Die Isolationskoordination auf Freileitungen

Autor(en): **Vogelsanger, E.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **74 (1983)**

Heft 7

PDF erstellt am: **30.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904785

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Die Isolationskoordination auf Freileitungen

E. Vogelsanger

Es handelt sich um eine Einführung zur SEV-Publikation 3327-1z/1.1983: Koordination der Isolation; Hochspannungsfreileitungen. Der Aufsatz enthält Erläuterungen und für den Praktiker bestimmte Ergänzungen zu den neuen Bestimmungen.

Introduction à la Publication 3327-1z/1.1983 de l'ASE: Coordination de l'isolement; Lignes aériennes à haute tension. L'article donne des explications au sujet des nouvelles dispositions, ainsi que des compléments à l'intention des praticiens.

Adresse des Autors

E. Vogelsanger, Höhenstrasse 28, 8304 Wallisellen; ehemaliger Versuchsleiter der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH).

Der Aufsatz ist im Auftrag einer vom FK 28 des SEV eingesetzten Arbeitsgruppe entstanden. Deren Mitglieder waren: *M. Aguet* (EPFL), *J. Bucher* (Electricité Neuchâteloise SA), *D. Cramer* (Elektrizitätsgesellschaft Laufenburg AG), *Th. Heinemann* (Sprecher & Schuh AG), *D. Kraaij* (SEV, MP), *P. Mathis* (SBB), *A. Meier* (Nordostschweizerische Kraftwerke AG), *M. Pauling* (SBB), *P. Rutz* (Motor Columbus Ingenieurunternehmung AG), *H. Schäublin* (Aargauisches Elektrizitätswerk), *B. Staub*, Vorsitz (Porzellanfabrik Langenthal), *B. Stepinski* (BBC Brown, Boveri & Cie. AG), *E. Vogelsanger* (Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen, FKH) *H. J. Vorwerk* (Bernische Kraftwerke AG).

Einleitung

Mit den Koordinationsregeln SEV 3327-1.1979, SEV 3327-1z. 1979 und SEV 3327-2.1979 [1] hat der SEV mit einigen Zusatzbestimmungen die internationalen Regeln der CEI-Publikation 71-1 und 71-2 [2] übernommen. Diese Regeln behandeln alle elektrischen Hochspannungsinstallationen mit Ausnahme der Freileitungen. Die nun vorliegenden Zusatzbestimmungen SEV 3327-1z/1. 1983[1]) sollen diese Lücke schliessen und die veralteten «Leitsätze für die Koordination, Bemessung und Prüfung der Isolation von Hochspannungsfreileitungen», SEV 4002.1961 und .1964, ersetzen. Die letztgenannten Leitsätze haben sich allerdings nicht auf Koordinationsbestimmungen beschränkt. Sie enthielten auch Bestimmungen über Bemessung und Prüfung von Hochspannungsfreileitungen, Bestimmungen, die als Hilfe für nicht spezialisierte Praktiker gedacht waren, die aber in das Konzept der neuen Koordinationsregeln nicht hineinpassen. Im Rahmen der vorliegenden Einführung soll auf diese Punkte noch eingetreten werden. Damit wird einem Wunsch entsprochen, der anlässlich einer Umfrage geäussert wurde. Dabei können allerdings nicht alle Spezialfälle behandelt werden, die zum Teil besondere Probleme stellen (z. B. Leitungseinführung in SF_6-Anlagen).

1. Allgemeines

Es stellt sich die Frage, warum für die Freileitungen Ergänzungsregeln notwendig sind. Was unterscheidet die Isolation der Freileitungen von derjenigen anderer Hochspannungsanlagen wie Schaltanlagen, Kraft- und Unterwerke, die im folgenden generell als *Stationen* bezeichnet werden?

Die *Stationen* enthalten nebeneinander Apparate mit verschiedenartigen, zum Teil empfindlichen Isolationen (Luft, Gas Öl, Feststoffe) in räumlich beschränkter Ausdehnung. Die Überspannungen innerhalb dieser Anlagen werden in der Regel durch den Einbau von Überspannungsableitern soweit begrenzt, dass sie weder Isolationsschäden noch Betriebsstörungen verursachen.

Die *Freileitungen* dagegen besitzen eine Vielzahl einheitlicher, relativ robuster Isolatoren; die Anwendung von Überspannungsableitern kann aus ökonomischen Gründen nicht zur Diskussion stehen: wegen der räumlichen Distanz müsste jeder Mast mit eigenen Ableitern versehen sein. Die Überspannungen sind nur durch die Überschläge am Isolator selbst begrenzt; die Isolatoren müssen so ausgeführt sein, dass dabei keine Durchschläge durch den Isolatorkörper erfolgen. Durch die Lichtbogenschutzarmaturen wird der Überschlag möglichst von der Isolatoroberfläche ferngehalten, aber verhindert werden kann er nicht. Durch Überschläge verursachte Betriebsstörungen müssen durch Netzschutzmassnahmen (z. B. Selektivschutz, Kurzunterbrechung, Sternpunkt isoliert oder über Impedanzen geerdet) beherrscht werden.

Zusätzliche Gesichtspunkte ergeben sich beim Anschluss der Freileitungen an andere Netzteile (Stationen und Kabel oder Einzelapparate). Hier muss unter Umständen die Überspannungsbegrenzung auf der Freileitung noch einen Beitrag zum Schutz der Station leisten.

Im folgenden sollen zunächst die Belange der Leitung selbst, anschliessend diejenigen des Anschlusses anderer Netzteile besprochen werden.

[1]) Vgl. Ausschreibung auf S. 380 dieses Heftes.

2. Freileitung ohne Berücksichtigung der Stationsanschlüsse

Unter Berücksichtigung der gegebenen Netzkonzeption (Nennspannung, Kurzschlussstrom, Sternpunktbehandlung) sind im Zusammenhang mit der Isolationskoordination die folgenden Leitungsparameter zu betrachten:

- Isolationsniveau
- Isolatoren mit oder ohne Lichtbogenschutzarmaturen
- Art der Masten und Mastbild
- Masterdungen
- Erdseil
- Höhe über Meer der Leitung
- Leitungen mit Systemen unterschiedlicher Nennspannung auf den gleichen Masten

2.1 Wahl des Isolationsniveaus

Die Regeln sehen als genormte Haltespannungen diejenigen der Tabellen I...III der Publ. SEV 3327-1z.1979 vor, d. h. die gleichen Werte, wie sie auch für Stationsmaterial gelten. Einerseits liegen diese Werte so hoch, dass die durch Schalthandlungen bedingten inneren Überspannungen zu keinen Überschlägen führen – entweder weil sie von Natur aus nicht hoch genug sind, oder weil sie am Ort ihrer Entstehung, d. h. in der Schaltanlage, durch Überspannungsableiter begrenzt werden. Anderseits kann die Zahl der blitzbedingten Überschläge durch eine Isolationserhöhung in den meisten Fällen nicht so stark herabgesetzt werden, dass eine solche Massnahme wirtschaftlich gerechtfertigt wäre.

