

Blitzstörungen in Starkstromanlagen kommen fast ausschliesslich durch direkte Einschläge in Freileitungen zustande. Die hier massgebenden Eigenschaften der Blitzströme werden vorgestellt, und die Anzahl der zu erwartenden Einschläge wird abgeschätzt. Ein Erdseil über den Phasenleitern der Leitung kann die meisten Blitze (jedoch nicht alle) abfangen. Bei stromstarken Einschlägen können aber auch Erdseil und Maste so hohe Spannungen annehmen, dass von einem Mast aus ein sogenannter Rücküberschlag auf einen Phasenleiter erfolgt.

Die Überschläge auf den Freileitungen müssen in Kauf genommen werden. Sie

ergeben eine gewisse Begrenzung der Überspannungen, die sich als Wanderwellen über die Leitungen ausbreiten und so auch die Anlagen der Kraftwerke, Unterwerke und Transformatorstationen erreichen. In solchen Anlagen sind Überschläge möglichst zu vermeiden, und vor allem müssen Durchschläge von festen oder flüssigen Isolationen verhindert werden. Man koordiniert daher die Anlageisolation mit Überspannungsableitern, welche die auftretenden Überspannungen auf ein tieferes Niveau, das Schutzniveau, begrenzen. Aufbau und Wirkungsweise der Ableiter werden beschrieben.

Die Auswirkungen von Blitzschlägen auf Starkstromanlagen

Einleitung

Hochspannungsanlagen, wie Kraftwerke und Unterwerke, sind praktisch immer an Freileitungen angeschlossen. In ländlichen Gegenden sind meist auch die Niederspannungsanlagen und die Hausinstallationen über Freileitungen verbunden. Freileitungen sind aber immer Blitzschlägen ausgesetzt. Wichtige Leitungen werden durch Erdseile überspannt, welche die Phasenleiter gegen den Grossteil der Blitzeinschläge abschirmen. Eine vollständige Schirmwirkung kann aber nicht erreicht werden, und man muss immer damit rechnen, dass auch Phasenleiter vom Blitz getroffen werden können.

Der Blitz wirkt wie eine Stromquelle, d. h., er drückt der Einschlagstelle seinen Strom auf. Die an dieser Stelle auftretende Spannung ist durch den Blitzstrom und den im Strompfad liegenden Widerstand bestimmt. Bei einem Einschlag in einen Phasenleiter wird in den meisten Fällen die Überschlagspannung der Leitungsisolatoren überschritten, so dass am nächstliegenden

Mast ein Überschlag des Isolators erfolgt, evtl. auch an mehreren aufeinanderfolgenden Masten.

Solche Überschläge an den Leitungsisolatoren lassen sich nicht vermeiden. Sie führen zu einer gewissen Begrenzung der Spannung, und im Abstand einiger Spannweiten von der Einschlagstelle kann die Spannung den Überschlagswert der Leitungsisolatoren nicht mehr überschreiten. Diese Spannung läuft dann als Wanderwelle mit Lichtgeschwindigkeit der Leitung entlang und gelangt dabei in die Anlagen der Kraftwerke, Unterwerke, Trafostationen usw. Für die hier installierten Apparate und Transformatoren sind die von der Leitung hereinkommenden Überspannungen meist noch gefährlich hoch, hier muss daher der Überspannungsschutz durch Ableiter einsetzen. Die Überspannungsableiter begrenzen die Spannungen auf ein ungefährliches Niveau, das sogenannte Schutzniveau, das um eine Sicherheitsmarge unter dem Isolationsniveau der Apparate und Transformatoren liegt.

Ernst Vogelsanger,
dipl. Elektroingenieur ETH,
Versuchsleiter der
Forschungskommission des SEV und VSE
für Hochspannungsfragen (FKH)

Blitzdaten

Damit sich die Störwirkungen durch Blitzeinschläge beherrschen lassen, müssen die Charakteristiken der auftretenden Blitzströme bekannt sein. In der Schweiz wurde diesem Problem schon relativ früh Beachtung geschenkt. Bereits 1926 wurde K. Berger vom Schweizerischen Elektrotechnischen Verein beauftragt, den damals bekannten Dufourschen Kathodenstrahl-Oszillographen weiter zu entwickeln, so dass damit kurzdauernde Vorgänge mit Selbsttriggerung gemessen werden können. 1928 war dies so weit gelungen, dass an der Fahrleitung der Forchbahn die ersten Gewitterüberspannungen aufgezeichnet werden konnten. 1929 erfolgten dann weitere Messungen an der 132-kV-Leitung Vernayaz-Rupperswil der SBB.

Im Auftrag der 1937 gegründeten Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen hat Berger 1942 auf dem Monte San Salvatore bei Lugano eine Blitzmessstation eingerichtet, wo die Ströme der in eine 70 m hohe Auffangstange einschlagenden Blitze über einen Shunt geleitet und oszillographisch untersucht wurden [1]. Diese Messstation ist während 35 Jahren in Betrieb gestanden und hat viele Informationen über Blitzströme geliefert [2...6]. Seither wurden auch in Italien (Monte Orsa und Foligno) und Deutschland (Hoher Peissenberg) ähnliche Messstationen aufgebaut, und in Frankreich (Saint-Privat-d'Allier) werden mit Raketen dünne Drähte gegen die Gewitterwolken geschossen, um die Blitze aufzufangen [7, 8]. Weit aus die meisten bekannten Blitzdaten stammen aber aus den Schweizer Messungen auf dem Monte San Salvatore.

Zum besseren Verständnis des Folgenden müssen einige allgemeine Eigenschaften der Blitze hier erwähnt werden.

Abwärtsblitze und Aufwärtsblitze

Der Funkenkanal des Blitzes bildet sich nicht momentan auf seiner ganzen Länge, sondern er beginnt mit einer Entladung an der Stelle grösster Feldstärke und wächst von dort aus mit einer Geschwindigkeit von 100...1000 km/s. Im allgemeinen liegt der Ausgangspunkt in der Wolke, und der Kanal wächst von der Wolke zur Erde, oder (was vermutlich die Regel ist) er bildet zunächst einen Wolkenblitz zwischen zwei verschiedenen polarisierten Ladungsgebieten der Wolke, und nur ein Seitenast dieses Wolkenblitzes wächst zur Erde. Solche Blitze,

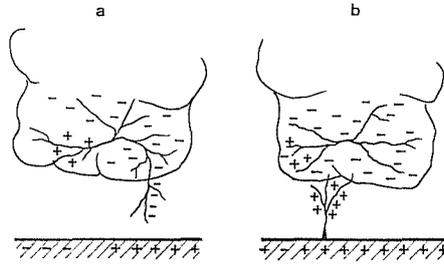


Bild 1 Schematische Darstellung der Entstehung von Abwärts- und Aufwärtsblitzen. Der Abwärtsblitz (a) beginnt in der Wolke mit einer Entladung zwischen positiven und negativen Ladungsgebieten. Ein Ast dieser Entladung wächst in dem zwischen Wolke und Erde befindlichen Feld nach der Erde vor. Beim Beispiel des Aufwärtsblitzes (b) ist angenommen, dass ein auf der linken Seite der Wolke befindliches positives Ladungsgebiet durch eine Wolkenentladung neutralisiert wird. Dadurch steigt das Feld zwischen Wolke und Erde rasch an, und an einem Turm entwickelt sich der Aufwärtsblitz. Die gleichen Vorgänge können auch mit umgekehrten Ladungsvorzeichen auftreten

die von der Wolke zur Erde vorwachsen, nennen wir Abwärtsblitze.

Es kann aber auch vorkommen, dass an hervorstehenden Objekten der Erdoberfläche die Feldstärke infolge Spitzenwirkung so hoch wird, dass die Entladung dort ihren Anfang nehmen und gegen die Wolke vorwachsen kann. Solche Entladungen nennt man Aufwärtsblitze. Für die Entstehung dieser Blitze braucht es allerdings eine wirklich starke Spitzenwirkung an der Erdoberfläche. Sie werden daher im Flachland nur an hohen Türmen beobachtet, auf Bergkuppen oder andern exponierten Geländepunkten, zum Teil auch an weniger hohen Strukturen wie Masten oder Fahnenstangen.

