Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 79 (1988)

Heft: 13

Artikel: Grundlagen des Blitzschutzes

Autor: Vogelsanger, E.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904053

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: 16.07.2025

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

Grundlagen des Blitzschutzes

E. Vogelsanger

Damit ein Blitzschutz zweckmässig aufgebaut und dimensioniert werden kann, müssen die wesentlichen Eigenschaften der Blitze bekannt sein. Mit der Blitzmessstation auf dem Monte San Salvatore hat die Schweiz einen grossen Beitrag an die Aufklärung dieser Eigenschaften geleistet. Die Ströme von über 1500 Blitzeinschlägen wurden oszillographiert und ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass die Blitzeigenschaften eine ausserordentlich grosse Streubreite aufweisen und man daher den Blitzschutz nicht einfach auf einen einheitlichen «Standardblitz» ausrichten kann.

Pour dimensionner et construire convenablement une protection contre la foudre, il faut connaître les propriétés essentielles de la foudre. Avec sa station de mesure au Monte San Salvatore, la Suisse a fourni une contribution importante à l'élucidation de ces propriétés. Les courants de plus de 1500 coups de foudre ont été oscillographiés et analysés. On a notamment constaté que ces propriétés varient beaucoup, de sorte que la protection contre la foudre ne peut pas être basée simplement sur un coup de foudre «normal».

Leicht überarbeitete Fassung des Vortrages anlässlich der SEV-Informationstagung «Die neuen Leitsätze des SEV für Blitzschutzanlagen» am 22. April 1988 in Zürich.

Adresse des Autors
E. Vogelsanger, Elektroingenieur, Höhenstrasse 28, 8304 Wallisellen.

Blitzentladung, Abwärts- und Aufwärtsblitze

Bevor auf Einzelheiten eingegangen wird, soll die Entstehung des Blitzes kurz skizziert werden. Figur 1 zeigt schematisch eine Gewitterwolke mit der darin vorhandenen Ladungsverteilung. Im oberen Teil der Wolke befinden sich vorwiegend positive Ladungen, im unteren Teil vorwiegend negative Ladungen, oft aber auch ein begrenzter positiver Bereich an der Basis der Wolke.

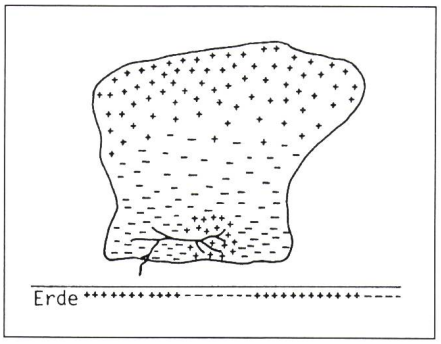
Das elektrische Feld zwischen Wolke und Erde wird durch die an der Erdoberfläche auftretenden Influenzladungen mit bestimmt. Die grösste Feldstärke dürfte im allgemeinen zwischen positiven und negativen Ladungsgebieten innerhalb der Wolke auftreten, so dass dort eine Entladung beginnt, die sich dann büschelartig in den beiden Ladungsgebieten ausbreitet, wie dies in Figur 1 angedeutet ist. Fliesst dabei von einer Polarität mehr Ladung zu als von der anderen, so wird das ganze Entladungssystem aufgeladen, und es kann auch ein Ast daraus zur Erde vorwachsen. Das ist dann der Erdblitz, den man beobachtet. Etwa 80% dieser Blitze sind negativ, d.h. sie bringen negative Ladung von der Wolke zur Erde. Vielleicht hängt dies damit zusammen, dass die Erdblitze vorwiegend von Entladungen in den unteren Wolkenpartien ausgehen, wo positive Ladungsbereiche weniger ausgedehnt und schneller entladen sind als negative.

Der Abwärtsblitz ist der häufigste Mechanismus der Blitzbildung. Es gibt aber auch Aufwärtsblitze, also Entladungen, die von der Erde gegen die Wolke vorwachsen. Diese brauchen am Ausgangspunkt eine Feldkonzentration durch Spitzenwirkung. Sie können nur von hohen Gebäuden oder Türmen ausgehen, meist auch nur, wenn diese auf Berggipfeln oder Berggraten stehen. Die Türme der Messstation auf dem Monte San Salvatore standen in dieser Beziehung besonders günstig, und 85% der darin registrierten Einschläge waren Aufwärtsblitze. Im Flachland dagegen sind die Aufwärtsblitze kaum von Bedeutung.

Figur 2 zeigt einen Abwärtsblitz, Figur 3 einen Aufwärtsblitz. Die Vorwachsrichtung ist aus den Verästelungen zu erkennen, denn diese können sich nur vom Ausgangspunkt weg entwickeln.