Letzteres hängt allerdings noch stark von der Nennspannung und anderen Leitungsparametern ab. Bei einer Leitung ohne Erdseil zum Beispiel werden die meisten Einschläge in ein Phasenseil erfolgen. Der Blitzstrom I_B kann als Wellenstrom nach beiden Seiten des Leiterseiles abfliessen, und auf diesem entsteht die Spannung $\hat{U} = \hat{I}_B \cdot Z_W/2$. Da der Wellenwiderstand Z_w eines Leiterseiles mit Erdrückleitung 400...450 Ω (bei Zweierbündeln 300...350 Ω) beträgt, bedeutet dies, dass schon ein bescheidener Blitzstrom von 10 kA eine Spannung von etwa 2000 kV ergibt. In Anbetracht der zu erwartenden Blitzstromstärken (siehe Fig. 1) wird somit auch eine hohe Leitungsisolation fast bei jedem Einschlag überschlagen.

Werden die Phasenseile durch ein Erdseil weitgehend abgeschirmt, so erfolgen die meisten Einschläge in dieses Seil oder die Masten. Die auftretenden

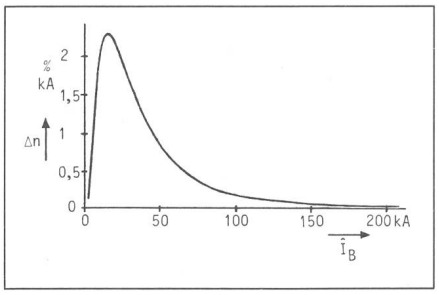

Fig. 1 Häufigkeitsverteilung der Blitzströme

Δn = Anteil von 100 Blitzschlägen, dessen Stromscheitelwerte in den Strombereich zwischen $\hat{I}_B$ und $\hat{I}_B$ + 1 kA fallen. Die Hälfte aller Blitzströme erreicht oder überschreitet 30 kA, und 1% erreicht oder überschreitet 200 kA.
Nach Berger [3], umgezeichnet aus der durch die Messpunkte gelegten Gauss-Verteilung des log $\hat{I}_B$.

Überschläge sind dann sog. Rücküberschläge, bedingt durch eine hohe am Mastkopf auftretende Spannung, wenn der Blitzstrom über Mastimpedanz und Erdungswiderstand abfliesst. Die Häufigkeit dieser Rücküberschläge kann unter anderem auch durch die Leitungsisolation beeinflusst werden; der Einfluss ist aber kaum so gross, dass sich deswegen eine teurere Isolation rechtfertigt (vgl. Abschnitt 2.4).

Ein spezieller Fall liegt bei Leitungen mit Nennspannungen unter 52 kV vor, da hier bei den der Tabelle I der Publ. SEV 3327-1z.1979 entsprechenden Haltespannungen auch sog. indirekte, von Blitzeinschlägen in die Umgebung der Leitung herrührende Blitzüberspannungen zu Störungen führen können. Diese Überspannungen erreichen Werte bis etwa 200 kV und sind naturgemäss wesentlich häufiger als die direkten Leitungseinschläge. Eine Erhöhung der Isolation auf eine Haltespannung von 250 kV – wie sie bereits in den bisherigen Leitsätzen SEV 4002 empfohlen wurde – kann solche Störungen ausschalten.

Ist eine Leitung von Natur aus höher isoliert (wie z. B. eine Leitung auf isolierenden Masten oder eine Leitung, deren Nennspannung später erhöht werden soll), so ist dies als vorteilhaft anzusehen, und es besteht kein Anlass, die Haltespannung durch Funkenstrecken künstlich herabzusetzen (mit Ausnahme vor Stationen, vgl. Abschnitt 3.1).

2.2 Isolatoren mit oder ohne Lichtbogenschutzarmaturen

Zweckmässig ausgebildete Lichtbogenschutzarmaturen müssen zwei Anforderungen erfüllen:

- Steuerung des elektrischen Feldes: Feldkonzentrationen sind möglichst zu verhindern, d. h. scharfe Kanten oder vorspringende Ecken im Feldraum sind zu vermeiden oder abzuschirmen (Koronaringe). Sie würden zu Glimmentladungen führen, die ihrerseits zu Störspannungsemissionen Anlass geben. Der Armaturenrand am Isolator (Kittstelle) soll vom Feld entlastet sein, da von ihm Gleitentladungen ausgehen können. Bezüglich der beiden Isolatorseiten soll das Feld möglichst symmetrisch sein, damit keine krassen Polaritätsunterschiede in der Überschlagsspannung auftreten.
- Lichtbögen und vor allem deren Ansatzpunkte sind von der Isolatoroberfläche und den Leiterseilen fernzuhalten. Diese Aufgabe ist in Höchstspannungsnetzen mit hohen Kurzschluss- und Erdschlussströmen besonders wichtig. Es werden dort speziell entwickelte Ringarmaturen verwendet. Bei isolierten und gelöschten Netzen ist zu beachten, dass Blitzeinschläge mit Rücküberschlägen zu dreiphasigen Kurzschlüssen führen können. Es ist also immer möglich, dass der dreiphasige Kurzschlussstrom und nicht nur der wesentlich kleinere Erdschlussstrom fliesst. Es kann aber bei diesen Leitungen wirtschaftlicher sein, hin und wieder einen defekten Isolator auszuwechseln, als alle Isolatoren mit Schutzarmaturen zu versehen.

Die Schutzarmatur kann mit einer (eventuell verstellbaren) Stabfunkenstrecke kombiniert sein. Oft genügt ein einfacher Stab auf der geerdeten Seite des Isolators. Eine Kugel mit genügend grossem Durchmesser am Ende des Stabes oder der Stäbe verhindert Glimmen unter Betriebsspannung, ohne die Ansprechspannung stark zu beeinflussen.

Eine Funkenstrecke, zum Beispiel vor dem Anschluss einer Station oder vor in den Leitungszug eingebauten Apparaturen, ist das einfachste Mittel, um eine grobe Reduktion der Spannung zu erreichen und grössere Blitzströme zur Erde abzuleiten. Da bei solchen Funkenstrecken die Ansprechspannung stark von der Elektrodenform und -anordnung abhängt, können keine Standard-Schlagweiten angegeben werden. Die Funkenstrecken müssen anhand von Messungen auf die gewünschte Ansprechspannung eingestellt werden.

2.3 Art der Masten und Mastbild

Besondere Erwähnung verdienen die isolierenden Maste. Als solche kommen zurzeit nur Holzstangen in Frage, die aus praktischen Gründen auf Nennspannungen unter 100 kV begrenzt sind. In Zukunft sind auch Kunststoffmaste denkbar. Holz ist,

auch wenn es nass ist, für Stossspannungen praktisch ein Isolator. Damit ergeben isolierende Maste von Natur aus eine hohe Isolation gegen Erde. Auch die Isolation zwischen den Phasen ist erhöht. Betrachtet man aber die beim Einschlag in ein Phasenseil auftretenden Spannungen, so scheinen Überschläge auf die anderen Phasenseile und damit dreiphasige Kurzschlüsse fast unvermeidlich.