In Bild 1 ist die Bildung der Aufwärts- und Abwärtsblitze schematisch dargestellt. Obwohl das Vorwachsen so

schnell erfolgt, dass man es von Auge nicht erkennen kann, lassen sich diese Blitze an ihrem Erscheinungsbild unterscheiden, da die Verästelungen immer in die Vorwachsrichtung zeigen. Bild 2 zeigt einen typischen Abwärtsblitz, Bild 3 einen typischen Aufwärtsblitz.

Blitzströme

Die in den Erdboden geleiteten Ströme sind bei Abwärts- und Aufwärtsblitzen stark verschieden. Beim Abwärtsblitz wird der Blitzkanal aus der Wolke aufgeladen, und wenn er den Erdboden erreicht, stellt er einen stark aufgeladenen Leiter dar, der sich – wie ein geladener Kondensator – stossartig entladen kann. Dabei entsteht ein starker Stromstoss kurzer Dauer (Halbwertszeit $\sim 100 \mu\text{s}$) mit einer Stromamplitude, die zwischen einigen kA und einigen 100 kA liegen kann. Beim Aufwärtsblitz wird der Blitzkanal (oder meist ein verzweigtes Kanalsystem)



Bild 3 Aufwärtsblitz am Auffangturm der italienischen Blitzmessstation auf dem Monte Orsa, vom Monte San Salvatore aus aufgenommen

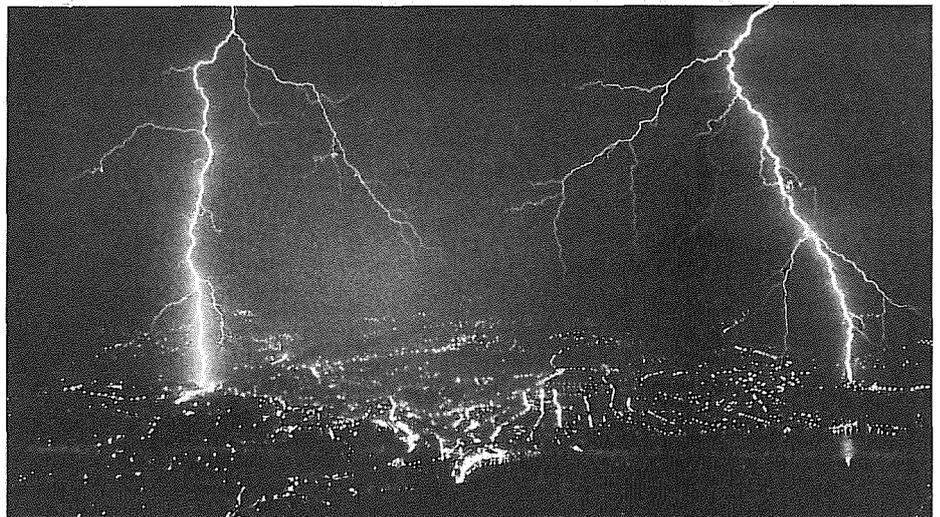


Bild 2 Zwei Abwärtsblitze, die die Stadt Lugano treffen, vom Monte San Salvatore aus aufgenommen

vom Boden aus aufgebaut, und es fließen dabei Ströme zwischen etwa 10 A und 1000 A während einiger Zehntelsekunden.

Diesen primären Vorgängen können allerdings sekundäre folgen, die die Unterschiede zwischen Abwärts- und Aufwärtsblitzen etwas verwischen. Bei Abwärtsblitzen muss der Strom nach der stossartigen Entladung des Blitzkanals nicht sofort abreißen, und es kann während einiger 10 ms noch ein Strom von einigen 100 A weiterfließen. Ferner behält ein Blitzkanal nach dem Erlöschen des Stromes noch während einiger 10 oder 100 ms eine reduzierte Durchschlagsfestigkeit. Eine in der Wolke fortschreitende Entladung kann daher zu weiteren Entladungen zur Erde führen, die dem vorher gebildeten Kanal folgen und im Stromverlauf zu Folgeblitzen führen, die im allgemeinen den Charakter von Abwärtsblitzen aufweisen. Man spricht dann von Mehrfachblitzen.

Da Aufwärtsblitze an Ausnahmesituationen gebunden sind, dürfen wir sie hier ausser acht lassen und müssen nur die Stromformen der Abwärtsblitze genauer unter die Lupe nehmen. Die darin auftretenden Stossströme haben steile Fronten und flachere mehr oder weniger exponentiell auslaufende Rückseiten, wie es die in Bild 4 wiedergegebenen Beispiele zeigen. Die Formen variieren etwas, je nachdem, ob es sich um positive oder negative Blitze handelt (positive Blitze führen positive Ladung und negative Blitze negative Ladung von der Wolke zur Erde) und ob es sich um erste Stösse (bzw. Einfachblitze) oder um Folgestösse in Mehrfachblitzen handelt. Die positiven Blitze machen nur etwa 1/4 aller Einschläge aus und sind ausnahmslos Einfachblitze.

Massgebend für die auf den Leitungen auftretenden Überspannungen sind die Stromscheitelwerte (ohmscher Spannungsabfall) und die Frontsteilheit (induktiver Spannungsabfall). Für die Überspannung, welche durch Überlagerung ankommender und reflektierter Wellen gebildet wird, sowie für die Belastung der Überspannungsableiter spielt auch die Zeitdauer eine Rolle.

Die Stromscheitelwerte variieren in weiten Grenzen, d. h. von wenigen kA bis etwa 150 kA bei negativen Blitzen und bis über 400 kA bei positiven Blitzen. Bild 5 zeigt die statistische Verteilung der Blitzstrom-Scheitelwerte, wie sie auf dem Monte San Salvatore ermittelt wurde. Der Mittelwert der Blitzstrom-Scheitelwerte betrug 30 kA,

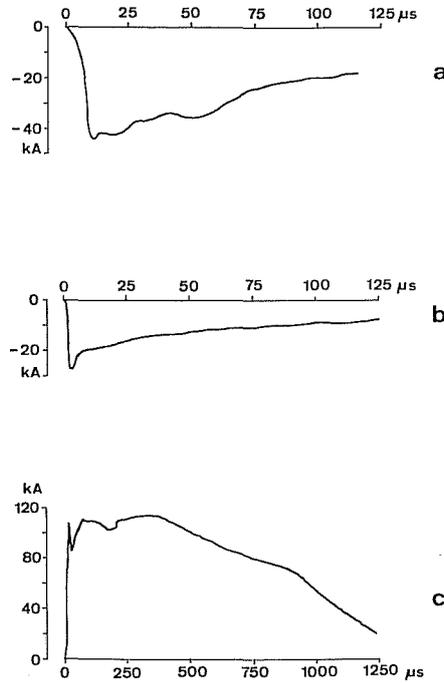


Bild 4 Typische Stossströme in Abwärtsblitzen: a = Negativer Einfachblitz oder erster Teilblitz aus Mehrfachblitzen; b = Folgeblitz in einem Mehrfachblitz; c = Positiver Blitz

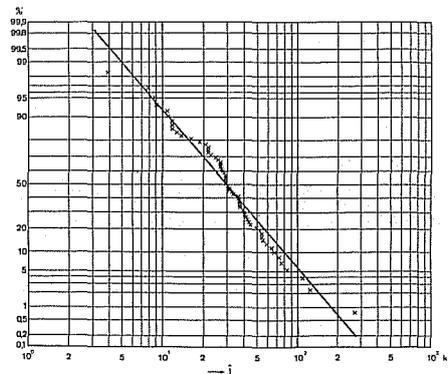


Bild 5 Summenhäufigkeit der Stromscheitelwerte in Abwärtsblitzen auf Grund der Messungen auf dem Monte San Salvatore in den Jahren 1963...1971 [4].