Vorwachsen des Blitzkanales

Beim Abwärtsblitz stellt sich die Frage, wie er seinen Weg zur Erde findet und wo er die Erde erreicht. Hierzu ist folgendes zu sagen: Durch das Relief des Erdbodens kann die Blitzbahn nur im allerletzten Moment noch beeinflusst werden. Sie wird neben der allgemeinen Feldrichtung durch Raumladungsgebiete in der Atmosphäre beeinflusst und nimmt so die bekannte zackige Form an. Die vorwachsende Entladung «sieht» ein Gebäude erst dann, wenn sie ihm so nahe gekommen ist, dass ein direkter Überschlag erfolgen kann oder wenn ihr



Figur 1 Ladungsverteilung in einer Gewitterwolke und Beginn einer Blitzentladung (Beispiel)

vom Gebäude aus eine Fangentladung entgegenwächst. Sie kann auch über gewisse Strecken fast horizontal verlaufen und daher ein Gebäude von der Seite treffen. Deshalb wird ein hohes Objekt wohl statistisch öfter getroffen, kann aber keinesfalls alle Einschläge von danebenliegenden niedrigen Objekten fernhalten.

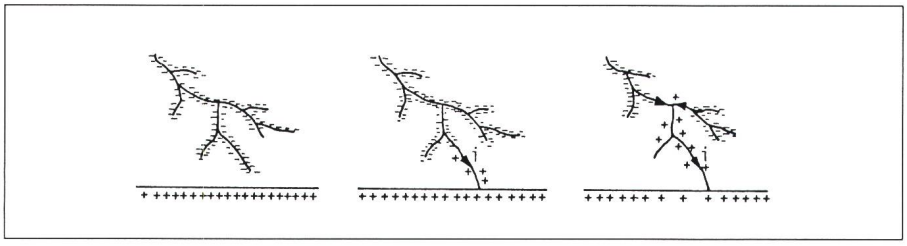
Aus diesen Überlegungen wird klar, dass auch niedrige Bauten neben hohen, auch das Kirchenschiff neben dem Turm mit dem nötigen Blitzschutz versehen sein müssen.

Hier muss noch eine Bemerkung zu neben Gebäuden stehenden Bäumen angebracht werden: Bäume sind schlechte Leiter. Sie leiten den Blitzstrom so schlecht, dass meist ein Überschlag an der Stammoberfläche erfolgt. Dieser kann auch jederzeit über einen Ast auf ein benachbartes Haus überspringen.

Am geschützten Gebäude soll der Blitz immer auf einen Fangleiter treffen. Obwohl die Fangleiter aus praktischen Gründen nur ein grobmaschiges Netz bilden können, ist es sehr unwahrscheinlich, dass ein Blitz innerhalb der Maschen durch das Dach oder eine Mauer hindurch einen Leiter im Hausinnern erreichen könnte. Nur an den an der Aussenseite befindlichen Fangleitern (d.h. an den als Fangleiter verlegten Drähten oder auch an Kanten und Ecken von Blechabdekkungen) können sich die Fangentladungen bilden, die den letzten Überschlag zwischen Blitzkopf und Gebäude einleiten.

Figur 2
Abwärtsblitz

Figur 3
Aufwärtsblitz am Sendeturm des Monte San Salvatore

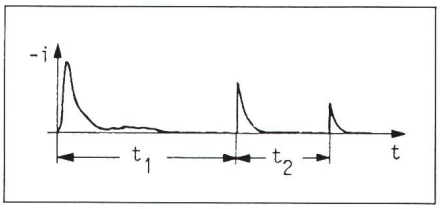


Figur 4 Schematische Darstellung der fortschreitenden Entladung eines Blitzkanals beim Einschlag in die Erde

Blitzströme

Der Ladungskanal eines Abwärtsblitzes entspricht einem geladenen Leiter, der mit der Erdoberfläche eine Kondensatoranordnung bildet. Erreicht er die Erdoberfläche oder wird er durch eine von einem Gebäude ausgehende Fangentladung mit ihr verbunden, so entlädt sich der Kondensator in einem heftigen Stromstoss. Im Blitzkanal breitet sich dabei eine Entladungswelle aus, die vom Einschlagspunkt sukzessive über den ganzen Kanal und seine Verästelungen vorwächst, wie dies in Figur 4 angedeutet ist. Die Wellengeschwindigkeit beträgt dabei 1/10 bis 1/3 der Lichtgeschwindigkeit.

Wenn aus der Wolke weitere Ladung nachfliesst, so kann der Stossstrom während einiger 1/100...1/10 s von einem kleineren Nachstrom gefolgt sein. Nachdem der Strom ganz abgeklungen ist, kann sich der Kanal eventuell neu aufladen und dann in einem sog. Folgeblitz wieder entladen. Dieser Vorgang kann sich auch mehrmals wiederholen. Man spricht dann von einem Mehrfachblitz. Figur 5 zeigt den entsprechenden Stromverlauf an einem Beispiel mit drei Teilblitzen. Etwa 1/3 aller negativen Abwärtsblitze sind Mehrfachblitze.



