

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 48 (1957)
Heft: 10

Artikel: Die Koordination der Isolation in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen : Einführung zur 2. Auflage der Regeln und Leitsätze des SEV
Autor: Wanger, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1058673>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 25.12.2024

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

zung eines grossen Transformators ein Modell herzustellen und zu prüfen. Im In- und Ausland ist eine eigentliche Modelltechnik entstanden, und wir werden durch *J. Froideveaux*²⁾ darüber einen Überblick erhalten.

Zum Schluss wird *E. Scherb*²⁾ den Einfluss der Koordination auf die Hochspannungsapparate und die Messwandler erläutern.

Adresse des Autors:
H. Puppikofer, Direktor der Maschinenfabrik Oerlikon,
Zürich 11/50.

Die Koordination der Isolation in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen

Einführung zur 2. Auflage der Regeln und Leitsätze des SEV¹⁾

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV am 7. März 1957 in Bern,
von *W. Wanger*, Baden

621.316.93 : 621.31.048

Der Autor, Präsident des Fachkollegiums 28 des Schweizerischen Elektrotechnischen Komitees (CES), erläutert die Grundsätze, auf denen die Regeln und Leitsätze des SEV für die Koordination der Isolation in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen basieren, und zeigt die wesentlichen Unterschiede zwischen der ersten und der zweiten Auflage dieser Regeln.

L'auteur, qui est le président du Comité Technique 28 du Comité Electrotechnique Suisse (CES), expose les principes qui ont servi de base aux Règles et recommandations de l'ASE pour la coordination de l'isolement des installations à courant alternatif à haute tension. Il indique ensuite les différences essentielles entre la première édition de ces Règles et la deuxième.

Einleitung

Der Programmausschuss des SEV hat den Verfasser beauftragt, bei der Inkraftsetzung der zweiten Auflage der Regeln und Leitsätze für die Koordination der Isolation in Wechselstrom-Hochspannungsanlagen einen Überblick über die Probleme der Isolationskoordination zu geben. Es kann sich selbstverständlich nicht darum handeln, ausführlich oder gar mit einer gewissen Vollständigkeit über den Inhalt dieser Regeln und Leitsätze zu referieren; dafür sind sie viel zu umfangreich. Es soll vielmehr versucht werden, die nicht sehr leichte Materie durch die Erläuterung der wesentlichen Grundsätze und deren gegenseitiger Verkettung verständlicher zu machen, wobei vor allem auch die Unterschiede zwischen den alten und den neuen Regeln gezeigt werden.

Eine Revision der aus dem Jahre 1948 stammenden Regeln des SEV für die Koordination der Isolation wurde nötig, als die Commission Electrotechnique Internationale (CEI) 1954 ihre «Directives pour la coordination de l'isolement» (Publ. 71) herausgab. Da der SEV wenn immer möglich die Empfehlungen der CEI in seinen Regeln berücksichtigt, mussten die bisherigen Regeln des SEV für die Koordination der Isolation entsprechend den Directives pour la coordination de l'isolement der CEI umgearbeitet werden. Den Entschluss dazu fasste das Fachkollegium (FK) 28 des CES schon Ende 1954. Trotz sehr speditiver Arbeit dauerte es rund zwei Jahre, bis die neuen Regeln in Kraft gesetzt werden konnten; dies nicht zuletzt deshalb, weil sich neben dem FK 28 noch eine grosse Zahl anderer Fachkollegien mit Isolationsfragen des Hochspannungsmaterials befassen und darum begrüst werden mussten. Unter diesen Umständen darf man wohl zufrieden sein, dass der ganze Instanzenweg in rund zwei Jahren zurückgelegt und die neuen Regeln jetzt in Kraft gesetzt werden konnten.

Das Prinzip der Koordination

Das Prinzip der Koordination wird unverändert wie folgt definiert: Unter Koordination der Isolation einer elektrischen Anlage versteht man die Gesamtheit der Massnahmen, die ergriffen werden, um in dieser Anlage Durchschläge infolge von Überspannungen zu verhindern und Überschläge, soweit sie mit wirtschaftlich tragbaren Mitteln nicht verhindert werden können, auf Stellen zu beschränken, an denen sie keinen oder nur geringen Schaden anrichten und den Betrieb nicht oder nicht wesentlich stören.

