D = 400$ mm und $r_0 = 15{,}93$ mm wird $d' = 160$ mm und für den 220-kV-Leiter mit $D = 400$ mm und $r_0 = 11{,}25$ mm wird $d' = 134$ mm.

Da der Blitzstrom, wenn er ein Phasenseil trifft, in zwei Richtungen abfliessen kann, wirkt für die auftretende Spannung auf einem Phasenseil nur der halbe Wellenwiderstand Z':

380 kV:	$H = 32$ m	$Z' = 200\ \Omega$	(Tannenbaumleitung)
380 kV:	$H = 18{,}5$ m	$Z' = 184\ \Omega$	(Portalleitung)
220 kV:	$H = 23{,}5$ m	$Z' = 197\ \Omega$	(Tannenbaumleitung)
150 kV:	$H = 19{,}5$ m	$Z' = 245\ \Omega$	(Tannenbaumleitung)

H ist die mittlere Höhe der mittleren Phase über dem Erdboden.

In der Schweiz beträgt die Haltestoßspannung U für Isolatorenketten von 380-kV-Leitungen ca. 1,5 MV, der 220-kV-Leitungen ca. 1 MV und der 150-kV-Leitungen ca. 750 kV. Somit wird der Scheitelwert des maximalen Blitzstromes, der beim Einschlagen in ein Phasenseil noch keinen Überschlag erzeugt:

$$\hat{I} \leq \frac{U}{Z'}$$

380 kV:	$\hat{I} = 7{,}5$ kA	(Tannenbaumleitung)
380 kV:	$\hat{I} = 8{,}16$ kA	(Portalleitung)
220 kV:	$\hat{I} = 5{,}08$ kA	(Tannenbaumleitung)
150 kV:	$\hat{I} = 3{,}06$ kA	(Tannenbaumleitung)

Setzt man voraus, dass der Blitz vertikal gegen den Erdboden vorwächst, muss nun der geometrische Ort gleicher Distanzen von allen möglichen Lagen des Blitzkopfes zum Erd- und Phasenseil und zur Erde gesucht werden. Betrachtet man einen Schnitt senkrecht zu den Leitungsseilen, so ist darin der geometrische Ort aller Punkte mit gleichem Abstand zu einer Ebene (Erde) und einer parallel dazu verlaufenden Linie (Phasenseil) eine Parabel mit dem Brennpunkt F auf dem Phasenseil und dem Parameter p gleich dem Abstand des Phasenseils zur Erde. Jedes der drei Phasenseile bestimmt eine solche Parabel. Um alle Phasen miteinander und somit die ganze Leitung betrachten zu können, muss eine Hüllparabel um die drei Phasenparabeln herum gelegt werden. Der geometrische Ort aller Punkte mit gleichem Abstand zu zwei parallelen Linien (Erdseil und Phasenseil) ist die Mittelsenkrechte zu diesen beiden Linien. Da die Erdseile immer höher angeordnet werden müssen als die Phasenseile, schneiden sich die Hüllparabel und die Mittelsenkrechte in einem Punkt und bilden so einen flügelartigen Ausschnitt. Nun ist ersichtlich, dass alle Blitzköpfe zwischen der Parabel und der Erde in die Erde schlagen werden, alle Blitzköpfe innerhalb des Flügels in ein Phasenseil und alle oberhalb der Mittelsenkrechten ins Erdseil [9].

32'560-566

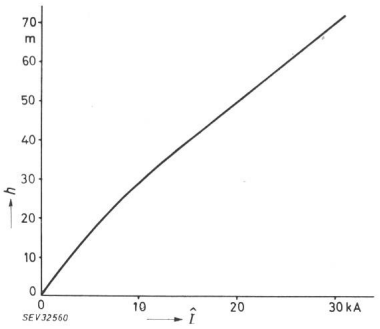

Fig. 1
Schlagweite h in Funktion des Blitzstromes $\hat{I}$ zwischen dem Blitzkopf und der Einschlagstelle

Da die Schlagweiten in Funktion der Blitzstromstärken nach Fig. 1 bekannt sind [6], muss nun durch richtige Anordnung der Erdseile der flügelartige Ausschnitt so klein gemacht werden, dass die Schlagweiten der maximalen Blitzscheitelströme, die zum Überschlag der Isolatorenketten führen würden, noch ausserhalb des Flügels liegen.