Figur 5 Beispiel für den Stromverlauf eines negativen Abwärtsblitzes mit drei Teilblitzen
t_1, t_2 einige 1/100...1/10 s

Bei Aufwärtsblitzen beginnt der Vorgang an der Einschlagstelle. Es gibt daher keine Kondensatorentladung, und der Blitzstrom beginnt immer mit mässigen Werten von einigen 10 A bis einigen 100 A während mindestens einiger 1/100 s. Danach können allerdings auch Stossströme auftreten, nämlich dann, wenn der aufwärts wachsende Blitz mit einem Wolkenblitz zusammentrifft und dessen Ladung nach der Erde ableitet.

Stromparameter

Trotz der Vielfalt der Formen lassen sich einige Grössen definieren, die für bestimmte Blitzwirkungen massgebend sind. Der zeitliche Verlauf eines Stossstromes ist in Figur 6 skizziert. Wichtige Grössen sind darin der Stromscheitelwert $\hat{i}$ und die grösste Frontsteilheit $(\mathrm{d}i/\mathrm{d}t)_{max}$. Bei Mehrfachblitzen zeigt der erste Stoss praktisch immer den höchsten Scheitelwert, aber nur eine bescheidene Frontsteilheit.

Wo der Energieumsatz eine Rolle spielt, sind nicht die maximalen Momentanwerte von Bedeutung, sondern die über die ganze Blitzdauer integrierte Impulswirkung. Man muss daher beim Blitzschutz neben dem Stromscheitelwert und der Frontsteilheit noch zwei Parameter berücksichtigen (Fig. 7), die vom Blitzstrom geführte Ladung $Q = \int i\,\mathrm{d}t$ und die spezifische Energie $W/R = \int i^2\mathrm{d}t$ (Stromquadratimpuls).

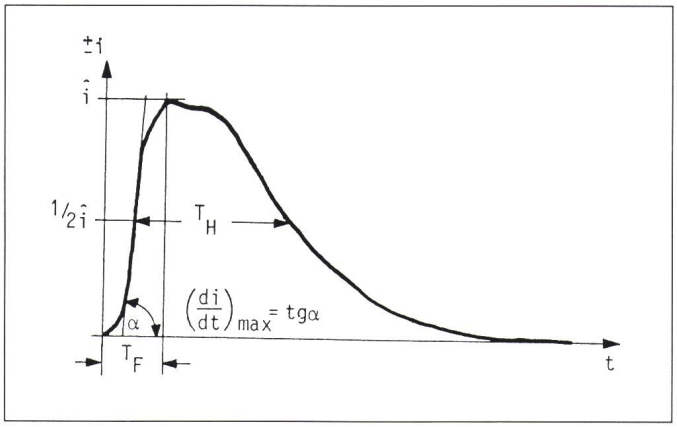
In der Tabelle von Figur 7 sind für alle vier Blitzstromparameter die sich aus den Messungen ergebenden ungefähren Mittel- und Höchstwerte angegeben, wobei sowohl die Messungen vom Monte San Salvatore als auch ausländische Messungen berücksichtigt sind. Als Höchstwerte sind dabei diejenigen angenommen, die nur noch bei 1% aller Blitze erreicht ober überschritten werden. Es sind nur Abwärtsblitze berücksichtigt, von diesen aber sowohl die negativen als auch die positiven.

Blitzwirkungen

Mit Ausnahme der Zündwirkung (Brandentfachung) können alle Blitzwirkungen einem der genannten Blitzstromparameter zugeordnet werden. Wenn man im folgenden die Blitzwirkungen anhand von Zahlenbeispielen untersucht, ist immer daran zu denken, dass man nicht den Gesamtblitzstrom in die Formeln einsetzen muss, sondern nur den in einem Leiter fliessenden Teilstrom. Der äussere Blitzschutz in Käfigform hat den Vorteil, dass sich der Strom immer auf mindestens zwei Leiter verteilt. Je mehr Leiter an der Stromableitung teilnehmen, um so geringer werden die Wirkungen. Ist ein Gebäude schon mit einem engmaschigen Metallgerüst konstruiert (Stahlskelett- oder Eisenbetonbauten und Gebäude mit Metallfassaden), so kann sich der Strom – vorschriftskonforme Anschlüsse vorausgesetzt – auf so viele Leiter verteilen, dass seine Einwirkungen bedeutungslos werden oder nur noch durch die Beeinflussung empfindlicher elektrischer Systeme in Erscheinung treten.

Im folgenden sollen die Blitzwirkungen einzeln betrachtet werden.