Befinden sich im Zuge einer Holzstangenleitung einzelne Metall- oder Betonmaste, so empfehlen die Regeln, diese mit Isolatoren erhöhter Stossfestigkeit auszurüsten. Die Stossfestigkeit der Holzstangen kann damit natürlich nicht erreicht werden; im Hinblick auf die im Abschnitt 2.1 abgeschätzte Spannung ist an solchen Masten relativ häufig mit Überschlägen zu rechnen. In den im Verteilspannungsbereich meist mit isoliertem Sternpunkt betriebenen Netzen besteht dann auch eine erhöhte Gefahr für die Bildung von Dauererdschlüssen. Dem kann durch die verstärkte Isolation, möglichst in Kombination mit zweckmässigen Lichtbogenschutzarmaturen, entgegengewirkt werden.

2.4 Masterdungen

Bei Einschlägen in den Mast muss der Blitzstrom über den Erdungswiderstand des Mastes in die Erde fliessen. Der Spannungsabfall am Erdungswiderstand ergibt eine Spannung am Mastkopf, die zu sog. Rücküberschlägen, d. h. zu Überschlägen vom Mast auf die Phasenseile Anlass geben kann. Die Scheitelwerte der Blitzströme können in weiten Grenzen variieren. Aufgrund der von verschiedenen Autoren angegebenen Messresultate kann für Einschläge in Freileitungen etwa die in Figur 1 dargestellte Häufigkeitsverteilung angenommen werden. Etwa 85% aller Ströme liegen danach zwischen 10 und 100 kA. Am Erdungswiderstand R_E entsteht ein entsprechender Spannungsabfall. Man sieht, dass bei einem Erdungswiderstand von 3,5 Ω bereits die Haltespannung einer 60-kV-Leitung, bei 11 Ω diejenige einer 220-kV-Leitung überschritten wird. Für die Häufigkeit von Rücküberschlägen ist somit der Erdungswiderstand der Masten von ausschlaggebender Bedeutung.

Allerdings ist der ohmsche Spannungsabfall an der Erdung nur eine Komponente der Mastkopfspannung. Hinzu kommt der induktive Spannungsabfall am Mast selber. Dieser

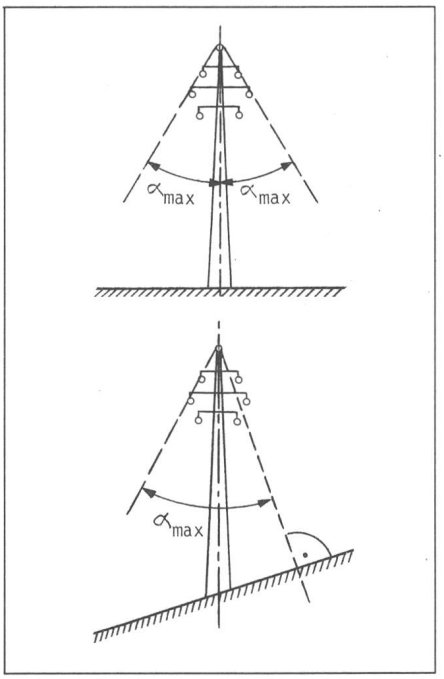

Fig. 2 Definition des Erdseil-Schutzwinkels α
α_{max} ist der Schutzwinkel für das am stärksten exponierte Leiterseil.

kann kurze Spannungsspitzen von ebenfalls etwa 100...1000 kV erzeugen. Da er sich praktisch nicht beeinflussen lässt, soll er hier nicht näher untersucht werden. Ohmsche und induktive Komponente treten nie gleichzeitig in voller Stärke auf. Besonders steile Fronten, die zu hohen Induktionsspannungen führen, treten nur in den Folgeblitzen von Mehrfachblitzen auf, die bezüglich Stromstärke eher bescheiden sind.

Masterdungen haben auch eine wichtige Funktion im Personenschutz. Sie müssen die bei einem Erdschluss auftretenden Berührungsspannungen und Schrittspannungen am Mast und in dessen Umgebung begrenzen. Nach dem heute in Kraft stehenden Revisionsentwurf des Abschnittes «Erdung» der Starkstromverordnung [4] gilt diese Anforderung aber nur für «besiedeltes Gebiet, wo grössere Menschenansammlungen zu erwarten sind oder wo sich über längere Zeit Personen aufhalten».

2.5 Erdseil

Ein Erdseil kann den Grossteil der Einschläge von den Phasenseilen fernhalten. Die Wirksamkeit hängt von der Leiteranordnung ab. Es wird ein Schutzwinkel α gemäss Figur 2 definiert. Je kleiner der Schutzwinkel, um so weniger Blitze treffen ein Phasenseil. Bei breiten Leitungen mit Portalmasten sind eventuell zwei Erdseile nötig, damit ein genügend kleiner Schutzwinkel erreicht wird. Aber auch beim Schutzwinkel null können noch einzelne Blitze ein Phasenseil treffen. Bei praktischen Anordnungen mit $\alpha \leqq 30°$ rechnet man mit einer Reduktion der Phasenseileinschläge auf wenige Prozente [5]. Gesicherte Zahlen liegen aber nicht vor.

Die Schutzwirkung des Erdseiles wird praktisch aufgehoben, wenn Rücküberschläge auftreten. Auch beim Einschlag ins Erdseil fliesst der grösste Teil des Blitzstromes über die nächstgelegenen Maste, und nur ein kleiner Anteil wird über das Erdseil weiter verteilt. Es treten damit gleichartige Erscheinungen auf, wie sie unter 2.4 betrachtet wurden.

Durch die kapazitive Kopplung zwischen Erdseil und Phasenseil wird allerdings ein Teil der am Mastkopf auftretenden Spannung auch auf die Phasenseile übertragen und damit die Spannung am Isolator reduziert. Bei den am weitesten vom Erdseil entfernten Phasen macht dies jedoch nur 20...30% aus und hat somit keine entscheidende Bedeutung.

Als Blitzschutz hat damit das Erdseil nur dann eine Berechtigung, wenn die Erdungswiderstände der Maste so tief liegen und das Isolationsniveau so hoch ist, dass bei einem Grossteil der auftretenden Blitzströme die für Rücküberschläge erforderliche Spannung nicht erreicht wird.

Die Bedeutung des Erdseiles liegt allerdings nicht alleine beim Blitzschutz. Bei einem Erdschluss auf der Leitung kann das Erdseil den (betriebsfrequenten) Erdschlussstrom auf mehrere Maste verteilen und so mithelfen, Berührungs- und Schrittspannungen an den Masten innerhalb der zulässigen Grenzen zu halten. In Netzen mit wirksamer Systemerdung kann es (genügenden Querschnitt vorausgesetzt) einen Teil des Erdschlussstromes führen und damit den Strom in der Erde und dessen allfällge Störwirkungen auf PTT-Leitungen verringern. Es reduziert auch die Nullimpedanz der Leitung und kann damit den Selektivschutz erleichtern.