Man erkennt sofort, dass diese Forderung mit nur einem Erdseil unmöglich zu erfüllen ist, mit zwei Erdseilen hingegen ohne weiteres bei den Portal- und den Y-Masten. Bei den Tannenbaumleitungen ist es theoretisch nur beim 380-kV-Typ möglich, die Leitung blitzsicher zu konstruieren. Praktisch ist diese Lösung zu teuer, da der Erdseilausleger 16 m lang sein müsste. Aber auch bei kürzeren Auslegern wird, wie es einige bestehende Leitungen zeigen, bei Leitungen mit Tannenbaummasten durch zwei Erdseile die Wahrscheinlichkeit eines Blitzeinschlages in ein Phasenseil wesentlich verringert. Vergleicht man in Tabelle I z. B. die 132-kV-Leitung von Bagnell nach Rivermines mit zwei Erdseilen, mit der 138-kV-Leitung von Toronto nach Akron mit nur einem Erdseil, aber ähnlichem Mastbild, so zeigt die 17jährige Statistik bei zwei Erdseilen 82mal weniger Leitungs-

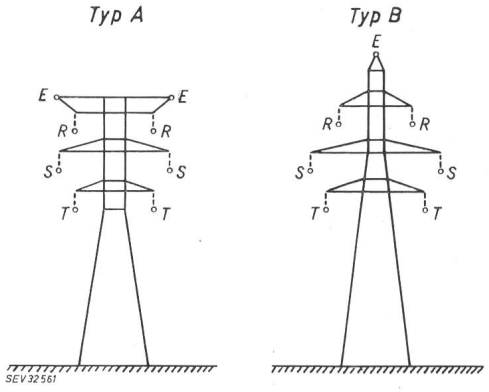

Fig. 2
Tannenbaum-Mastbilder mit ein und zwei Erdseilen
R, S, T Phasenleiter; *E* Erdseil

Vergleich einiger bestehenden Leitungen mit 2, 1 und 0 Erdseilen

Tabelle I

Leitung	Gesellschaft	Spannung kV	Zahl Erdseile	Mastbild gemäss Fig. 2	Länge km	Jahre Statistik	Ausfälle pro 100-km-Leitungslänge und pro Gewittertag
Bagnell–Rivermines	Un. Electric Co. Miss.	132	2	A	192	17	0,001
Toronto–Akron	Ohio Edison Co.	138	1	B	100	17	0,082
Boulder Dam–Los Angeles	City of Los Angeles	287	2	A	424	7	0,0016
Coulee–Spokane	Bonneville Power Ad.	230	0	B	134	4	0,603
Columbia–Cincinnati	Cincinnati Co.	66	2	A	29	9	0
Ambridge–North Substat.	Duquesne Light Co.	66	1	B	45	6	0,154
Maligne–Quebec	Shawinigan Co.	165	2	A	218	5	0,012
Innertkirchen–Mühleberg	BKW, Bern	150	1	B	100	5	0,081

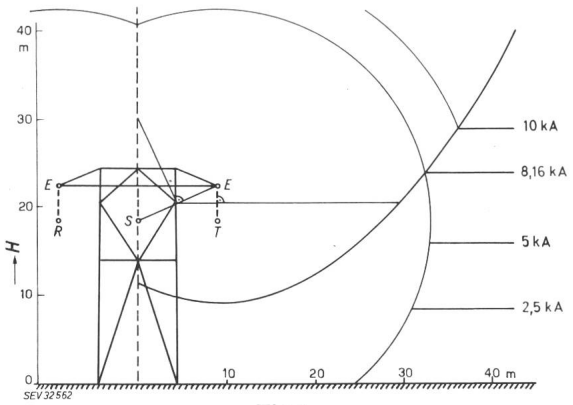

Fig. 3

Schema eines Portalmastes

R, S, T Phasenleiter; *E* Erdseil; *H* Höhe über Boden

ausfälle pro 100 km Leitungslänge und pro Gewittertage als mit einem Erdseil. Ebenso zeigt eine 287-kV-Leitung mit zwei Erdseilen 380mal weniger Ausfälle in sieben Jahren als eine ähnliche Leitung mit keinem Erdseil [10].