Figur 6
Schematischer Verlauf eines Stossstromes

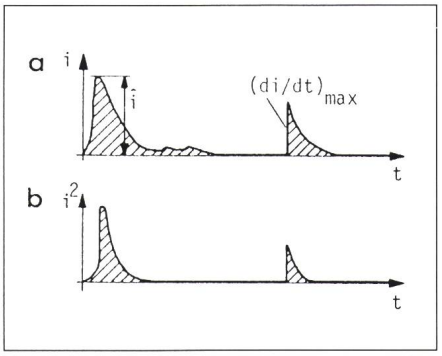


Frontzeit und Halbwertszeit

	T_F (Frontzeiten)	T_H (Halbwertszeiten)
Negative Blitze		
1. Stoss	5 ... 15 µs	100 ... 150 µs
Folgestösse	0,1... 1 µs	50 ... 100 µs
Positive Blitze	10 ... 100 µs	500 ...1000 µs

Zündwirkung

Seit jeher wird die Zündwirkung des Blitzes am meisten gefürchtet. Daher liegt ein wichtiges Ziel des Blitzschutzes darin, Funken im Innern der Gebäude ganz zu verhindern. Allerdings führt auch in brennbaren Gebäudeteilen erfahrungsgemäss nur ein Teil der Blitzeinschläge zu Bränden. Es wurde deshalb vermutet, dass nur Blitze mit länger dauernden Stromanteilen («heisse» Blitze) zur Zündung führen, während bei Stossfunken («kalte» Blitze) der Kontakt der heissen Gase mit dem brennbaren Material zu kurz sei, um dieses zu entzünden. Aus Beobachtungen in Hochspannungslabors ist aber bekannt, dass gelegentlich auch stromschwache und kurzzeitige Stossfunken ($\hat{i}$ = 1...2 kA, $T_H \approx 10$ µs) feines Material wie Holzspäne ent-



Figur 7 Stromparameter der Abwärtsblitze

a	$\hat{i}$	Höchstwerte im Verlauf des ganzen Blitzes
	$(\mathrm{d}i/\mathrm{d}t)_{max}$	
	Q	Schraffierte Fläche (alle Teilblitze zusammen)
b	$\int i^2\mathrm{d}t$	Schraffierte Fläche (alle Teilblitze zusammen)

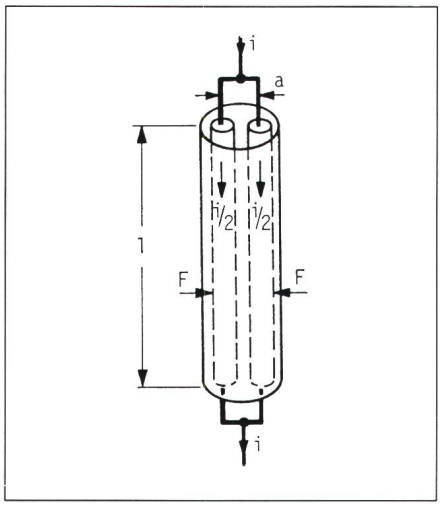
Charakteristische Werte

	Mittelwert	Höchstwert
$\hat{i}$	30 kA	200 kA
$(\mathrm{d}i/\mathrm{d}t)_{max}$	20 kA/µs	200 kA/µs
Q	10 As	300 As
$\int i^2\,\mathrm{d}t$	10^5 As^2	10^7 As^2

zünden können. Beim Blitzschutz ist also davon auszugehen, dass auch Stossfunken kurzer Dauer, z.B. Überschläge infolge Induktionsspannung, zünden können.

Kraftwirkung

Zwischen stromdurchflossenen Leitern tritt eine mechanische Kraft auf: gleichgerichtete Ströme ziehen sich an, entgegengesetzt gerichtete stossen sich ab. An einem gewinkelten Leiter haben die Stromkräfte die Tendenz, den Winkel aufzubiegen. In Figur 8 ist als Beispiel ein zweiadriges Kabel angenommen, welches von einem Blitzstromanteil durchflossen wird. Der Stromfluss kann dadurch zustande kommen, dass eine der Adern beidseitig geerdet ist. Durch Überschläge an beiden Enden wird dann auch die zweite Ader an der Stromleitung beteiligt. Die sich ergebende Kraft zwischen den Adern ist in Figur 8 ersichtlich.



Figur 8 Stromkraft zwischen zwei Kabeladern

$$F = \frac{\mu_0}{2\pi}\,\frac{l}{a}\left(\frac{i}{2}\right)^2 \approx 0{,}2\cdot 10^{-6}\cdot\frac{l}{a}\left(\frac{i}{2}\right)^2$$

i [A]; a, l [m]; F [N]