Die Ordinate zeigt, wieviel Prozent der 126 gemessenen Blitze den in der Abszisse angegebenen Stromscheitelwert erreichen oder überschreiten

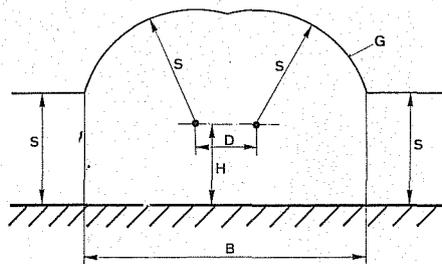


Bild 6 Ermittlung der Trefferwahrscheinlichkeit am Beispiel einer Leitung mit 2 Leitern:

H = Höhe der Leiter über Boden; D = Leiterabstand; S = Schlagweite, über die der Blitzkopf durch eine vom Erdboden oder von der Leitung ausgehende Fangentladung erreicht wird; G = Grenzfläche mit Abstand S von Erde oder Leiter; B = Breite des Streifens, auf dem die senkrecht nach unten vorwachsenden Blitze von der Leitung aufgefangen werden

6% der gemessenen Blitze lagen über 100 kA und 0,7% über 200 kA. Bei Mehrfachblitzen hat praktisch immer der erste Teilblitz den höchsten Scheitelwert. Unter den Folgestössen liegt der Maximalwert bei etwa 60 kA und der Mittelwert bei etwa 15 kA [4, 10]. Positive Blitze unterscheiden sich von den negativen neben den höheren Grenzwerten des Stromes und dem Fehlen von Mehrfachblitzen auch durch meist lange Impulsdauern. Die Halbwertszeit beträgt bei negativen Einfachblitzen und Anfangsstössen von Mehrfachblitzen etwa 100 μ s, bei Folgeblitzen etwa 50...100 μ s, hingegen bei positiven Blitzen ausnahmsweise bis zu 1000 μ s. Damit können positive Blitze auch sehr grosse Stossladungen mit sich führen, nämlich bis zu etwa 400 As, während das Maximum negativer Blitze bei 15 As liegt.

Der Anstieg der Stossfront ist bei den Folgestössen besonders steil. Die grösste Steilheit (steilste Tangente an die Stromkurve) beträgt bei diesen etwa 100 kA/ μ s und bei den Anfangsstössen oder Einfachblitzen etwa 50 kA/ μ s. Der auf alle Blitzformen bezogene Mittelwert (grösste Steilheit innerhalb eines Gesamtblitzes) liegt etwa bei 20 kA/ μ s.

Blitzeinschläge in Freileitungen

Die weitaus grösste Angriffsfläche, die ein Starkstromsystem (Hoch- und Niederspannung) dem Blitz bietet, liegt in den Freileitungen. Fragen wir zunächst nach der Anzahl der Blitzschläge, die in einem gegebenen Zeitraum die Leitung treffen. Um hier eine grobe Aussage machen zu können, geht man von der stark vereinfachenden Vorstellung aus, dass der Blitzkanal von der Wolke senkrecht nach unten wächst, bis sein Kopf eine bestimmte Überschlagdistanz zum nächstgelegenen geerdeten Objekt erreicht und dann durch eine von diesem Objekt ausgehende sogenannte Fangentladung mit diesem verbunden wird [10, 11, 12]. Die Überschlagdistanz hängt dabei von der Stromstärke ab. Der höhere Blitzstrom bedingt eine höhere Ladung des Blitzkanals, somit auch eine höhere Spannung zwischen Kanalkopf und Erde, d. h. «grössere Schlagweite».

In Bild 6 ist ein einfaches Beispiel mit zwei Leitern gezeichnet. Gemäss obiger Vorstellung entscheidet sich an der Grenzfläche G , ob der senkrecht von oben kommende Blitz in die Leitung oder in die Erde einschlägt. Trifft er auf dem mittleren Streifen der Breite B ein, so wird er in die Leitung schlagen, trifft

er ausserhalb dieses Streifens ein, so wird er in den Boden schlagen. Die durch die Fangentladung gegebene Schlagweite S wollen wir beim mittleren Blitzstrom von 30 kA zu 90 m annehmen [12]. Nehmen wir im weiteren für unser Beispiel die Leitungshöhe zu $H = 30$ m und den Abstand der beiden Leiter zu $D = 6$ m an, so wird die Breite B

$$B = D + 2\sqrt{2HS - H^2} = 140 \text{ m}$$

Die Anzahl der die Leitung treffenden Blitze entspricht somit derjenigen, die auf einem Streifen von 140 m Breite oder einem Areal von 0,14 km² Fläche pro km Leitungslänge niedergehen würde.

Aus Gewitter- und Blitzzählungen ist ungefähr bekannt, wie viele Blitze pro km² und Jahr in verschiedenen Gebieten zu erwarten sind. Für die Nordschweiz sind das im Durchschnitt etwa 3...4, für die Südschweiz etwa 5...6. Greifen wir das oben angeführte Beispiel wieder auf und nehmen wir 4 Blitze pro Jahr und km² an, so ergibt dies etwa 0,6 Blitze pro Jahr und km Leitungslänge. Selbstverständlich ist dies nur eine rohe Schätzung, da verschiedene zugrunde gelegte Annahmen nur näherungsweise erfüllt sind und da wir nur mit einem mittleren Blitzstrom und nicht mit der Gesamtheit der auftretenden Blitzströme gerechnet haben. Die topographischen Verhältnisse können auch grosse Unterschiede von Ort zu Ort verursachen. Leitungen im Gebirge verlaufen meist in den Taleinschnitten, während sich die Blitzeinschläge mehr auf die Bergrücken konzentrieren. Bei solchen Verhältnissen sind die Leitungen weniger gefährdet, als es der Durchschnittsrechnung entspricht. Eine genauere Untersuchung müsste auch zeigen, dass wegen der grösseren Schlagweite bei stromstärkeren Blitzen die Leitung von den starken Blitzen relativ mehr getroffen wird als von den schwachen.

Auch Blitzschläge, die die Leitung nicht direkt treffen, sondern nur den Boden in der Umgebung, können unter Umständen Überspannungen verursachen; man spricht dann von indirekten Blitzüberspannungen. Diese kommen so zustande, dass die Ladung des Blitzkanals auf der Leitung Influenzladung bindet, die bei der stossartigen Entladung des Kanals gegen Erde plötzlich frei wird und als Wanderwelle abfließen muss. Die so verursachten Spannungen überschreiten kaum 200 kV

und haben daher praktisch nur in Niederspannungssystemen Bedeutung.

Erdseile

Durch ein Erdseil (evtl. auch zwei Erdseile), das über den Phasenleitern ausgedehnt und an jedem Mast geerdet ist, können die Einschläge grösstenteils von den Phasenleitern ferngehalten werden. Eine vollständige Abschirmung der letzteren ist aber nicht möglich. Durch die gleichen Überlegungen, mit denen wir abgeschätzt haben, wie viele Einschläge die Leitung als Ganzes treffen, lässt sich auch deren Verteilung auf Erdseil und Phasenseile roh ermitteln. Bei den in der Schweiz üblichen Mastbildern von Hochspannungsleitungen mit einem Erdseil muss damit gerechnet werden, dass ungefähr 10% der in die Leitung schlagenden Blitze einen Phasenleiter treffen. Es sind dies aber eher die schwachen und mittleren Blitze, weniger die starken Blitze von 50 kA und mehr [13].

Einschlag in Phasenleiter

Was passiert nun bei einem Einschlag in einen Phasenleiter? Der Blitzstrom muss dann über diesen Leiter abfließen, wobei er sich in zwei nach den beiden Seilrichtungen fließende Wellen aufteilt. Die Wellenspannung U_W , die dabei am Leiter auftritt, ist durch den Wellenstrom (halber Blitzstrom $\frac{1}{2} I_B$) und den Wellenwiderstand Z_W des Leiterseiles mit Erdrückleitung bestimmt.

$$U_W = \frac{1}{2} I_B \cdot Z_W$$

Der Wellenwiderstand eines Leiterseiles ist ungefähr 500 Ω für ein Einfachseil und ungefähr 400 Ω für ein Zweierbündel. Rechnen wir mit 400 Ω , so gibt bereits ein mittlerer Blitz von 30 kA eine Spannung von 6000 kV. Diese Spannung ist so hoch, dass sie auf Niederspannungs- und Mittelspannungsleitungen an Ort und Stelle einen Überschlag auf die übrigen Phasenleiter und das Erdseil (falls vorhanden) und damit einen dreiphasigen Erdkurzschluss verursacht. Auf Höchstspannungsleitungen wird sie zumindest einen Isolatorüberschlag am nächstliegenden Mast einleiten, was einen einpoligen Erdkurzschluss ergibt.