Als Beispiel einer Portalmastleitung ist an Hand von Fig. 3 ersichtlich, wie die bestehende 380-kV-Gotthard-Leitung blitzsicher konstruiert werden kann. Der zum Überschlag der Leitungsisolation nötige Blitzstrom beträgt $\hat{I} \geqq 8{,}16$ kA. Nach Fig. 1 entspricht das einer Schlagweite von 24 m. Nachdem die Phasenseil—Erde-Parabel konstruiert wurde, wird das Erdseil so verlegt, dass die Mittelsenkrechte zwischen Phasenseil und Erdseil die Parabel auf eine Weise schneidet, dass der 24-m-Kreis mit dem äusseren Phasenseil als Zentrum überall ausserhalb des Flügels liegt. Als Resultat kann das Erdseil direkt auf dem Ausleger oberhalb des äusseren Phasenseiles montiert werden. Dadurch wird der die Leitung gefährdende flügelartige Ausschnitt so klein, dass alle

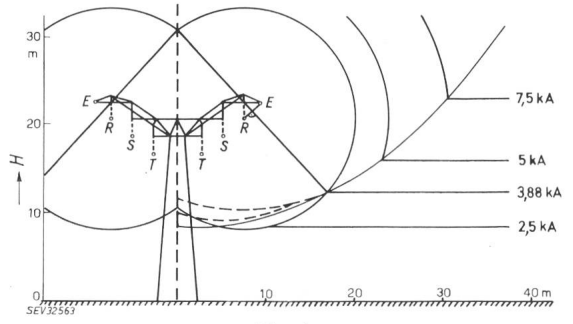

Fig. 4

Schema eines Y-Mastes

Bezeichnungen siehe Fig. 3

Blitzköpfe mit mehr als 8 kA ausserhalb der Leitung auftreten und somit nicht in ein Phasenseil schlagen können. Will man das Erdseil wegen der Rückschnellgefahr des Phasenseiles bei Eis- und Schneeabwurf nicht direkt über dem Phasenseil anordnen, so müsste der Ausleger um 1...2 m verlängert werden, um an diesem Ende das Erdseil zu befestigen. Da Blitzströme unter 8,16 kA für die Leitung unschädlich sind, könnten die beiden Erdseile bis zu 48 m auseinander liegen, ohne dass das mittlere Phasenseil durch Blitze, die zwischen den zwei Erdseilen zur Erde schlagen, gefährdet würde.

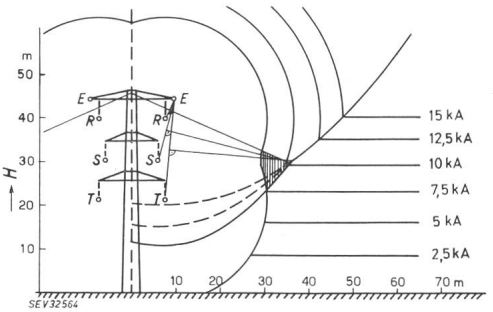

Fig. 5

Schema einer 380-kV-Leitung

Bezeichnungen siehe Fig. 3

Ebenso kann ein Y-Mast blitzsicher konstruiert werden. In Fig. 4 ist der Mast der norwegischen 132-kV-Leitung von Flesaker nach Slagen mit einer Isolatorenhaltespannung von 950 kV Stoss dargestellt [10]. In diesem Fall wird der die Leitung gefährdende Blitzstrom $\hat{I} \geqq 3{,}88$ kA, was einer Schlagweite von 12,5 m entspricht. Die Konstruktion zeigt, dass zwei Erdseile zwei Meter ausserhalb der äussersten Phasen auf der Höhe der Isolatorenkettenaufhängung montiert werden müssten. Bei diesem Masttyp muss darauf geachtet werden, dass nicht durch ungeschickte Verlegung der Erdseile oberhalb der Ausleger zwischen den Erdseilen eine die Phasen gefährdende ungeschützte Fläche entsteht. Dies bedingt, dass die beiden gezeichneten Mittelsenkrechten sich nicht ausserhalb der beiden 12,5-m-Kreise schneiden dürfen.