Beispiel:
$a = 5$ mm, $i = 20$ kA
$F/l = 4000$ N/m $\approx$ 400 kg/m

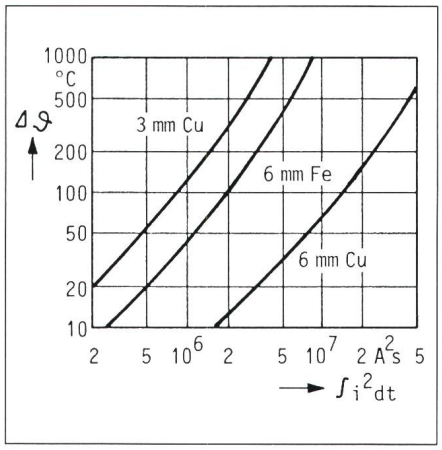
Erwärmung des metallischen Leiters

Die thermische Energie, die durch den ohmschen Widerstand R eines stromdurchflossenen Leiters freigesetzt wird, beträgt $\int R\cdot i^2\,dt$, wobei zu berücksichtigen ist, dass der Widerstand R mit der Erwärmung des Leiters zunimmt. Für einen gegebenen Leiter ist dieser Ausdruck zum Stromquadratimpuls proportional. Da während der kurzen Impulszeit praktisch keine Wärme entweichen kann, bestimmt er direkt die Erwärmung des Leiters.

In Figur 9 ist die Erwärmung als Funktion des Stromquadratimpulses für verschiedene Kupfer- und Eisendrähte dargestellt. Man betrachtet nun die Erwärmung eines Fangleiters mit 6 mm Durchmesser bei einem Blitzschlag mit $\int i^2\,dt = 10^7$ A² s (Höchstwert gemäss Fig. 7); dabei wird angenommen, dass nach beiden Seiten des getroffenen Fangleiters gleiche Stromanteile abfliessen. Man hat dann im Leiter noch die Hälfte des Blitzstromes und ein Viertel des Stromquadrates ($2{,}5\cdot 10^6$ A² s). Dies ergibt beim Kupferdraht eine Erwärmung von 15 °C, beim Eisendraht eine solche von 130 °C. Der Kupferdraht ist also thermisch weit überdimensioniert, sein Durchmesser von 6 mm dient nur der Sicherstellung der mechanischen Robustheit.

Thermische Energie im Lichtbogen

Da die auftretende Spannung in einem Lichtbogen bzw. am Fusspunkt desselben vom Strom weitgehend unabhängig ist, ist hier der Wärmeumsatz ($W = \int i\cdot u\cdot dt$) nicht vom Stromquadrat, sondern vom Strom selbst bzw. von der Ladung $Q = \int i\cdot dt$ abhängig. Für den Blitzschutz ist besonders die Wärmeentwicklung am Einschlagspunkt von Bedeutung. Man rechnet, dass an der Metalloberfläche eine Spannung von etwa 15 V wirksam ist (Anodenfall oder Kathodenfall). Eine mittlere Blitzladung von 10 As setzt damit eine Energie von 150 Ws frei. Wenn man Wärmeableitung und Wärmeabstrahlung vernachlässigt, könnten damit an der Elektrodenoberfläche etwa 25 mm³ Kupfer oder 16 mm³ Eisen geschmolzen werden. Da sich der Fusspunkt des Blitzes wahrscheinlich auf mehrere cm² Elektrodenfläche verteilt, entstehen jedoch keine tiefen Schmelzspuren. Ladungsstarke Blitze könnten wohl dünne Dachbleche perforieren, doch werden sie auf ebenen Blechflächen gar nicht ansetzen, da sich dort keine Fangentladungen bilden können. Aus bisheriger Erfahrung kennt man an Gebäuden keine solchen Schäden, wohl aber an der Aussenhaut von Flugzeugen.



Figur 9 Erwärmung von Leitern in Funktion des Stromquadratimpulses

Ohmscher Spannungsabfall

Direkt von der Stromstärke abhängig ist der Spannungsabfall an ohmschen Widerständen. An den Leitern der Blitzschutzanlage ist dieser bedeutungslos. Verwendet man allerdings Stahldrähte für die Ableitungen, die bei 6 mm Durchmesser einen Widerstand von 5 mΩ/m aufweisen, so ergibt ein Blitzstromanteil von 50 kA in einer 20 m langen Ableitung einen Spannungsabfall von 5 kV. Verglichen mit den induktiven Spannungen, die nachher betrachtet werden, ist dies aber wenig.

Wichtig ist dagegen der Erdungswiderstand. Beträgt dieser z.B. nur 2 Ω, so ergibt er bei 100 kA Blitzstrom einen Spannungsabfall von bereits 200 kV. Dies bedeutet einen Spannungsstoss von 200 kV zwischen der Blitzschutzanlage und der neutralen Erde. Eine erdverlegte Leitung, z.B. eine metallene Wasserleitung, könnte diese Spannung ins Gebäude einschleppen. Damit dies nicht geschieht, braucht es eben den Potentialausgleich, d.h. eine Verbindung der Wasserleitung mit der Blitzschutzerdung. Ein Teil des Blitzstromes fliesst dann über die Wasserleitung ab, und diese wird auf die gleiche Spannung angehoben wie das Gebäude.