2.6 Höhe über Meer der Leitung

In grösseren Höhenlagen nimmt mit der Luftdichte auch die Durchschlagsfestigkeit der Luft ab. Bei Höhenlagen über 1000 m ü. M. ist dies zu berücksichtigen. Die auf normale Luftdichte

bezogene Haltespannung der Isolatoren ist dazu um einen Faktor zu erhöhen, welcher der Figur 1 der Publ. SEV 3327-1z/1 entnommen werden kann. Eine Leitung, die verschiedene Höhenlagen durchläuft, wird man im allgemeinen mit einheitlichen Isolatoren ausrüsten (Lagerhaltung). In den tieferen Lagen ist die Isolation dann überdimensioniert, was jedoch kein Nachteil ist, die Forderungen von Abschnitt 3.1 vorbehalten. Es kann aber auch sinnvoll sein, zwei verschiedene Isolatortypen zu verwenden, besonders dann, wenn die Leitungsabschnitte in höheren Lagen relativ kurz sind oder bemerkenswerte Höhenunterschiede vorliegen.

2.7 Leitungen mit Systemen unterschiedlicher Nennspannungen oder unterschiedlicher Frequenz auf einem Mast.

Für die Isolation zwischen den beiden Systemen ist in Art. 2.5 der neuen Zusatzbestimmungen eine eigene Haltespannung festgelegt. Sie geht von der der höheren Bemessungsspannung[2]) zugeordneten Haltespannung aus und berücksichtigt den Umstand, dass die Spannung gegenüber der anderen Leitung um den Scheitelwert von deren Bemessungsspannung (Phasenspannung) grösser sein kann als die Spannung gegen Erde. Blitzbedingte Überschläge werden dadurch nicht ausgeschlossen und lassen sich auch durch eine wesentlich erhöhte Isolation nicht ausschliessen. Aus der Praxis sind auch Störungen bekannt, die auf solche Überschläge zurückzuführen sind. Besonders wenn die Betriebsspannungen beider Systeme weit auseinander liegen, kann ein Spannungsübertritt im Netz mit der tieferen Betriebsspannung schwerwiegende Schäden verursachen. Die Kombination von Leitungen mit weit auseinanderliegenden Betriebsspannungen auf den gleichen Masten ist daher möglichst zu vermeiden. Aufgrund der Vorschriften ist sie aber zulässig, und in Ausnahmefällen dürfen sogar Niederspannungsleitungen (nicht aber PTT-Leitungen) mit Hochspannungsleitungen zusammen auf den gleichen Masten verlegt werden.

[2]) Entsprechend CEI 50(151) [6] bzw. DIN 40200 [7] wird zwischen *Nennwert* (valeur nominale) und *Bemessungswert* (valeur assignée) unterschieden.

3. Anschluss der Freileitung an andere Netzteile

3.1 Allgemeine Gesichtspunkte

Werden Stationen, Kabel oder andere an die Freileitung angeschlossene Netzteile durch Überspannungsableiter geschützt, so müssen diese die von der Freileitung herkommenden Blitzüberspannungen – die hier ausschliesslich betrachtet werden müssen – auf die zulässigen Grenzwerte absenken und dabei Ströme führen, mit denen sie unter Umständen überlastet sind. Es ist zu überprüfen, wie weit dies der Fall ist und ob deswegen spannungsbegrenzende Massnahmen auf der Leitung angezeigt sind.

Der Nennableitstrom üblicher Ableiter beträgt 5000 oder 10 000 A; Konstruktionen für höhere Werte sind wirtschaftlich kaum gerechtfertigt. Wird dieser Ableitstrom überschritten, so ist das Schutzniveau des Ableiters nicht mehr gewährleistet. In extremen Fällen kann dieser auch zerstört werden. Es interessiert deshalb, wie gross die Ströme sein können.

Geht man von einem weit entfernten Blitzschlag aus, so erhält man auf der Leitung eine Wanderwelle, deren Spannung U_l der Haltespannung der Leitung entspricht, und deren Strom I_l durch den Wellenwiderstand Z_w der Leitung begrenzt ist. ($I_l = U_l/Z_w$), wobei $Z_w \approx 400\ \Omega$ bei Einfachleitern und $Z_w \approx 300\ \Omega$ bei Zweierbündeln zu setzen ist. Läuft die Welle auf einen Ableiter mit der Restspannung U_p, so wird sie dort teilweise reflektiert (Fig. 3), und im Ableiter ergibt sich der Strom

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

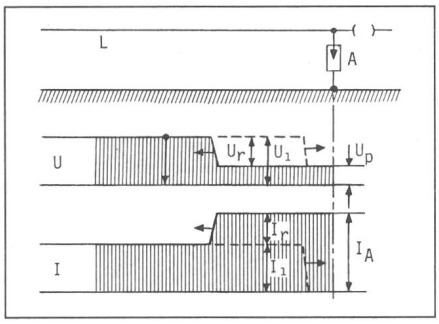

Fig. 3 Wellenreflexion am Überspannungsableiter

L Leitung
A Ableiter
U Spannungsverlauf
I Stromverlauf
U_l, I_l Zulaufende Welle
U_r, I_r Reflektierte Welle
U_p Ableiter-Restspannung
I_A Ableiterstrom
Z_W Wellenwiderstand der Leitung
Es ist: $I_A = I_l + I_r = U_l/Z_w + U_r/Z_w = (2U_l - U_p)/Z_w$

Entspricht die Leitungsisolation den Tabellenwerten, und beträgt die Restspannung des Ableiters etwa 70% dieser Werte, so ergeben sich bei Netzspannungen von 8...420 kV Ableiterströme von etwa 250...6000 A, die dem Ableiter keine Schwierigkeiten machen.

Etwas anders kann es aussehen, wenn eine Leitung kleiner Nennspannung auf Holzmasten montiert ist, deren Haltespannung etwa 3000 kV betragen dürfte. Die obigen Formeln ergeben dann einen Wellenstrom von etwa 7,5 kA, und da die Ableiterrestspannung viel kleiner ist als die Wellenspannung, wird der Ableiterstrom praktisch gleich dem doppelten Wellenstrom, d. h. ≈ 15 kA. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass bei den hohen Blitzüberspannungen Überschläge zwischen den Phasen auftreten und so die drei Phasenseile parallelgeschaltet werden. Diese verhalten sich wie ein Bündelleiter mit etwa 200 Ω Wellenwiderstand. In den drei Leitern zusammen ergibt dies einen Wellenstrom von etwa 15 kA und pro Ableiter einen Ableitstrom von etwa 10 kA. Ein 5-kA-Ableiter ist damit überlastet, und seine Restspannung kann den Bemessungswert überschreiten. Da aber die Bemessungsrestspannung der Ableiter meist noch unter dem für die Koordination zulässigen Maximalwert liegt, ist dies im allgemeinen nicht gefährlich.

Durch eine spannungsbegrenzende Massnahme auf der Leitung kann man die Überlastung vermeiden. Dazu braucht es jedoch eine Funkenstrecke mit sehr guter Erdung (Erdungswiderstand wenige Ohm) an einem Mast in einiger Distanz vor dem Stationsanschluss. Die Ansprechspannung der Funkenstrecke soll den Tabellenwert (Publ. SEV 3327-1z.1979) für die der Betriebsspannung entsprechende Haltespannung nicht wesentlich überschreiten; wenn die Isolatorarmaturen auf der Holzstange geerdet werden, ergibt die Überschlagsstrecke die passende Funkenstrecke. Der Erdungswiderstand muss die Stromdifferenz zwischen dem doppelten Wellenstrom und dem zulässigen Ableiterstrom führen können, ohne dass der dabei auftretende Spannungsabfall die Ableiterrestspannung wesentlich übersteigt.