Da im allgemeinen der Erdungswiderstand des Mastes wesentlich kleiner ist als der Wellenwiderstand der Seile, wird nun der grösste Teil des Blitzstroms über den Mast an Erde abfließen. Die Spannung am Leiterseil bricht dabei auf den Spannungsabfall an Mast und Masterdung zusammen. Die-

ser kann allerdings immer noch höher sein als die Überschlagspannung der Leitungsisolierung, so dass an den benachbarten Masten weitere Überschläge erfolgen, bis der Blitzstrom soweit verteilt ist, dass sich die Spannung auf Werte unterhalb der Überschlagspannung abbaut.

Die am Mastkopf auftretende Spannung entspricht dem ohmschen Spannungsabfall am Erdungswiderstand, dem während der Wellenfront noch der induktive Spannungsabfall am Mast überlagert ist¹. Um die Grössenordnung dieser Spannung aufzuzeigen, nehmen wir wieder einen mittleren Blitz mit 30 kA Stromscheitelwert und 20 kA/ μ s Frontsteilheit an und ferner als Beispiel einen Erdungswiderstand von 20 Ω und eine Mastinduktivität von 30 μ H (Masthöhe etwa 30 m). So ergibt sich eine ohmsche Spannung von 600 kV, welche die gleiche Form wie der Strom aufweist, und während der Stossfront eine überlagerte Spitze von ebenfalls 600 kV.

Rücküberschläge

Die oben ermittelte Spannung tritt natürlich auch dann auf, wenn der Einschlag direkt in den Mast oder in das Erdseil erfolgt und die Phasenseile gar nicht betroffen sind. Die letzteren bleiben dann nahezu auf ihrer Betriebsspannung, d. h., sie werden durch ihre kapazitive Kopplung mit dem Erdseil nur um einen Bruchteil (ungefähr 20%) der Mastkopfspeisung angehoben. Nimmt also der Mastkopf 600 kV gegen Erde an, so erscheinen davon etwa 500 kV an den Isolatorenketten. Bei Leitungen bis und mit 72,5 kV Nennspannung werden dann die Isolatorenketten überschlagen. Man spricht bei diesem Vorgang von Rücküberschlägen, da der geerdete Mast eine höhere Spannung aufweist als die Phasenseile. Darum bietet das Erdseil bei Leitungen unter 50 kV kaum Vorteile und wird in der Praxis meist weggelassen.

Folgerungen für die Leitung

Wenn wir die Resultate unseres Beispiels etwas verallgemeinern, können wir folgendes feststellen:

- Blitzschläge in die Phasenleiter (etwa 10%) führen fast immer zu Erdschlüssen oder Erdkurzschlüssen, nur bei schwachen Blitzen auf

¹ Diese vereinfachte Betrachtung ist allerdings nur dann korrekt, wenn die Wellenlaufzeit zwischen Mastkopf und Erde wesentlich kleiner als die Frontdauer der Stromwelle ist, sonst ist das Wellenspiel zwischen Mastkopf und Erde zu berücksichtigen.

Höchstspannungsleitungen eventuell nicht.

- Blitzschläge in die Erdseile oder Masten (etwa 90%) können an Hochspannungsleitungen nur noch Überschlüge ergeben, wenn entweder der Blitzstrom oder der Erdungswiderstand der Masten relativ hoch ist. Mit abnehmender Nennspannung des Netzes werden die Leitungsüberschlüge immer häufiger und kommen dann auch bei kleinen Blitzströmen und bei kleinen Masterdungswiderständen vor.

Dem Schutz der angeschlossenen Anlagen gegen atmosphärische Überspannungen kommt daher bei tiefen und mittleren Nennspannungen noch grössere Bedeutung zu als bei hohen Nennspannungen.

Wir müssen festhalten, dass blitzbedingte Überschlüge an Freileitungsisolatoren nicht zu verhindern sind. Freileitungsmasten mit Überspannungsableitern zu versehen kommt aus ökonomischen Gründen nicht in Frage, und die Ableiter wären den hier in Erscheinung tretenden vollen Blitzströmen auch nicht gewachsen. Man wird aber alle Massnahmen ergreifen, um Schäden und Betriebsstörungen zu vermeiden. Die Isolatoren für Hochspannungsleitungen sind mit geeigneten Armaturen ausgerüstet, damit der Überschlaglichtbogen von der Isolatoroberfläche ferngehalten und diese nicht beschädigt wird. Die Freileitungskurzschlüsse werden in der Regel durch Kurzunterbrechung bzw. Schnellwiedereinschaltung behoben; in gelöschten Mittelspannungsnetzen verschwindet der durch einen relativ schwachen Blitz eingeleitete lediglich einphasige Erdschluss sogar von selbst.

Durch die Leitungsüberschlüge sind in Abständen weniger Spannweiten von der Einschlagstelle die sich weiter ausbreitenden Überspannungswellen auf die Haltespannung der Leitungsisolation begrenzt, was für die angeschlossenen Stationen bereits einen gewissen Grobschutz darstellt. In diesem Zusammenhang ist allerdings noch eine Bemerkung über Holzstangenleitungen fällig. Holz – auch wenn es nass ist – stellt für Stossspannungen einen guten Isolator dar. Für Blitzspannungen sind somit die Leiter der Holzstangenleitungen viel höher gegen Erde isoliert, als dies der Nennspannung entspricht. Damit die in die angeschlossenen Stationen einlaufenden Überspannungen ähnlich begrenzt werden, wie dies bei Metallmastleitungen der Fall ist, müssen daher an mindestens ein bis zwei

Masten ausserhalb der Stationen die Isolatorarmaturen geerdet werden.

Über die Störanfälligkeit verschiedener Leitungstypen liegt eine umfangreiche Literatur vor, in der sowohl die Betriebsstatistiken als auch die theoretischen Gesichtspunkte eingehend behandelt sind [14...16].

Schutz des Stationsmaterials

Obwohl die Überspannungen bereits auf den Leitungen durch Überschlüge an der Leitungsisolation begrenzt werden, genügt das in vielen Fällen nicht für den Schutz von elektrischen Anlagen (z.B. Kraftwerke, Unterwerke, Schalt- und Transformatorenstationen). Die mit den Leitungen verbundenen Objekte der Anlage (z.B. Transformatoren, Schaltapparate, Wandler und Kabelendverschlüsse²) haben feste oder flüssige Isolationen, die sich nach einem Durchschlag (anders als die Luftstrecken der Freileitungsisolatoren) nicht selbst regenerieren. Ein Isolationsdefekt stellt somit eine Materialzerstörung dar, welche eine längere Betriebsunterbrechung der ganzen Anlage nach sich ziehen kann.

Die Isolationen sind aber auch nach ökonomischen Gesichtspunkten ausulegen und müssen daher auf der Grundlage einer zuverlässig begrenzten Beanspruchung dimensioniert werden. Man begrenzt dazu die Höhe der Überspannungen durch zwischen Phasenleiter und Erde geschaltete Schutzapparate auf ein möglichst tiefes Spannungsniveau, das sogenannte Schutzniveau. Auf Grund der konstruktiven Gegebenheiten der Schutzapparate lässt sich allerdings ein bestimmter Abstand des Schutzniveaus von der Nennspannung nicht unterschreiten.

Im einfachsten Fall können die Schutzapparate einfache Funkenstrecken sein. Funkenstrecken haben jedoch die Nachteile, dass ihre Ansprechspannung für positive und negative Wellen verschieden und ausserdem einer beträchtlichen Streuung unterworfen ist, sowie dass ein einmal gezündeter Lichtbogen nicht mehr von selbst erlischt. Sie werden daher nur noch in Ausnahmefällen zur Überspannungsbegrenzung in Anlagen eingesetzt. Demgegenüber ist heute der Überspannungsableiter als ein hochentwickelter Schutzapparat anzusehen, der mit einer präzise ansprechenden Funkenstrecke in Reihe zu einem spannungsabhängigen Wider-

stand arbeitet. Der Widerstand ermöglicht, dass nach dem Abklingen der Überspannung der unter der Wirkung der Netznennspannung fliessende Folgestrom unterbrochen werden kann. Beim Ansprechen des Überspannungsableiters fällt die Spannung nicht auf null, sondern auf die durch den Widerstand bedingte Restspannung. Ansprechspannung und Restspannung bestimmen das Schutzniveau.