Den Ausgangspunkt für die Isolationskoordination bilden also die Überspannungen. Es soll jedoch nicht alles wiederholt werden, was bei der Herausgabe der ersten Auflage der Koordinationsregeln des SEV über die Überspannungen ausgeführt wurde³⁾. Wir begnügen uns hier mit einer kurzen Übersicht.

Überspannungen und Isolationsfestigkeit des Materials

Die Regeln des SEV über genormte Werte der Spannungen, Frequenzen und Ströme für elektrische Netze (Publ. Nr. 159) geben für jeden genormten Wert der Nennspannung an, welche Betriebsspannung im ungestörten Dauerbetrieb höchstens zulässig ist. Jede vorübergehende Spannung, die diesen zulässigen Höchstwert übersteigt, ist als Spannungserhöhung oder Überspannung zu betrachten.

Da gibt es nun zunächst die kurzzeitigen betriebsfrequenten Spannungserhöhungen bei der Abschaltung von Wirk- oder Blindlast, besonders ausgeprägt im Zusammenhang mit langen Leitungen, sowie die betriebsfrequenten Spannungserhöhungen der gesunden Pole bei ein- oder zweipoligen Erdschlüssen, insbesondere in Netzen mit nicht wirksam geredetem Sternpunkt, wie z. B. in Löschspulennetzen. Es ist klar, dass in all diesen Fällen weder Überschläge noch Durchschläge vorkommen dürfen. Das

¹⁾ Der Vortrag wird in einer späteren Nummer des Bulletins veröffentlicht.

³⁾ Siehe Bull. SEV Bd. 38(1947), Nr. 26, S. 847...862.