Als Beispiel sei eine 16-kV-Leitung betrachtet; die Ableiter sollen einen Nennableitstrom von 5 kA und eine Restspannung von 60 kV aufweisen. Dürfen die drei Ableiter zusammen nicht mehr als 15 kA übernehmen, um die Bemessungsrestspannung einhalten zu können, so müssen von den 30 kA des doppelten Wellenstromes noch 15 kA über den Erdungswiderstand der Funkenstrecke fliessen. Damit dabei die Ableiterrestspannung von 60 kV nicht überschritten wird, soll der Erdungswiderstand möglichst nicht mehr als 4 Ω betragen. Der zweckmässigste Abstand von der Station dürfte bei 200...300 m liegen. Viel kleiner sollte er nicht sein, damit die Spannungsbegrenzung durch den Ableiter nicht das Ansprechen der Funkenstrecke verhindert.

Die bisherigen Betrachtungen haben sich nur auf ferne Blitzeinschläge bezogen. Bei nahen Blitzeinschlägen kann eine Überspannungswelle während der Blitzdauer mehrmals zwischen Einschlagstelle und Ableiter hin- und herlaufen und dabei sukzessive mehr Strom auf den Ableiter übertragen. Allerdings nur, wenn die Spannung an der Einschlagsstelle die Ableiterrestspannung wesentlich übersteigt. Kann der Blitzstrom nach einem Überschlag an einem Mast in der Nähe der Einschlagsstelle oder im Bereich zwischen dieser und dem Ableiter zur Erde abfliessen, ohne dass der Spannungsabfall die Ableiterrestspannung erreicht, so ist der Ableiter ganz entlastet. Bei hohen Nennspannungen ist dies fast automatisch der Fall. Die Grenze dürfte etwa bei der Nennspannung 110 kV liegen. Die Ableiterrestspannung beträgt dort etwa 350...400 kV. An einem Masterdungswiderstand von 10 Ω können dann nur noch Blitzströme von über 35 kA, an 5 Ω nur noch solche von über 70 kA, zu Spannungen führen, die diese Restspannung übersteigen.

Bei tieferen Nennspannungen wird der Schutz gegen nahe Blitzeinschläge problematisch, da er unrealistisch tiefe Erdungswiderstände erfordert. Zugleich kommt man aber hier in den Bereich der Verteilspannungen, wo Störungen und Defekte leichter zu verkraften sind als bei den Übertragungsspannungen.

Aufgrund der Blitzhäufigkeit in der Nordschweiz von 3...4 Erdblitzen pro km² pro Jahr (Tessin 5...6) ist mit 10...20 Leitungseinschlägen pro 100 km Leitung und Jahr zu rechnen. Die Störungsstatistik des VSE [8] ergibt ähnliche Werte (1979: 7...8 Gewitterstörungen pro 100 km bei 10...50-kV-Leitungen). Auf dem letzten km vor einem Stationsanschluss ist also höchstens mit einem Einschlag in 5...10 Jahren zu rechnen. Teure Massnahmen auf der Leitung sind deswegen kaum zu rechtfertigen.

Will man das Möglichste zur Reduktion der Auswirkungen naher Blitzschläge tun, so seien immerhin die folgenden Massnahmen für einige Spannweiten vor der Station genannt:

- Kleine Erdungswiderstände an den Masten. Eventuell Verbinden der Masterdungen unter sich und mit der Stationserdung durch ein im Boden verlegtes Erdungsband.
- Isolatoren, deren Haltespannung die Tabellenwerte möglichst wenig überschreitet (bei Holzstangen, Erden der Isolatorarmaturen).

Natürlich können hier nur allgemeine Prinzipien genannt werden, spezielle Lösungen für den Einzelfall sind dabei nicht berücksichtigt.

3.2 Kabel im Zuge einer Leitung oder zwischen Leitung und Station

Kabeldurchschläge ergeben unangenehme Störungen und aufwendige Reparaturen. Kabel werden daher wie Stationsmaterial behandelt und durch Ableiter geschützt, die unmittelbar neben dem Endverschluss angeordnet sind.

Führt das Kabel in eine Station und ist es länger als etwa 20 m, so ist innerhalb dieser Station ein weiterer Ableiter (bzw. Ableitersatz) zum Schutze des Stationsmaterials notwendig. Die Welle, die in das Kabel eindringt, wird nämlich an dessen Ende reflektiert, was nahezu eine Spannungsverdoppelung mit sich bringt. Die Spannung in der Station könnte damit vorübergehend (für die doppelte Laufzeit der Welle auf dem Kabel, aber mit Wiederholungen, wenn die Welle mehrmals hin- und herläuft) den doppelten Wert der Ableiterrestspannung am Kabeleingang erreichen. Das muss durch den geforderten zusätzlichen Ableiter verhindert werden. Nur wenn man damit rechnen kann, dass die Frontdauer die Welle bis zum Ansprechen des Ableiters wesentlich länger ist als die Wellenlaufzeit auf dem Kabel (bei Kabellängen $\gtrsim$ 20 m ist dies der Fall), bringt die Wellenreflexion keine gefährliche Spannungserhöhung, und es kann dann auf einen der beiden Ableiter verzichtet werden.

Kabel haben einen wesentlich kleineren Wellenwiderstand als Freileitungen ($Z_{wK} \approx 25...30\ \Omega$ gegenüber $Z_{wL} \approx 400...450\ \Omega$ bei Freileitungen). Für Wanderwellen ist daher der Übergang Freileitung–Kabel eine Reflexionsstelle. Hat die auf der Freileitung zulaufende Welle die Spannung U_1 (Fig. 4), so hat die in das Kabel eindringende Welle nur noch die Spannung

$$U_2 = \frac{2 Z_{wK} \cdot U_1}{Z_{wL} + Z_{wK}},$$

also etwa $\frac{1}{8}\ U_1$. Nur sehr hohe Spannungswellen, wie sie bei hoch isolierten Leitungen (Holzstangen) oder bei nahen Blitzschlägen möglich sind, werden somit den Ableiter am Kabeleingang schon beim ersten Wellendurchgang zum Ansprechen bringen. Durch Hin- und Herreflexionen auf dem Kabel wird aber die Spannung aufgeschaukelt und kann, sofern kein Ableiter anspricht, nahezu den Wert U_1 erreichen, oder sogar $2U_1$, wenn das Kabel in eine Kopfstation oder zu einem offenen Trenner führt.