Koordination der Isolation

Die Haltespannung der Anlageisolation, das sogenannte Isolationsniveau, muss nun um eine Sicherheitsmarge höher liegen als das Schutzniveau. Man bezeichnet die gegenseitige Zuordnung von Schutzniveau und Isolationsniveau als Koordination der Isolation. Es bestehen dafür internationale Regeln, die von der Schweiz mit einigen Zusätzen übernommen sind [17...20]. Das Verhältnis zwischen Isolationsniveau und Schutzniveau muss danach mindestens 1,4 betragen bei Nennspannungen unter 52 kV und mindestens 1,2 bei Nennspannungen von 52 kV und mehr. Die Schweizer Regeln sehen noch vor, dass die offene Trennstrecke eines Trenners noch eine um 15% höhere Spannung halten muss als die Isolation gegen Erde, damit die offene Trennstrecke auch dann sicher nicht überschlagen wird, wenn auf der Leitungsseite des Trenners kein Ableiter angeschlossen ist. In Bild 7 ist die von den Schweizer Regeln vorgesehene Abstufung der Niveaus dargestellt. Für den Nachweis der Haltespannung beim Stationsmaterial und der Ansprechspannung bei den Überspannungsableitern sind Stossprüfungen mit dem Normalstoss $1,2/50 \mu\text{s}$ vorgesehen, d.h. mit einer Stossspannung, deren Frontdauer $1,2 \mu\text{s}$ und deren Rückenhalbwertszeit $50 \mu\text{s}$ beträgt. Man ist sich dabei im klaren, dass sowohl die Haltespannung der Isolation als auch die Ansprechspannung der Ableiter einer gewissen Streuung unterworfen sind. Die spezifizierten Niveaus sind daher nicht absolute Grenzwerte, ein gewisses Fehlerisiko bleibt immer, und eine exakte Behandlung ist nur mit statistischen Methoden möglich. Für die höchsten Nennspannungen, wo die Isolation kostenmässig stark ins Gewicht fällt, wird in den Koordinationsregeln zur Erzielung eines möglichst ökonomischen Resultates eine statistische Methode vorgeschlagen [19].

Es muss an dieser Stelle auch gesagt werden, dass die atmosphärischen Überspannungen nicht die einzigen

² Rotierende Maschinen sind in der Regel nur über Transformatoren an Freileitungen angeschlossen.

Überspannungen sind, die in den elektrischen Anlagen auftreten können. Vor allem die sogenannten Schaltüberspannungen, die durch gewollte oder

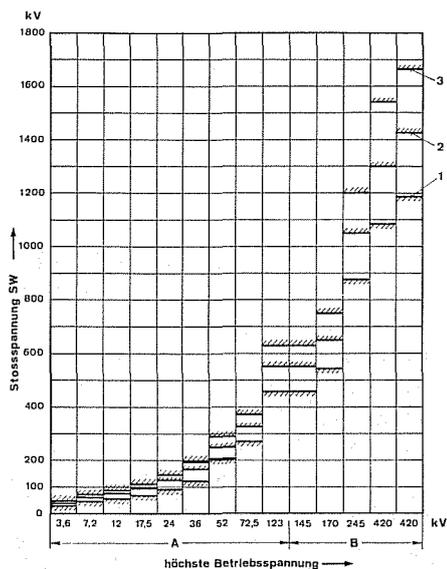


Bild 7 Koordinationsniveaus der Isolation gemäss Schweizer Regeln [19]
 1 = Höchstwert des Schutzniveaus. Durch die Wahl eines tieferen Wertes (im Rahmen der durch die Ableiter gegebenen Möglichkeiten) kann die Sicherheit der Anlage verbessert werden; 2 = Haltespannung der Isolation gegen Erde; 3 = Haltespannung der offenen Trennstrecken von Trennern; A = Für Netze mit nicht wirksam geerdetem Sternpunkt (Erdfehlerfaktor $\sqrt{3}$); B = Für Netze mit wirksam geerdetem Sternpunkt (Erdfehlerfaktor $0,8 \cdot \sqrt{3}$)
 Bei der höchsten Betriebsspannung 420 kV sind zwei Isolationsniveaus zur Auswahl angegeben

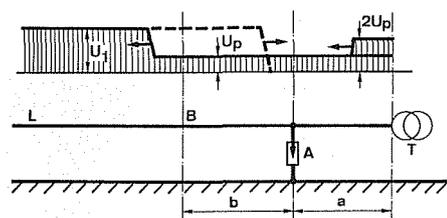


Bild 8 Spannungswellen in einer Kopfstation mit Ableiter
 L = Freileitung; A = Überspannungsableiter; T = Transformator; U_1 = Ankommende Welle; U_p = Ableiterrestspannung
 Erklärung der Vorgänge im Text

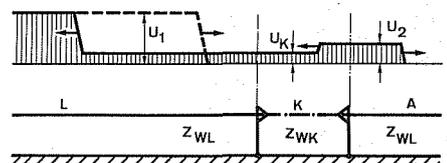


Bild 9 Spannungswellen bei einer Kabelverbindung zwischen Freileitung und Anlage
 L = Freileitung; K = Kabel; A = Anlage; Z_{WL} = Wellenwiderstand der Freileitung und der Leiter in der Anlage; Z_{WK} = Wellenwiderstand des Kabels; U_1 = Ankommende Welle auf der Leitung; U_k = Welle im Kabel; U_2 = Welle in der Anlage
 Erklärung der Vorgänge im Text

ungewollte Schalthandlungen zustande kommen, können auch für die Isolation gefährliche Werte annehmen. Besonders bei den höchsten Nennspannungen (≥ 300 kV) treten die Schaltüberspannungen in den Vordergrund, und die Koordination der Isolation muss daher auch diese Überspannungen berücksichtigen. Dies gehört jedoch nicht mehr in den Rahmen des vorliegenden Aufsatzes.

Schutzbereich eines Ableiters

Beim Durchlauf einer steilen Wellenfront ist die Spannung auf einem Leiter von Ort zu Ort verschieden. Da ein Ableiter die Spannung nur an seinem Einbauort beeinflussen kann, ist sein Wirkungsbereich begrenzt. Bild 8 soll das am einfachen Beispiel einer Kopfstation veranschaulichen. Der Transformator T ist über eine unverzweigte Verbindung an die Freileitung L angeschlossen. Im Abstand a vor dem Transformator befinden sich die Ableiter A. Das Diagramm darüber zeigt die Wellenspannung. Es ist gleichgültig, ob sie auf allen drei Phasenleitern oder nur auf einem derselben auftritt. Die gestrichelte Linie zeigt die ankommende Welle U_1 , kurz bevor sie den Ableiter erreicht hat. Der Ableiter begrenzt die Spannung auf seine Restspannung U_p , so dass sich, wenn die Front U_1 bei A angekommen ist, der Zustand U_p von dort aus wellenförmig ausbreitet, in Richtung der Leitung L sowie auch in Richtung des Transformators T. Eine negative Welle, die die ursprüngliche Wellenspannung U_1 auf U_p absenkt, läuft dabei in die Leitung zurück. Die Teilwelle, die zum Transformator weiterläuft, ist ebenfalls auf U_p abgesenkt, wird aber am Transformator mit Spannungsverdopplung reflektiert, da der Transformator mit seiner hohen Wellenimpedanz wie ein offenes Leitungsende wirkt. Die Spannung am Transformator bleibt so lange auf der doppelten Ableiterrestspannung, bis die am Ableiter erneut reflektierte Welle sie wieder abbaut. Es ist dies während der doppelten Wellenlaufzeit auf der Strecke a.