Misst man die Spannung zwischen der Erdoberfläche und der Blitzschutzanlage, so ergibt sich ein «Spannungstrichter», d.h. ein trichterförmiger Spannungsverlauf, der über dem Erder ein Minimum aufweist und mit zunehmender Entfernung wie ein Trichterrand ansteigt (Fig. 10). Personen, die z.B. neben dem Haus stehen und einen Wasserhahn berühren, bekommen den örtlichen Wert der

Trichterspannung zu spüren. Die in den neuen Leitsätzen SEV 4022/1987 verlangten Ringerder bieten hier den Vorteil, dass der ganze Umfang des Gebäudes im Minimalbereich der Trichterspannung liegt (Fig. 10a), während dies bei örtlich konzentrierten Erdern nicht der Fall ist (Fig. 10b).

Induktiver Spannungsabfall

Der Stromanstieg im Blitz ist ausserordentlich steil. In Figur 7 wurde als Maximalwert 200 kA/µs angegeben, das sind $2 \cdot 10^{11}$ A/s. Vergleichsweise beträgt die Stromänderung bei einem 50-Hz-Wechselstrom mit I_{eff} = 100 kA (Kurschlussstrom) $4{,}5 \cdot 10^{7}$ A/s, also etwa 1/4000 vom Höchstwert des Blitzes.

Die steilen Fronten der Blitzströme können auch in den gestreckten Leitern des Blitzschutzes, die naturgemäss nur geringe Selbstinduktion aufweisen, hohe Spannungen erzeugen. Dies sei anhand von Figur 11 dargelegt:

Parallel zur blitzstromführenden Ableitung verlaufe ein zweiter Leiter, der unten über den Potentialausgleich mit der Ableitung verbunden ist. Es kann sich dabei um einen Teil einer Installation handeln oder auch nur um einen Messdraht. Am oberen Ende dieses Leiters tritt die folgende Induktionsspannung auf:

$$u = L \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = 0{,}2 \cdot 10^{-6} \cdot l \cdot \ln \frac{a}{r} \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

[V, H, A, s, m]

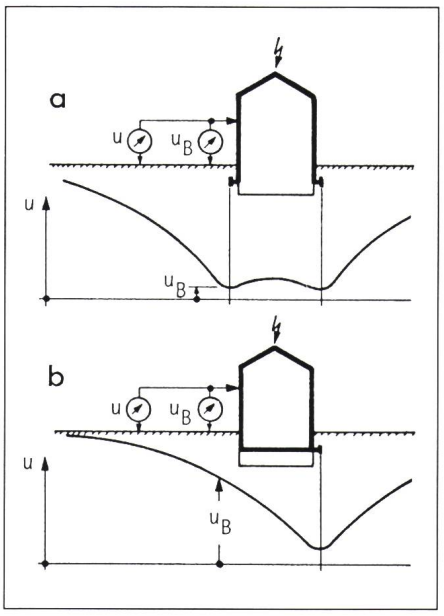
Man kann L als die Selbstinduktivität des gestreckten Leiters bezeichnen. Diese ist aber bei einem Leiter, der keine geschlossene Schleife bildet, nicht nur von diesem abhängig, sondern auch von der Schleife, in der man die Spannung misst (ln a/r). Handelt es sich beim stromführenden Leiter um einen Draht von wenigen mm Durchmesser und wird die Schleife durch eine Installation in wenigen m Abstand gebildet, so variiert die massgebliche Selbstinduktivität nur wenig. Es ist für einen 6-mm-Draht

$L' = L/l = 1{,}16$ µH/m bei $a = 1$ m

und

$L' = L/l = 1{,}62$ µH/m bei $a = 10$ m.

Man kann deshalb immer mit einem Mittelwert von $L' \approx 1{,}4$ µH/m rechnen.



Figur 10 Spannungstrichter an der Erdoberfläche und grösste Berührungsspannung (u_B) an geerdeten Gebäudeteilen

a mit Ringerder
b mit konzentriertem Erder

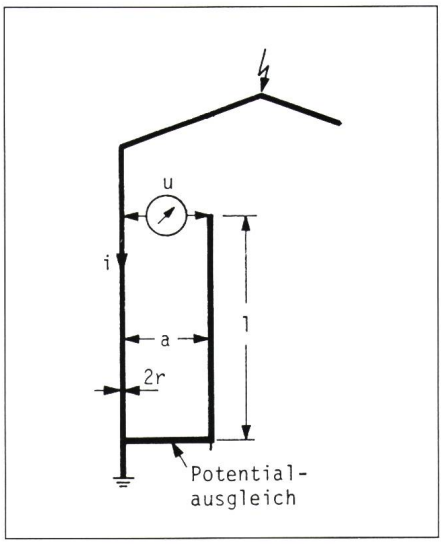
Anders liegen die Verhältnisse, wenn der stromführende Leiter einen grossen Querschnitt aufweist (z.B. ein tragendes Konstruktionselement, für die Rechnung als rundes Rohr mit r = 10 cm angenommen) und der Leiter, an dessen Ende die Spannung gemessen wird, in kleinem Abstand angebracht ist. In der Anordnung gemäss Beispiel in Figur 11 beträgt der Abstand 5 mm und L/l = 0,001 µH/m, also nur etwa 1/1000 der oben betrachteten Anordnungen. In Spezialfällen kann man dies ausnützen, um die Induktionsspannung klein zu halten, z.B. an einer elektrischen Leitung.