3.3 Kabel, die direkt in einen Transformator eingeführt sind

Es gibt Fälle, wo der Transformator, meist der wichtigste Teil der Station, nicht unmittelbar durch Ableiter geschützt werden kann. Dies ist dann der

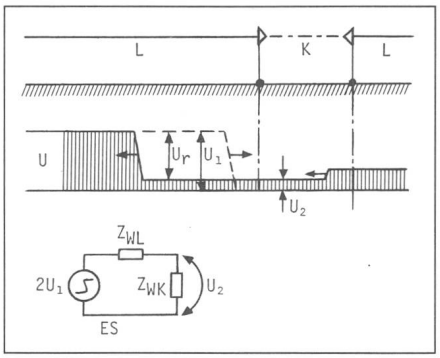

Fig. 4 Wellenbrechung am Übergang Freileitung–Kabel

L Freileitung
K Kabel
U Spannungsverlauf
ES Ersatzschema für den Übergang Freileitung–Kabel
U_1 Zulaufende Welle
U_r Reflektierte Welle
U_2 In das Kabel einlaufende Welle
Z_{WL} Wellenwiderstand der Freileitung
Z_{WK} Wellenwiderstand des Kabels

Es ist: $U_2 = 2U_1 \dfrac{Z_{WK}}{Z_{WL} + Z_{WK}}$

(Zur Vereinfachung der Darstellung wurden die Wellengeschwindigkeiten auf Freileitung und Kabel gleichgesetzt)

Fall, wenn das Kabel direkt in den Ölraum des Transformators eingeführt ist. Bei Kabellängen über etwa 20 m besteht in solchen Fällen immer ein erhöhtes Risiko für den Transformator.

Muss die Spannung am Transformator auf das Schutzniveau U_S begrenzt werden, so darf die Spannung der einlaufenden Welle höchstens $U_S/2$ betragen, damit die bei der ersten Reflexion verdoppelte Spannung den Transformator nicht gefährden wird. Betrachtet man auch die folgenden Hin- und Herreflexionen (Fig. 5), so zeigt sich, dass die Wellenspannung höchstens $U_S/5$ erreichen darf, wenn das Schutzniveau des Ableiters höchstens 85% des für den Transformator zulässigen Wertes U_S beträgt, bzw. $U_S/3$, wenn es höchstens 75% von U_S beträgt. Da die Wellenspannung beim Übergang Freileitung–Kabel auf etwa ⅛ abgesenkt wird, darf sie auf der Freileitung 1,6 U_S bzw. 2,7 U_S betragen. Nimmt man als Beispiel einen 16-kV-Transformator, der ein Schutzniveau von 75 kV erfordert, und einen Ableiter, der ein solches von 55 kV gewährleisten kann, so darf die Wellenspannung auf der Leitung $8/3 \cdot U_S = 200$ kV betragen. Ist die Leitung gemäss Tabelle (Publ. SEV 3327-1z.1979) mit einer Haltespannung von 95 kV isoliert, so sind aus Distanz zulaufende Wellen wesentlich unter die gefährliche Spannung abgesenkt. Ist die Leitung höher isoliert oder gar eine Holzstangenleitung, so muss an einem Mast die Haltespannung abgesenkt bzw. eine Funkenstrecke eingebaut werden. Die Masterdung muss dann gewährleisten, dass beim abfliessenden Strom die 200 kV nicht überschritten werden. Bei der Holzstangenleitung mit 3000 kV Wellenspannung zum Beispiel, und unter der Annahme, dass die Spannungswelle auf allen drei Phasen zuläuft (vgl. Abschnitt 3.1), ergibt sich ein Strom von etwa 30 kA; der Erdungswiderstand darf somit höchstens 6,5 Ω betragen. Untersuchungen zu diesem Problem sind beispielsweise in [9; 10] zu finden.

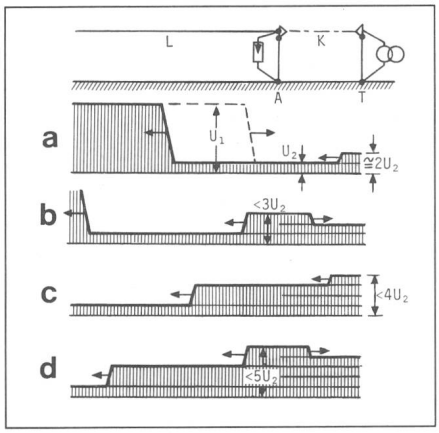

Fig. 5 Spannungsaufschaukelung an einem direkt in einen Transformator eingeführten Kabel

L	Freileitung
K	Kabel
A	Kabelanfang mit Überspannungsableiter
T	Kabelende am Transformator (Wellenwiderstand der Wicklung als ∞ angenommen)
a...d	Vorgang der Spannungsaufschaukelung infolge Wellenreflexionen bei T und A
U_1	Auf der Freileitung zulaufende Welle
U_2	In das Kabel einlaufende Welle

Wenn beim Übergang von a zu b der Ableiter bei A anspricht, so wird der Aufschaukelungsvorgang unterbrochen; die Spannung am Transformator wird kaum grösser als 3 U_2. Spricht der Ableiter erst beim Übergang von c zu d an, so wird die Spannung am Transformator kaum höher als 5 U_2.

3.4 Kabel mit einseitig geerdetem Mantel

Im Betrieb geben Mantelströme zu zusätzlicher Erwärmung der Kabel Anlass und reduzieren damit den zulässigen Betriebsstrom. Die Mäntel kurzer Kabel werden daher häufig nur einseitig geerdet.

Für Wanderwellen verhalten sich Kabel mit nicht beidseitig geerdeten Mänteln wie zwei unabhängige Wellenleitungen. Für die Welle zwischen Innenleiter und Mantel beträgt der Wellenwiderstand ≈ 25...30 Ω, für die Welle zwischen Mantel und Erde ≈ 400 Ω. Am Kabelanfang ohne Mantelerdung sind die beiden Wellenwiderstände in Reihe geschaltet. Wird dort eine Spannung zwischen Innenleiter und Erde angelegt, so verteilt sie sich den Widerständen entsprechend; etwa 9/10 der Spannung liegen zwischen Mantel und Erde. Ähnliche Verhältnisse können sich an einem Kabelende ohne Mantelerdung ergeben, wenn eine über das Kabel laufende Welle dort reflektiert wird. Die Mantelisolation ist für solche Spannungen nicht bemessen, so dass ein Überschlag zwischen Mantel und Erde erfolgt. Da dieser Überschlag nur kurzzeitig Wellenstrom führt, schenkt man ihm oft keine Beachtung.

Es ist aber zu empfehlen, Schutzfunkenstrecken oder Ableiter zwischen das offene Ende des Mantels und Erde zu schalten, welche den Mantel beim Auftreffen von Wanderwellen kurzzeitig erden. Man hält damit die Spannung innerhalb festgelegter Grenzen und verhindert Überschläge an unkontrollierbaren Stellen. Die Ansprechspannung dieser Elemente – beim Ableiter auch die Löschspannung – soll höher liegen als die betriebsfrequente Spannung, die beim grösstmöglichen Kurzschlussstrom an dieser Stelle auftritt.