$$2\tau = 2a/c, \quad c = \text{Lichtgeschwindigkeit.}$$

Betrachten wir noch einen Isolator an einem Punkt B, der im Abstand b vor dem Ableiter liegt, so erhält dieser vom Moment, wo ihn die ankommende Welle erreicht hat, bis zum Eintreffen der am Ableiter reflektierten Welle – also während der doppelten Laufzeit auf der Strecke b – die volle Wellen-

spannung U_1 . Diese Verhältnisse gelten allerdings nur dann; wenn (wie es in Bild 8 gezeichnet ist) die Front der Welle kurz ist gegenüber den Laufzeiten auf den Strecken a und b. Dies kann nur bei sehr grossen Anlageausdehnungen der Fall sein. Ist die Anstiegszeit der Welle bis zum Erreichen der Ableiterrestspannung länger als die doppelte Wellenlaufzeit auf den Strecken a oder b, so beginnt die rücklaufende Welle die vorlaufende abzubauen, bevor diese ihren vollen Wert erreicht hat, und die Spannungsspitzen bei T und B werden weniger hoch. In der Praxis rechnet man aber doch damit, dass bereits in Abständen von 10...20 m vom Ableiter ein merklicher Zuschlag zur Ableiterbegrenzungsspannung gemacht werden muss. Man geht daher meist so vor, dass man die Ableiter unmittelbar neben den wichtigsten Objekten der Anlage – meist Transformatoren oder Kabelendverschlüsse – platziert und bei den entfernter liegenden Apparaten ein erhöhtes Überschlagsrisiko in Kauf nimmt. Es ist selbstverständlich, dass Zuleitungen und Erdleitungen der Ableiter möglichst kurz gehalten werden, und dass die letzteren unmittelbar an die Schutzterdung der zu schützenden Objekte angeschlossen sein müssen.

Kabeleinführung

Besondere Verhältnisse liegen vor, wenn die Freileitung über ein Stück Kabel in die Anlage eingeführt ist, wie dies in Bild 9 dargestellt ist. Da Kabel einen wesentlich kleineren Wellenwiderstand ($25...50\Omega$) als Freileitungen aufweisen, ergeben sich an den Übergängen Reflexionen. Die einlaufende Welle U_1 wird beim Übergang auf das Kabel auf die Spannung U_k abgesenkt:

$$U_k = U_1 \cdot \frac{2 Z_{WK}}{Z_{WL} + Z_{WK}} \approx U_1 \cdot \frac{2 Z_{WK}}{Z_{WL}}$$

Beim Übergang auf die offenen Leiter entsteht die Spannung U_2 :

$$U_2 = U_k \cdot \frac{2 Z_{WL}}{Z_{WL} + Z_{WK}} \approx 2 U_k \approx U_1 \cdot \frac{4 Z_{WK}}{Z_{WL}}$$

U_2 ist kleiner als U_1 , und das Kabel bewirkt auf diese Weise zunächst eine Absenkung der in die Anlage gelangenden Spannung. Durch das Spiel der auf dem Kabel hin- und herlaufenden Wellen wird aber die Spannung U_2 nach einigen Reflexionen gleichwohl auf die Höhe U_1 ansteigen, wenn das Leitungssystem der Anlage A mit einer weiteren Freileitung in Verbindung steht, oder

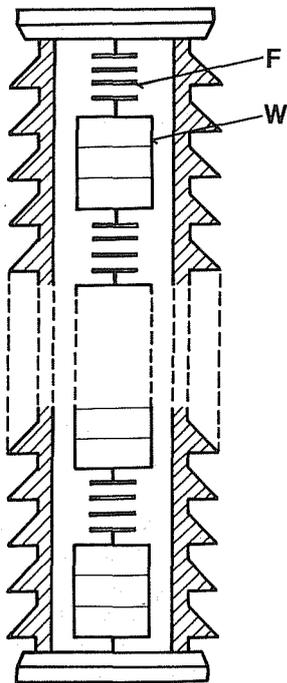


Bild 10 Aufbau eines Überspannungsableiters für Hochspannung
F = Funkenstrecken; W = Spannungsabhängige Widerstände

sogar auf $2 U_1$, wenn das System *A* für die Welle ein offenes Ende aufweist (z. B. nur ein Transformator und keine weitere Leitung angeschlossen). Schützt man den Endverschluss am Kabeleingang, so ist zu beachten, dass die Ableiter auch hier nur einen örtlichen Schutz darstellen. Kommt von aussen eine Überspannungswelle herein, die hoch genug ist, um trotz der vom Kabel bewirkten Absenkung den Ableiter zum Ansprechen zu bringen, so ist die in das Kabel einlaufende Spannung gleich der Ableiterrestspannung. Am Kabelende ergeben sich dann gleiche Verhältnisse wie am Transformator von Bild 8 mit kurzzeitiger Spannungsüberhöhung, die im Grenzfall bis zur Verdoppelung gehen kann. Sobald die Kabellänge 10...20 m übersteigt, muss am Kabelende bzw. in der Anlage ein zweiter Ableitersatz angebracht werden, um dies zu verhindern. Es gibt allerdings Fälle, wo das Kabel direkt in eine SF₆-isolierte Anlage oder einen Öltransformator eingeführt wird, so dass ein normaler Ableiter nicht mehr angeschlossen werden kann. Es muss dann von Fall zu Fall entschieden werden, ob man einen teuren Spezialableiter einbauen oder das erhöhte Fehlerrisiko in Kauf nehmen will.

Ableiterströme

Eine wichtige Nenngrösse des Ableiters ist das Ableitvermögen. Das ist der

Stossstrom, für den der spannungsabhängige Widerstand dimensioniert wird und bei dem die Restspannung die Höhe des Schutzniveaus nicht überschreiten darf. Für die entsprechende Prüfung werden normalisierte Stromstösse der Form $8/20 \mu s$ ($8 \mu s$ Frontdauer und $20 \mu s$ Rückenhalbwertszeit) angewendet. Die Wellenströme, die die Überspannungswellen auf den Leitungen mit sich führen, ergeben sich aus der Wellenspannung U_w und dem Wellenwiderstand Z_w

$$I_w = U_w / Z_w$$

Am Ableiter mit der Restspannung U_p wird die Welle reflektiert, und der Ableitstrom erhöht sich auf

$$I_A = (2 U_w - U_p) / Z_w$$

Sieht man von Holzstangenleitungen ab, so wächst der mögliche Ableitstrom mehr oder weniger linear mit der Nennspannung des Systems. Nehmen wir als Beispiel die höchste in der Schweiz angewendete Nennspannung von 420 kV, so können wir die Wellenspannung zu etwa 1500 kV und die Ableiterrestspannung zu etwa 1000 kV ansetzen. Bei einer Wellenimpedanz der Leitung von 400Ω wird dann der Ableitstrom 5000 A. In der Praxis werden heute meist Ableiter mit 10000 A Nennableitvermögen eingesetzt, bei

kleineren Nennspannungen auch solche von 5000 A oder 2500 A.

Schutz von Niederspannungsanlagen

Wir haben bisher ausschliesslich von Hochspannungsanlagen gesprochen, die gleichen Probleme bestehen aber auch in Niederspannungs-Freileitungsnetzen. Da Niederspannungsleitungen meist auf Holzstangen verlegt sind, stehen die auf diesen Leitungen möglichen hohen Überspannungen sogar in einem extremen Gegensatz zu den geringen Isolationsanforderungen, die durch die Betriebsspannung gestellt werden. Bei jeder Stations- oder Hauseinführung sind jedoch Luftstrecken vorhanden, die diese Spannungen wieder absenken. Beim Niederspannungsanlagematerial ist nun – schon rein aus mechanischen Gründen – die Haltespannung der festen Isolation und der Ölstrecken relativ hoch gegenüber derjenigen der Luftstrecken. Überspannungsstörungen in Niederspannungsanlagen beschränken sich daher im allgemeinen auf Luftstreckenüberschläge. Grosse Leistungskonzentrationen finden sich praktisch nur in Kabelnetzen, wo sie keinen atmosphärischen Überspannungen ausgesetzt sind. In kleinen Anlagen und Hausanschlüssen führt aber ein Luftstreckenüberschlag höchstens zum Durchschmelzen einer Sicherung, und der dadurch bewirkte Stromausfall trifft nur einen kleinen Versorgungsbe- reich. Diesen Umständen ist es wohl