Der in der Schweiz hauptsächlich verwendete Tannenbaummast kann auch mit zwei Erdseilen nicht vollständig blitzsicher gemacht werden. Immerhin könnte eine 380-kV-Leitung nach Fig. 5 durch Verwendung von zwei aussenliegenden Erdseilen und durch Auswechseln der heute verwendeten mittleren mit den obersten Auslegern wesentlich verbessert werden. Durch diese Massnahme sinkt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Blitz, der innerhalb der die Freilei-

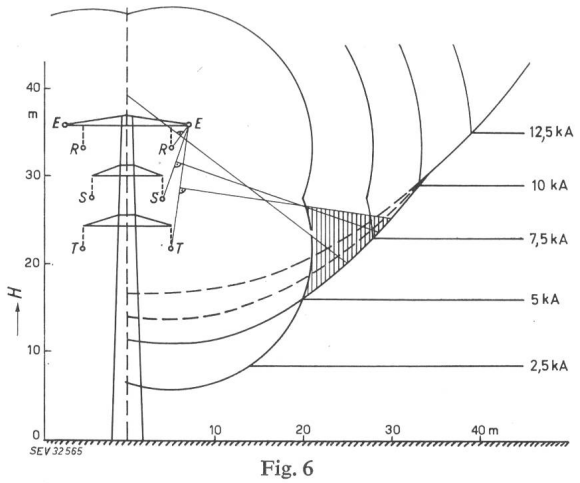

Fig. 6

Gegen Blitzschlag ungeschützte Fläche einer 220-kV-Doppel-Leitung mit zwei Erdseilen

Bezeichnungen siehe Fig. 3

tung gefährdende Breite von 210 m (senkrecht zur Erde) einschlägt, ein Phasenseil trifft, von 13 auf 1 % [9]. Die Differenz von 12 % wird bei dieser Mastanordnung von den beiden Erdseilen übernommen. In Fig. 5 ist die die Freileitung noch gefährdende restliche Fläche schraffiert gezeichnet.

Im Gegensatz zu den Portal- und den Y-Masten wird bei den Tannenbaummasten der Aufwand sehr gross, um einen hundertprozentigen Blitzschutz zu erzielen. Die mittlere Phase erweist sich als die am meisten blitzgefährdete: Es

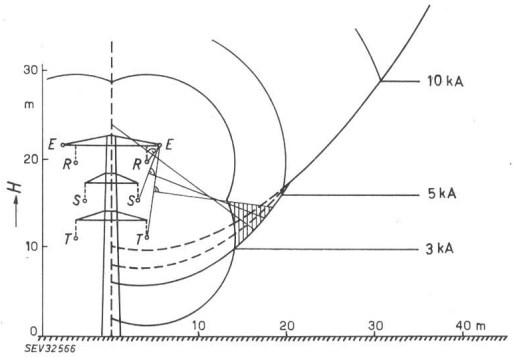

Fig. 7

Gegen Blitzschlag ungeschützte Fläche einer 150-kV-Doppel-Leitung mit zwei Erdseilen

Bezeichnungen siehe Fig. 3

müssten daher auch bei den 220- und 150-kV-Leitungen die mittleren mit den obersten Auslegern vertauscht werden. Trotzdem müssten die obersten Ausleger, die an ihren beiden Enden die Erdseile tragen, bei der 380-kV-Leitung auf beiden Seiten 16 m lang sein.