3.5 Mastschalter

Mastschalter sind grundsätzlich gleich zu behandeln wie in Stationen untergebrachte Schaltapparate, d. h. wie Stationsmaterial. Auch dort verschieben sich aber die Massstäbe, wenn nur geringe Sachwerte und Betriebsinteressen auf dem Spiel stehen. Die Isolatoren der Mastschalter haben in elektrischer Hinsicht denjenigen der Leitung zu entsprechen, will man nicht in Kauf nehmen, dass an dieser Stelle vermehrt Überschläge auftreten. Ableiter müssen aber nicht gefordert werden. In vielen Fällen werden Mastschalter als Stationsschalter verwendet und einem in die Station führenden Kabel vorgeschaltet. Mastschalter und Kabelendverschluss können dann auf dem gleichen Mast angeordnet sein, und der zum Schutze des Kabels notwendige Ableiter schützt auch den Mastschalter, wenigstens solange dieser geschlossen ist.

Mastschalter kombinieren die Funktionen von Last- und Trennschaltern. Für Trennschalter wird allgemein eine Isolationsabstufung zwischen der offenen Trennstrecke und Isolation gegen Erde verlangt, so dass Überschläge stets gegen Erde und nie über die offene Trennstrecke erfolgen. Ist der Mastschalter auf einem leitenden Masten montiert, so muss auch er diese Anforderungen erfüllen. Nötigenfalls ist dazu die Isolation gegen Erde durch Funkenstrecken oder sogar durch Ableiter zu begrenzen. Für Mastschalter auf Holzstangen wird dagegen (im Gegensatz zu der bisher in Publ. SEV 4002.1961/64 festgelegten Regelung) eine Ausnahme gemacht, damit die erhöhte Isolation gegen Erde wenigstens teilweise beibehalten werden kann. Das Gestell des Mastschalters muss dann nicht geerdet werden.

Mastschalter brauchen stets Bedienungseinrichtungen. Dem Schutz des bedienenden Personals gegen Berührungsspannungen bei Erdschlüssen ist daher grösste Aufmerksamkeit zu schenken. Die Schutzbestimmungen sind im Revisionsentwurf der Erdungskommission zur Starkstromverordnung, Dokument Nr. 75/30 [4] festgelegt. In den Erläuterungen dazu

(Dokument Nr. 75/31) [11] sind die Mastschalter ausführlich behandelt und Beispiele für die Ausbildung der Erdung und des Bedienungsstandplatzes angegeben. Einige der angegebenen Lösungen schliessen gewisse Risiken allerdings nicht ganz aus. Die Bedienung des Schalters während eines Gewitters ist dann möglichst zu vermeiden.

4. Prüfungen

4.1 Allgemeines

Prüfungen sind im allgemeinen nur dann erforderlich, wenn neuartige Anordnungen zur Anwendung kommen sollen. Leitungstypen, die bereits in allgemeinen Regeln festgelegt sind (Regelleitungen) oder bei denen man über gute Betriebserfahrungen verfügt, müssen für den Bau neuer Leitungen nicht erneut geprüft werden, es sei denn, man wolle sie auf die Möglichkeit allfälliger Isolationseinsparungen untersuchen.

Auch die Spannungsprüfung zwischen zwei Systemen verschiedener Nennspannungen ist nicht erforderlich, wenn deren Abstand so gross ist, dass die erforderliche Haltespannung schon aufgrund der allgemeinen Unterlagen über Haltespannungen in Funktion der Schlagweite mit Sicherheit feststeht.

Die Prüfung ganzer Mastköpfe ist nur dann gerechtfertigt, wenn zu erwarten ist, dass die Überschlagsspannung einer Phase durch die Anordnung der anderen Phasen wesentlich beeinflusst werden kann. Im allgemeinen ist der Isolator mit seinen Lichtbogenschutzarmaturen die dielektrisch schwächste Stelle, und die Isolatoranordnungen der drei Phasen sind identisch. Es genügt dann, diese Isolatoranordnung einmal aufzubauen und daran die Prüfung vorzunehmen.

Ergeben sich an einzelnen Masten wegen Leiterschlaufen, Phasenauskreuzungen oder Leiterabgängen andere – eventuell ungünstigere – Anordnungen, so sind auch diese nachzubilden und zu prüfen.

4.2 Aufbau und Anordnung der Prüfobjekte

Es ist zu beachten, dass alle Teile, die das elektrische Feld im kritischen Raum beeinflussen, einen wesentlichen Einfluss auf die Überschlagsspannung haben können. Befestigungs- und Lichtbogenarmaturen, Koronaringe und eventuelle angebaute Stabfunkenstrecken sollen daher der Originalausführung entsprechen. Andere Metallteile können dimensionsmässig im Modell nachgebildet sein. Die Spannungszuführung soll an einem Ende des Leiterseiles angeschlossen sein. Weitere Einzelheiten sind in der Publ. CEI 383(1976) [12] festgelegt. Eine mögliche Schrägstellung des Isolators durch Seilzug oder Wind kann sich nachteilig auswirken, wenn sie eine Annäherung der spannungsführenden Teile an den Mast oder andere geerdete Konstruktionsteile ergibt. Ihr Einfluss ist daher zu überprüfen. Die Höhe der Anordnung über Boden ist, wenn möglich, einigermassen einzuhalten.

Werden Prüfungen an ganzen Mastköpfen oder ihren Nachbildungen durchgeführt, so ist jede Phase für sich zu prüfen. Die Prüfspannung wird also jeweils nur an einem Phasenleiter angelegt, während die anderen geerdet sind. Die Erdung der letzteren kann über einen dem Isolator entlanggezogenen Draht erfolgen.

Soll die Haltespannung zwischen Systemen verschiedener Nennspannungen geprüft werden, so soll von jeder Leitung nur derjenige Leiter mit Isolator und Armaturen nachgebildet werden, der der anderen Leitung am nächsten kommt. Der Leiter mit der tieferen Nennspannung wird dann geerdet und die Prüfspannung am Leiter der höheren Nennspannung angelegt. Der Isolator dieser Leitung muss soweit verlängert werden, dass er der erhöhten Prüfspannung auch standhält. Wo die Prüfeinrichtung dies zulässt, kann auch ein sog. Biastest durchgeführt werden. Dabei wird an den Leiter der niedrigeren Nennspannung die seinem System entsprechende Bemessungsphasenspannung $U_{rat}/\sqrt{3}$ angelegt und die auf den Leiter mit der höheren Nennspannung zu gebende Stossspannung auf den entgegengesetzten Scheitelwert derselben synchronisiert. Die Stossspannung muss dann nur noch dem Normwert entsprechen, und ein verlängerter Isolator ist nicht notwendig.

4.3 Art der Prüfungen

Für die Freileitungsisolationen sind die gleichen Prüfungen vorgesehen wie für Stationsmaterial (Publ. SEV 3327 – 1.1979). Dies bedeutet, dass bei Spannungen bis und mit 245 kV die Blitzstosshaltespannung und die 50-Hz-Haltespannung, bei 420 kV die Blitzstosshaltespannung und die Schaltstosshaltespannung zu kontrollieren sind. Prüfungen mit Blitzstoss sind nur trocken, Prüfungen mit Betriebsfrequenz oder Schaltstoss dagegen sowohl trocken als auch unter Regen auszuführen.