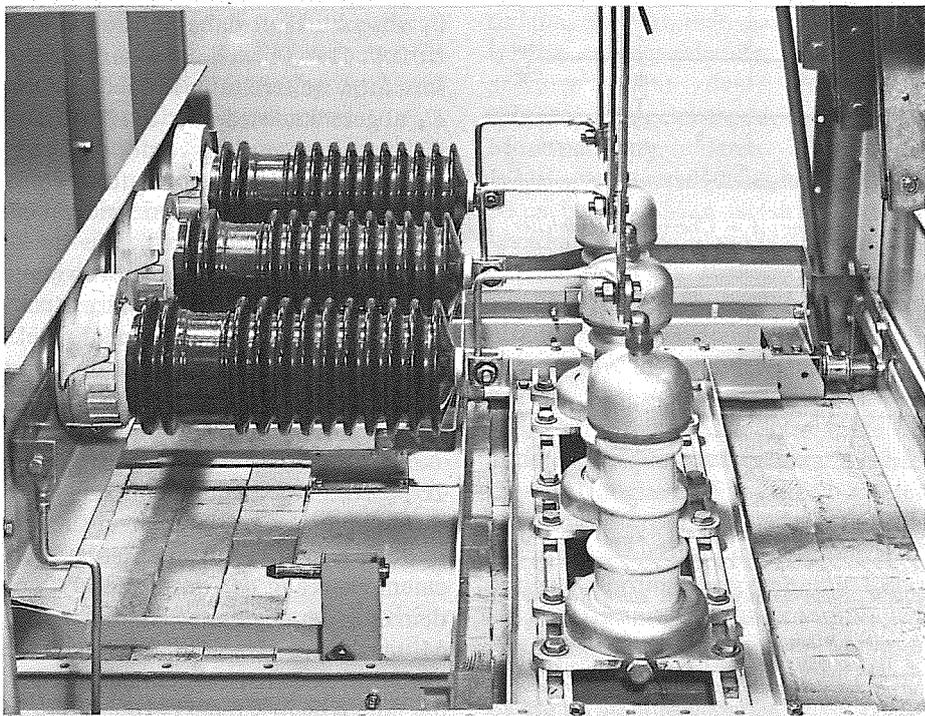


Bild 11 Überspannungsableiter an der Kabeleinführung in einer 17,5-kV-Innenraumanlage (Sprecher & Schuhl AG, Aarau)

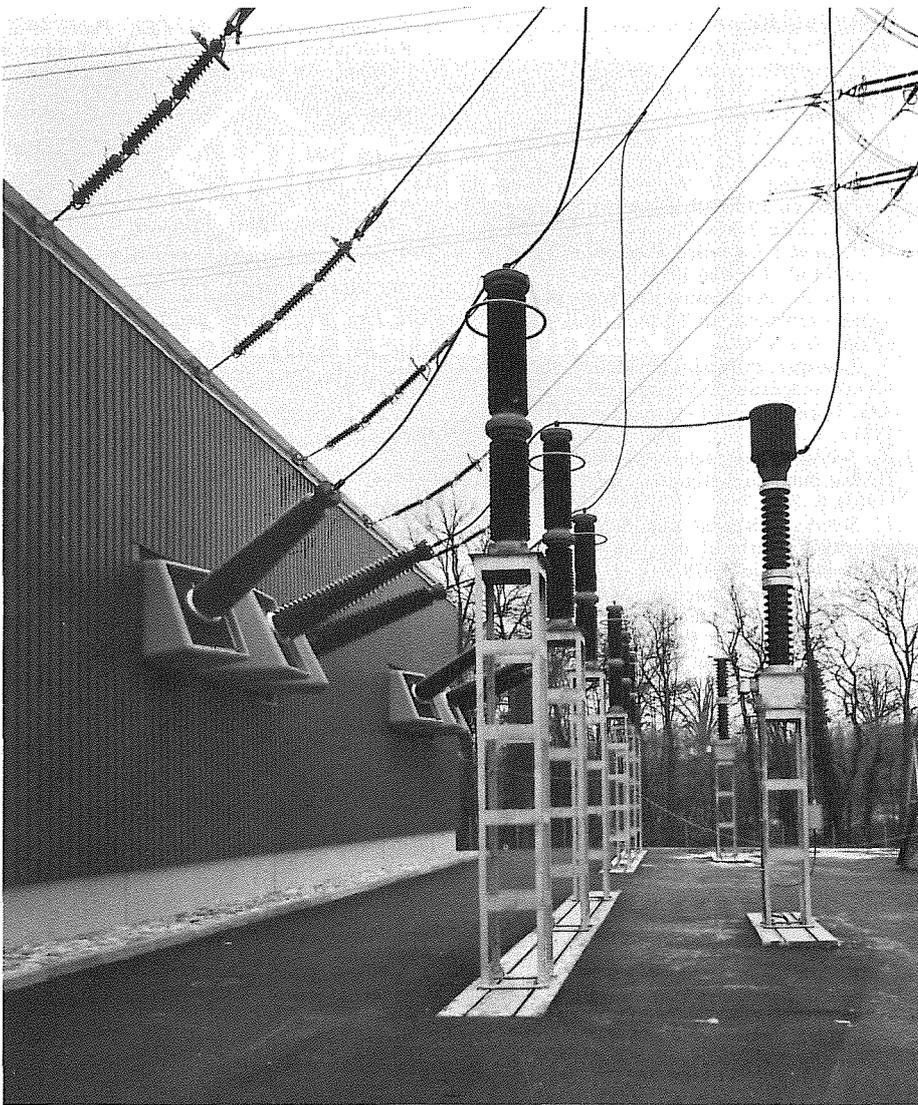


Bild 12 Überspannungsableiter an den Freileitungseinführungen in eine 245-kV-SF₆-Schaltanlage (Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., Baden)

zuzuschreiben, dass die zur Verfügung stehenden handlichen Überspannungsableiter für Niederspannung in der Praxis bisher wenig Verbreitung gefunden haben.

Aufbau der Überspannungsableiter

Die Überspannungsableiter bestehen im wesentlichen aus einer Funkenstrecke und einem spannungsabhängigen Widerstand (oder aus mehreren so aufgebauten Elementen), die in einem Porzellangehäuse eingebaut sind, wie dies in Bild 10 schematisch dargestellt ist. Die Bilder 11 und 12 zeigen zwei Beispiele von in Hochspannungsanlagen eingebauten Ableitern. Die Funkenstrecke, die bei Hochspannungsableitern aus einem Stapel serienschalteter Teilfunkenstrecken besteht, trennt im Normalbetrieb den Widerstand von der Spannung ab. Bei einer definierten Stossansprechspannung kommt sie zum Ansprech- und verbindet den Widerstand mit dem Span-

nung führenden Leiter. Der spannungsabhängige Widerstand hat eine stark gekrümmte Stromspannungskennlinie, derart, dass die am Widerstand auftretende Spannung bei grossen Stossströmen nur noch ganz wenig mit dem Strom ansteigt. Bild 13 zeigt diese Spannung in Funktion des Stromes beim Durchlauf eines Stossstromes. Wegen der Erwärmung des Materials durch den Strom liegt die Spannung im Stossrücken etwas tiefer als in der Stossfront, und die Kennlinie beschreibt daher eine Schleife. Ist die Spannung nach dem Abklingen des Stossstromes wieder auf den der Betriebsspannung entsprechenden Wert gesunken, so ist der dabei noch fließende Folgestrom so klein, dass er von der Funkenstrecke spätestens beim folgenden Nulldurchgang unterbrochen wird.

Die Funkenstrecke kann konstruktiv aus einem Stapel von Plattenelektroden bestehen. Die vielfache Untertei-

lung der Funkenstrecke ergibt eine relativ hohe Brennspannung des Lichtbogens, so dass dieser bei kleinen Strömen erlischt. Bei Höchstspannungsableitern, an die besonders hohe Anforderungen gestellt werden (vor allem relativ tiefe Ansprech- und Restspannungswerte), werden meist komplizierter aufgebaute Teilfunkenstrecken verwendet, bei denen der Lichtbogen durch magnetische Blasung ausgezogen wird. Die Lichtbogenlöschung erfolgt dann auch bei wesentlich grösseren Strömen.