In Figur 11 sind die sich ergebenden Induktionsspannungen eingetragen, wenn man von einem Blitz mit der maximalen Frontsteilheit von 100 kA/µs ausgeht und annimmt, dass die Hälfte des Blitzstromes über die betrachtete Ableitung fliesst. Die Spannungen können hoch sein und zu Überschlägen über relativ grosse Distanzen führen.

Mehrfach-Potentialausgleich und Minimalabstände

Bei der einfachen Anordnung nach Figur 11 genügt ein zusätzlicher Potentialausgleich am oberen Ende der Installation, um die Spannung in der ganzen Schleife zum Verschwinden zu bringen. Bei komplizierteren Installationen ist dies nicht mehr so einfach. Um die Spannungen beherrschen zu können, muss man in regelmässigen vertikalen Abständen den Potentialausgleich zwischen allen Installationen und Ableitungen vornehmen. Zudem muss man in den Zwischenbereichen Minimalabstände D_{min} zwischen Installation und Blitzschutzleiter vorsehen. Da aber die Gefahr von Überschlägen hauptsächlich in deren Zündwirkung liegt, verlangt man diese aufwendigen Massnahmen nur an Gebäuden mit feuergefährdeten Bereichen, die Minimalabstände nur im feuergefährdeten Bereich selbst. Da alle Induktionswirkungen entsprechend zurückgehen, wenn sich der Strom auf mehr Leiter verteilen kann, verzichtet man auf die Minimalabstände auch bei allen Bauten, die ein enges Metallgerüst aufweisen, also bei armierten Betonbauten, Stahlskelettbauten und Bauten mit vertikal durchverbundenen Metallfassaden.

Hohe Induktionsspannungen können in allen Leitern auftreten, die von Anteilen des Blitzstromes durchflossen werden, z.B. auch in den Verbin-



Figur 11 Induktiver Spannungsabfall

Beispiele:

di/dt = 50 kA/µs = $0{,}5 \cdot 10^{11}$ A/s

l = 10 m

	r	a	u_{max}
2r, a	3 mm	1 m	580 kV
	3 mm	5 m	740 kV
r, a	10 cm	10,5 cm	0,5 kV

dungen des Potentialausgleichs. Man hat daher allen Grund, alle derartigen Leiter immer auf dem kürzesten Wege zu verlegen.

Die Grösse der erwähnten Minimalabstände D_{min} ergibt sich aus dem Vergleich der auftretenden Induktionsspannungen mit den Überschlagsspannungen von Luftfunkenstrecken. Die Höhe der grössten Induktionsspannung (die in Fig. 11 an einem Beispiel ermittelt wurde) hängt vom Anteil des Blitzstromes ab, der über eine einzelne Ableitung abfliessen kann. Wenn der Blitz exzentrisch in ein Gebäude einschlägt, wird sich sein Strom sehr ungleich auf die verschiedenen Ableitungen verteilen, wie dies aus dem gerechneten Beispiel von Figur 12 hervorgeht. Dort führt die Ableitung unter der Einschlagstelle fast die Hälfte des Blitzstromes.

In Figur 12 entspricht die Anzahl der Ableitungen genau der in den Leitsätzen geforderten Minimalzahl (n_0 = Gebäudeumfang in m geteilt durch 20). Wäre die Zahl der Ableitungen grösser ($n > n_0$), so würde der grösste Teilstrom kleiner. Als grobe Arbeitsformel setzt man für den grössten Strom einer Ableitung

$$i_1 = \tfrac{1}{2}\, i \cdot n_0 / n,$$

wobei i der Blitzstrom ist. Damit gilt auch

$$\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} = \tfrac{1}{2}\,\frac{n_0}{n}\,\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

und die Induktionsspannung, pro m gerechnet, wird

$$\frac{u}{l} = L'\,\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} = \tfrac{1}{2}\,\frac{n_0}{n}\cdot L'\,\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

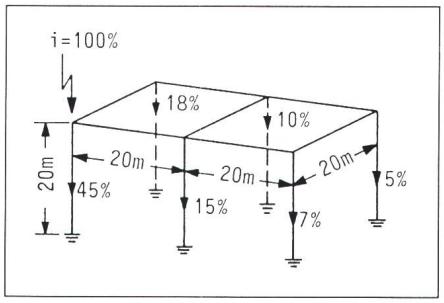
wenn die Länge des stromdurchflossenen Leiters, auf der die Spannung auftritt, mit l bezeichnet wird.