Die Prüfung mit Schaltstossspannung bei Nennspannungen von 380 kV an aufwärts wurde eingeführt, weil Elektrodenanordnungen mit grossen Schlagweiten bei dieser Beanspruchungsart ein Minimum der Überschlagsspannung aufweisen. Die Bemessungshaltespannung ist gemäss Tabelle III von Publ. SEV 3327–1z.1979 für Blitzstossspannungen höher als für Schaltstossspannungen. Die Begründung liegt darin, dass die Spannungsbegrenzung durch einen Ableiter bei den langsamen Schaltstossspannungen in der ganzen Schaltanlage gewährleistet wird, bei den schnellen Blitzstossspannungen dagegen mit zunehmender Distanz vom Ableiter immer unsicherer wird. Obwohl bei den Freileitungen diese Begründung nicht stichhaltig ist, wurde es als zweckmässig befunden, die Werte der Stationsisolation auch hier beizubehalten.

Der Nachweis der Stosshaltespannung (sowohl beim Blitzstoss als auch beim Schaltstoss) kann durch zwei verschiedene Versuche erfolgen:

- 15 Stösse der Bemessungshaltespannung werden auf das Prüfobjekt gegeben; davon dürfen höchstens 2 zu einem Überschlag führen.
- Die 50%-Stossüberschlagsspannung wird gemessen und daraus durch Division mit 1,041 bei Blitzstössen und 1,085 bei Schaltstössen die Haltespannung berechnet. Die angegegebenen Divisoren ergeben sich aus der statistischen Standardabweichung σ mit dem Ausdruck $1/(1-1{,}3\,\sigma)$, wobei $\sigma = 0{,}03$ für Blitzstösse und $\sigma = 0{,}06$ für Schaltstösse angenommen ist.

Es ist klar, dass diese Prüfvorschriften andere Resultate ergäben, wenn anstelle eines einzelnen Isolators ein ganzer Leitungsabschnitt mit vielen parallel geschalteten Isolatoren geprüft würde. Die 50%-Überschlagsspannung des einzelnen Isolators, zum Beispiel, muss bei einer Vielzahl gleichzeitig beanspruchter Isolatoren an etwa 50% derselben zu einem Überschlag führen; bei parallelgeschalteten Isolatoren kann allerdings immer nur derjenige überschlagen, der seine Entladung am schnellsten aufgebaut hat, da er mit seinem Überschlag den andern Isolatoren die Spannung wegnimmt. Die 50%-Überschlagsspannung des einzelnen Isolators ist somit eine 100%-Überschlagsspannung für

die ganze Leitung. Es sei daher ausdrücklich festgehalten, dass die genannten Prüfvorschriften für eine einzelne Schwachstelle, d. h. einen einzelnen Isolator oder Mastkopf gelten und nicht für einen ganzen Leitungsabschnitt. Das entspricht der Prüfung von Stationsmaterial, bei der auch nur einzelne Isolatoren, Apparate oder vorfabrizierte Schaltzellen geprüft werden und nicht ganze Anlagen.

4.4 Schutzfunkenstrecken

Bei Funkenstrecken mit stark inhomogenem Feld (z. B. Stabfunkenstrecken) hängt die Ansprechspannung stark von der Steilheit der Spannungswelle ab. Das Schutzverhalten der Funkenstrecke kann daher nur mit der Ansprechcharakteristik erfasst werden, d. h. die Ansprechspannung muss mit verschiedenen Frontsteilheiten als Funktion der Ansprechzeit ermittelt werden. Wird die Funkenstrecke dazu eingesetzt, den Überschlag von einem Isolator fernzuhalten, so können Funkenstrecke und Isolator gemeinsam geprüft werden. Die Stossspannung wird bei gleichbleibender Wellenform bis auf ein Mehrfaches der 100%-Ansprechspannung gesteigert, und der Überschlag soll dabei stets an der Funkenstrecke erfolgen. Der Versuch muss mit beiden Stosspolaritäten durchgeführt werden, da das Verhalten sowohl des Isolators wie auch der Funkenstrecke stark polaritätsabhängig sein kann. Will man wissen, welche Sicherheitsmarge in der Koordination zwischen Isolator und Funkenstrecke existiert, müssen die Überschlagscharakteristiken der beiden Elemente getrennt aufgenommen werden.

Wird die Funkenstrecke gemäss Abschnitt 3.1 als grobe Spannungsbegrenzung auf der Leitung vor deren Anschluss an einen anderen Netzteil eingesetzt, so genügt es, die 100%- und 0%-Ansprechspannung mit Blitzstoss zu ermitteln.

Literatur

[1a] Coordination de l'isolement. Première partie: Termes, définitions, principes et règles. Publication de l'ASE 3327-1.1979 (SNV 413327-1).

[1b] Koordination der Isolation. Teil 1: Begriffe, Definitionen, Grundlagen und Richtlinien. Zusatzbestimmungen zur Publikation 71-1 (6. Auflage, 1976) der CEI. Publikation des SEV 3327-1.1979z (SNV 413327-1z).

[1c] Coordination de l'isolement. Deuxième partie: Guide d'application. Publication de l'ASE 3327-2.1979 (SNV 413327-2).

[2a] Coordination de l'isolement. Première partie: Termes, définitions, principes et règles. Sixième édition. Publication de la CEI 71-1, 1976.

[2b] Coordination de l'isolement. Deuxième partie: Guide d'application. Deuxième édition. Publication de la CEI 71-2, 1976.

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

[4] Schutz gegen gefährliche Berührungs- und Schrittspannung. Verfasst durch die Erdungskommission des SEV. Dokument Erd.-K. Nr. 75/30. Zürich, SEV, 1975.

[5] *H. Baatz:* Überspannungen in Energieversorgungsnetzen. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer-Verlag, 1956.

[6] Vocabulaire Electrotechnique International. Chapitre 151: Dispositifs électriques et magnétiques. Publication de la CEI 50(151), 1978.

[7] Nennwert, Grenzwert, Bemessungswert, Bemessungsdaten. Begriffe. DIN 40200.

[8] Schweizerische Störungsstatistik VSE 1979. Statistik über Nichtverfügbarkeit, Störungen und Schäden elektrischer Netze. Zürich, VSE, 1980.

[9] *U. Burger:* Überspannungsableiter und Funkenstrecke als Schutz von Transformatoren mit direkt eingeführtem Kabel. Bull. SEV 57(1966)26, S. 1211...1220.

[10] *M. Christoffel:* Der Einfluss von Kabelstrecken auf die Überspannungsvorgänge in Übertragungssystemen mittlerer und hoher Spannung. Brown Boveri Mitt. 51(1964)6, S. 369...376.

[11] Schutz gegen gefährliche Berührungs- und Schrittspannung. Beispiele und Erläuterungen. Verfasst durch die Erdungskommission des SEV. Dokument Erd.-K. Nr. 75/31, 1977. Zürich, SEV, 1975.

[12] Essais des isolateurs en matière céramique ou en verre destinés aux lignes aériennes de tensions nominales supérieures à 1000 V. Deuxième édition. Publication de la CEI 383, 1976.