Die spannungsabhängigen Widerstände bestehen im allgemeinen aus feinkörnigem Siliziumkarbid (SiC), das gleich wie bei Schleifscheiben durch keramische Bindemittel zu Scheiben oder Blöcken verbunden wird. Siliziumkarbid ist ein relativ gut leitender Halbleiter. Jedes Korn ist aber von einer nichtleitenden Quarzschicht (SiO₂) umgeben. Die am Widerstand anliegende Spannung ergibt in den Quarzschichten sehr hohe Felder, so dass bei einer bestimmten Spannung durch Elektronenemission der Strom einsetzt. In neuerer Zeit sind auch Metalloxide bekannt geworden, die eine noch viel schärfer geknickte Stromspannungscharakteristik ergeben, als dies beim Siliziumkarbid der Fall ist, und die im unteren Spannungsbereich praktisch isolieren. Es ist denkbar, dass in Zukunft mit diesen Materialien Ableiter hergestellt werden können, die keine Funkenstrecke mehr benötigen.

Der prinzipiell einfache Aufbau der Überspannungsableiter darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass sehr hohe Anforderungen an diese Apparate gestellt werden. Das präzise Ansprech- und das sichere Löschen der Funken-

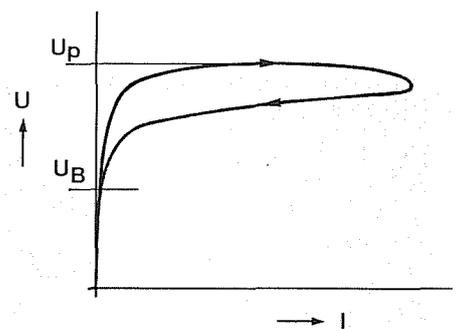


Bild 13 Stromspannungskennlinie eines spannungsabhängigen Widerstandes beim Durchgang eines Stossstromes (schematisch)

I = Strom; U = Spannung; U_P = Restspannung; U_B = Scheitelwert der maximal zulässigen Wechselspannung

Wegen der Erwärmung des Widerstandes beim Stromdurchgang ist die Spannung im Rücken des Stromstosses etwas niedriger als die der Front, und die Kennlinie bildet eine Schleife

strecke wie auch die günstige Kennlinie und das hohe Ableitvermögen der Widerstände sind das Resultat langjähriger Entwicklungsarbeit. Hier konnte nur das Wichtigste erwähnt werden, das im unmittelbaren Zusammenhang mit der Begrenzung der Blitzüberspannungen steht. Die Beherrschung der Schaltüberspannungen und der sichere Betrieb in Freiluftanlagen ergeben weitere Anforderungen. Umfangreiche Typenversuche [21] sorgen dafür, dass alle Anforderungen erfüllt sind und die Ableiter ihrer Aufgabe in der Gewährleistung einer störungsfreien Stromversorgung jederzeit gerecht werden.

- 1 K. Berger: Die Blitzmessstation auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 34 (1943), S. 803...805.
- 2 K. Berger / E. Vogelsanger: Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore, Bull. SEV/VSE 56 (1965). S. 2...22.
- 3 K. Berger / E. Vogelsanger: Photographische Blitzuntersuchungen der Jahre 1955...1965 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 57 (1966), S. 599...620.
- 4 K. Berger: Methoden und Resultate der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore bei Lugano in den Jahren 1963...1971. Bull. SEV 63 (1972), S. 1403...1422.
- 5 K. Berger: Oszillographische Messungen des Feldverlaufs in der Nähe des Blitzeinschlags auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 64 (1973), S. 1403...1422.
- 6 K. Berger: Blitzstromparameter von Aufwärtsblitzen. Bull. SEV 69 (1978), S. 353...360.
- 7 E. Garbagnati / E. Guidice / G. B. Lo Piparo: Messungen von Blitzströmen in Italien – Er-

- gebnis einer statistischen Auswertung. ETZ-a 99 (1978), S. 664...668.
- 8 *Blitzforschungsgruppe München*: Aktuelle Aufgaben und Methoden der Blitzforschung. ETZ-a 99 (1978), S. 652...654.
- 9 R. P. Fiaux / C. H. Gary / B. P. Hutzler / A. R. Eybert-Berard / P. L. Hubert / A. C. Meesters / P. H. Perrond / H. H. Hamelin / J. M. Person: Research on artificially triggered lightning in France. IEEE Trans. PAS-97, S. 725...733.
- 10 R. H. Golde: Lightning Protection. Edward Arnold Ltd., London 1973.
- 11 F. Schwab: Berechnung der Schutzwirkung von Blitzableitern an Türmen. Bull. SEV 56 (1965), S. 678...683.
- 12 P. Wiesinger, P. Hasse: Handbuch für Blitzschutz und Erdung. Verlag Richard Pflaum KG, München, VDE-Verlag GmbH, Berlin 1977.
- 13 K. Berger: Elektrische Anforderungen an Höchstspannungsleitungen. Bull. SEV 54 (1963), S. 749...754.
- 14 E. Schuh: Störungs- und Schadenstatistik 1966-1975. Verband der Elektrizitätswerke Österreichs, Wien 1978.
- 15 E. R. Whitehead: Protection of Transmission Lines. Lightning, edited by R. H. Golde, Vol. 2: Lightning Protection. Academic Press, London / New York / San Francisco 1977.
- 16 S. Rusk: Protection of Distribution Lines. Lightning, edited by R. H. Golde, Vol. 2: Lightning Protection. Academic Press, London/New York/San Francisco 1977.
- 17 *Norme de la CEI, Publ. 71-1*: Coordination de l'isolement, première partie: Termes, définitions, principes et règles. Bureau Centrale de la CEI, Genève 1976.
- 18 *Norme de la CEI, Publ. 71-2*: Coordination de l'isolement, deuxième partie: Guide d'application. Bureau Centrale de la CEI, Genève 1976.
- 19 SEV 3327: Regeln für die Koordination der Isolation, Teil 1: Begriffe, Definitionen, Grundlagen und Richtlinien, Zusatzbestimmungen des SEV zu CEI-Publ. 71-1 (6. Auflage, 1976). SEV, Zürich, in Vorbereitung.
- 20 M. Christoffel: Die neuen Koordinationsregeln des SEV. Bull. SEV/VSE 69 (1978), S. 856...858.

21 *Recommendation de la CEI, Publ. 99-1*: Parafoudres, première partie: Parafoudres à résistance variable pour réseaux à courant alternatif. Bureau Centrale de la CEI, Genève 1970.

Résumé

Les perturbations dues à la foudre dans les installations à courant fort sont presque toutes causées par des foudroiements directs sur les lignes à haute tension. Les principales propriétés des courants de foudre sont exposées ici et le nombre probable des coups de foudre est estimé. Un câble relié à la terre au-dessus des conducteurs des phases peut intercepter la plupart des coups de foudre, mais pas tous. Lors de coups de foudre à forte intensité de courant, il se peut que le câble de mise à la terre et les pylônes soient portés à un potentiel assez élevé pour qu'un arc saute d'un pylône sur une des phases.

Les décharges sur les lignes aériennes doivent être acceptées. Il en résulte une certaine limitation des surtensions qui se propagent en ondes mobiles le long des lignes et atteignent ainsi les installations des usines, des sous-stations et des stations de transformateurs. Dans ces installations, les jaillissements d'arcs et surtout les perforations d'isolations solides ou liquides doivent être évités. Pour cette raison, les isolations des installations sont munies de parafoudres qui limitent les surtensions à un niveau acceptable, dit niveau de protection. La construction et le fonctionnement de ces parafoudres sont expliqués.

Volle Kraft mit Partnerschaft



Wir wünschen Gesamtkatalog.

Firma: _____

Strasse: _____

Ort: _____

STZ
8603 Schwerzenbach. 01/825 13 13

biennaform

Spezialprofile

die Vielseitigen...



Vereinigte Drahtwerke AG

Neumarktstr. 33, 2501 Biel, Tel. 032 22 99 11