Für eine 220- und eine 150-kV-Leitung genügen zwei Erdseile nicht mehr. Man müsste als drittes das heute auf der Mastspitze verlegte Erdseil mitverwenden. Selbst in diesem Fall würde der oberste Ausleger mit dem zweiten und dem dritten Erdseil an seinen Enden bei der 220-kV-Leitung auf jeder Seite 19 m lang und bei der 150-kV-Leitung je 10 m, um einen sicheren Blitzschutz zu erreichen. Trotz diesen Überlegungen lohnt es sich, mehr als ein Erdseil pro Freileitung zu verlegen: Man kann nach Fig. 6 bei einer 220-kV-Leitung mit zwei Erdseilen und durch Vertauschen der heute verwendeten zwei obersten Ausleger, die Wahrscheinlichkeit eines Blitzschlages in ein Phasenseil von 10 % auf 3,1 % herabsetzen. Mit den gleichen Massnahmen sinkt nach Fig. 7 für eine 150-kV-Leitung die Blitzeinschlagswahrscheinlichkeit von 6,5 % auf 0,9 %. Die durch die Erdseile nicht mehr geschützte Fläche, von welcher aus ein Blitz noch in ein Phasenseil einschlagen kann, ist in beiden Figuren schraffiert hervorgehoben.

Literatur

[1] *Schwaiger A.:* Elektrische Leitungen, Leibnitz München 1948.

[2] *Berger K.:* Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1947—1954 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 46 (1955), Nr. 5 und 9.

[3] *Malan D. H., Schonland B. F. J.:* The Electrical Processes in the Intervals between the Strokes of a Lightning Discharge. Proc. R. Soc. A. 206 (1951) 145.

[4] *Müller Hillebrand:* Zur Physik der Blitzentladung. ETZ-A 82 (1961) 232.

[5] *Aleksanrdrow, Kostenko, Polowoj:* Zur Frage der Aussichten einer Spannungserhöhung bei elektrischen Übertragungsfreileitungen. Elektrischestwo 11 (1962) 20.

[6] *Golde R. H.:* Theoretische Betrachtungen über den Schutz von Blitzableitern. ETZ-A 82 (1961) 273.

[7] *Davis R.:* Frequency of Lightning Flashovers on Overhead Lines C. E. R. L. Leatherhead 1962.

[8] *Küpfmüller K.:* Einführung in die theoretische Elektrotechnik. Springer Berlin 1952.

[9] *Berger K.:* Elektrische Anforderungen an Höchstspannungs-Leitungen. Bull. SEV 54(1963)18, S. 749...754.

[10] *Ohio Brass Co.:* Lightning Performance of typical Transmission Lines. Ohio Brass O-B Publication 811-H (1948).

Adresse des Autors:

F. Schwab, dipl. Ingenieur ETH, Hochspannungs-Laboratorium der ETH, Gloriastrasse 35, Zürich 7/6.

Grundlagen, Bauelemente und Messtechnik der Nanosekunden-Impulstechnik

Vortrag, gehalten an der 27. Hochfrequenztagung des SEV vom 24. Oktober 1963 in Neuenburg,

von *A. P. Speiser,* Rüschlikon

621.374

Die Nanosekundentechnik befasst sich mit Impulsen, deren Anstiegszeiten wenige Nanosekunden betragen. Ihr Hauptmerkmal ist, dass Leitungen mit einer Länge von 5 cm bereits eine ins Gewicht fallende Laufzeit besitzen. Die wichtigsten Bauelemente sind Dioden und Transistoren. Die Messtechnik wird beherrscht durch Abtast-Oszillographen.

La technique des impulsions de nanosecondes se caractérise notamment par le fait que la notion de temps de transit intervient déjà pour des lignes d'une longueur de 5 cm. Les éléments de montage les plus importants sont les diodes et les transistors. Pour les mesures, on utilise surtout l'oscillographe d'exploration.

1. Grundlagen

Die Nanosekunden-Impulstechnik befasst sich mit Impulsen, deren Anstiegszeiten wenige Nanosekunden betragen (1 ns = 10^{-9} s). Dieses Arbeitsgebiet nimmt eine eigentümliche Mittelstellung zwischen der Mikrosekunden-Impulstechnik und der Mikrowellentechnik ein. Die Mikrosekunden-Impulstechnik ist dadurch gekennzeichnet, dass man die Schaltelemente als konzentrierte Widerstände, Kapazitäten und Induktivitäten betrachten kann; dass die Laufzeiten in der Verdrahtung vernachlässigt werden können; dass die