Setzt man für $L' = 1{,}4 \cdot 10^{-6}$ H/m und für die grösste Frontsteilheit des Blitzstromes 100 kA/µs (die Hälfte des Höchstwertes von Fig. 7), so ist

$$u/l = 70\, n_0/n \text{ kV/m}.$$

Die Überschlagsspannung über grössere Luftstrecken beträgt bei Laborstössen etwa 600 kV/m (Halbwertzeit 50 µs) bzw. 800 kV/m (Halbwertzeit 5 µs).

Die hier betrachteten Stösse sind



Figur 12 Beispiel für die Stromaufteilung auf die Ableitungen bei einem Einschlag in die Ecke eines Gebäudes

wesentlich kürzer. Sie dauern höchstens so lange wie die Front der Stossströme; bei den Höchstwerten ist dies weniger als 1 µs. Die Überschlagsspannung könnte aus diesem Grunde hier noch einiges höher liegen. Sie kann aber im Gebäudeinnern durch in der Funkenbahn liegende schlecht isolierende Festkörper auch herabgesetzt sein. Ein Rechnungswert von u/D_{min} = 700 kV/m scheint daher angemessen. Der Vergleich mit der Induktionsspannung von $u/l = 70\, n_0/n$ kV/m führt zu der in den Leitsätzen angegebenen Formel von $D_{min} = 0{,}1 \cdot l \cdot n_0/n$.

Induktionsspannungen in Schleifen

In Figur 13 ist eine Schleife dargestellt, die selbst keine vom Blitzstrom durchflossene Leiter enthält. Die in dieser Schleife induzierte Spannung beträgt

$$u = M \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = 0{,}2 \cdot 10^{-6} \cdot l \cdot \ln\frac{a_2}{a_1} \cdot \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}$$

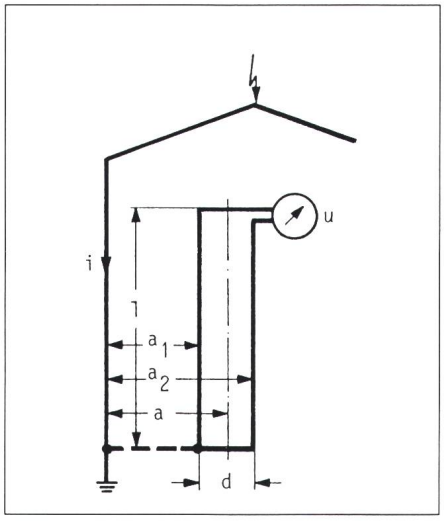
[V, H, A, s, m]

wobei M die Gegeninduktivität ist. Bei schmalen Schleifen mit $d \ll a$ kann M vereinfacht werden zu

$$M = 0{,}2 \cdot 10^{-6} \cdot l \cdot d/a$$

Ist z.B. d = 1 cm und a = 1 m, so wird $M/l = 2 \cdot 10^{-9}$ H/m. Der Stromanstieg von 50 kA/µs in einer Ableitung ergibt dann in einer 1 m langen Schleife eine Induktionsspannung von 100 V.

Solche Spannungen sind für die im Gebäude installierten Stromkreise von grösster Bedeutung, vor allem wenn es



Figur 13 Induktionsspannung in einer Schleife

sich um Stromkreise von Kommunikations- oder Informatiksystemen handelt, die sehr empfindliche Apparate enthalten. Bei der Ausbildung und Verlegung dieser Stromkreise sind daher alle Massnahmen zu beachten, die geeignet sind, die Induktionsspannungen tief zu halten.

Literatur

[1] *K. Berger, E. Vogelsanger:* Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore, Bull. SEV 56(1965)1, S. 2...22.

[2] *K. Berger, E. Vogelsanger:* Photographische Blitzuntersuchungen der Jahre 1955...1965 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 57(1966)14, S. 599...620.

[3] *K. Berger:* Methoden und Resultate der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore bei Lugano in den Jahren 1963...1971. Bull. SEV/VSE 63(1972)24, S. 1403...1422.

[4] *K. Berger, R.B. Anderson, H. Kröninger:* Paramètres des coups de foudre. Electra no 41/1975.

[5] *H. Prinz:* Die Blitzentladung in Vierparameterdarstellung. Bull. SEV/VSE 68(1977)12, S. 600...603.

[6] *E. Garbagnati, G.B. Lo Piparo:* Parameter von Blitzströmen. ETZ 103(1982)2, S. 61...65.

[7] *K. Berger:* Blitzstrom-Parameter von Aufwärtsblitzen. Bull. SEV/VSE 69(1978)8, S. 353...360.

[8] *K. Berger:* Das Grundprinzip des Blitzschutzes. Bull. SEV 61(1970)6, 272...274.

[9] *C. Gary:* Les principes physiques guidant la protection des bâtiments contre la foudre. RGE 89(1980)5, p. 351...367.

[10] *K. Berger:* Extreme Blitzströme und Blitzschutz. Bull. SEV/VSE 71(1980)9, S. 460...464.