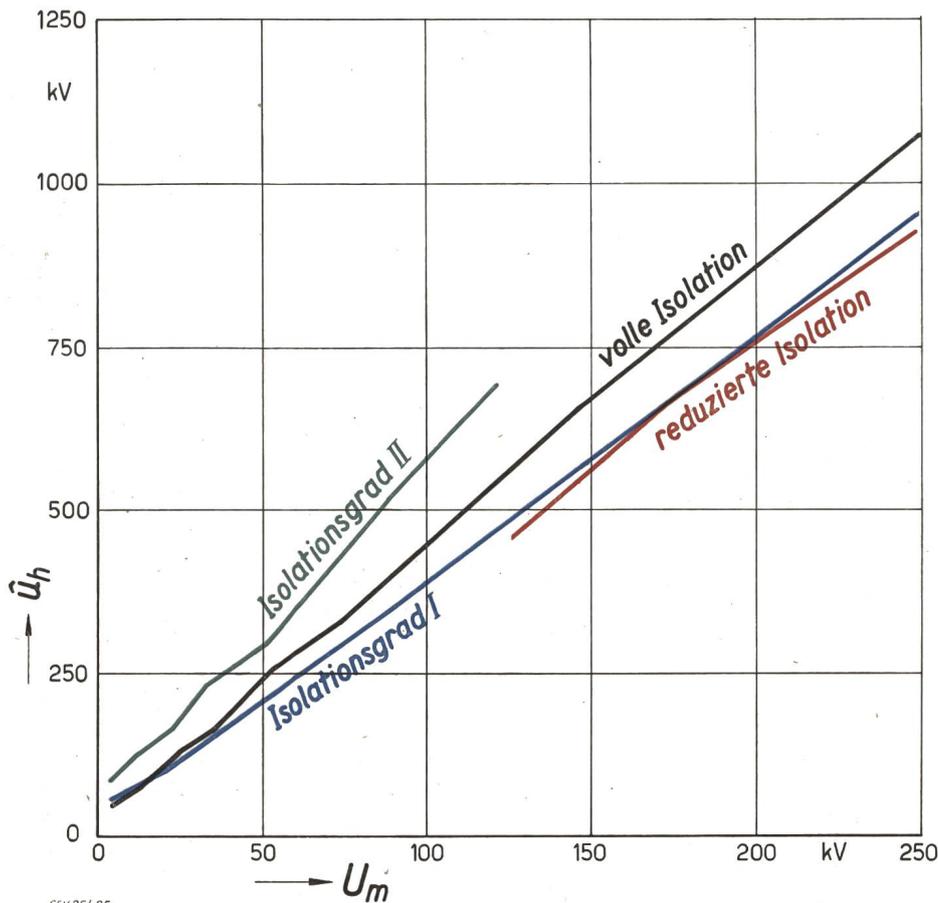


Fig. 1
Stosshaltespannung \hat{u}_h der inneren Isolation (Transformatoren) bei Vollwellen (1|50) in Funktion der höchsten Betriebsspannung U_m

Für die äussere Isolation gelten nach den neuen Regeln des SEV (Kurven «volle Isolation» und «reduzierte Isolation») die gleichen Werte der Stosshaltespannung. Bei den alten Regeln des SEV (Kurven «Isolationsgrad I» und «Isolationsgrad II») ist dagegen die Stosshaltespannung der äusseren Isolation etwas kleiner als die der inneren Isolation

Material muss genügend hoch isoliert sein, um diese Spannungserhöhungen mit Sicherheit auszuhalten. Der Nachweis kann erbracht werden durch die Spannungsprüfungen bei Industriefrequenz, da es sich ja bei all diesen Spannungserhöhungen um rein betriebsfrequente Vorgänge handelt.

Bei den eigentlichen Überspannungen muss man unterscheiden zwischen den atmosphärischen Überspannungen einerseits und den Schalt- und Erdschlussüberspannungen andererseits. Die erste Gruppe bezeichnet man auch als äussere, die zweite als innere Überspannungen, weil die atmosphärischen Überspannungen von aussen in die Netze hineinkommen, während die Schalt- und Erdschlussüberspannungen in den Netzen selber entstehen. Die Grösse der äusseren Überspannungen hängt nicht von der Höhe der Betriebsspannung ab, während andererseits die inneren Überspannungen sehr eng damit zusammenhängen.

Die atmosphärischen Überspannungen sind typische Stoßspannungen, d. h. unipolare Spannungstösse von sehr kurzer Dauer, in der Grössenordnung von einigen wenigen bis etwa hundert Mikroskunden. Die Schalt- und Erdschlussüberspannungen sind dagegen meist mittelfrequente, gedämpfte

Schwingungen. Die Isolationsfestigkeit des Materials gegen atmosphärische Überspannungen wird durch eine Stoßspannungsprüfung nachgewiesen. Dagegen ist es nicht üblich, Abnahmeprüfungen mit mittelfrequenten, gedämpften Spannungsschwingungen, die der Beanspruchung durch Schalt- oder Erdschlussüberspannungen entsprechen würden, durchzuführen. Man nimmt an, dass das Hochspannungsmaterial durch solche Spannungsformen eine Beanspruchung erfährt, die zwischen den Beanspruchungen drin liegt, denen das Material einerseits bei der industriefrequenten Spannungsprüfung, andererseits bei der Stoßspannungsprüfung ausgesetzt ist, und begnügt sich mit der Durchführung dieser beiden Prüfungen mit den extremen Spannungsformen.

Das Material wird grundsätzlich so hoch isoliert, dass die Schalt- und Erdschlussüberspannungen weder Durchschläge noch Überschläge verursachen. Gewisse Ausnahmen, wo man Entladungen in Überspannungsableitern zulässt, sollen später behandelt werden. Dagegen ist man bei den atmosphärischen Überspannungen ganz allgemein genötigt, gewisse Entladungen in den Anlagen in Kauf zu nehmen. Es ist nur zu gut bekannt, dass Blitzeinschläge in

Freileitungen auch durch Erdseile nicht vollständig verhindert werden können und dass die Freileitungen bei solchen direkten Blitzschlägen überschlagen, ebenso, dass auch bei Blitzschlägen in Erdseile gelegentlich Rücküberschläge auf die Leitungen erfolgen. Aber auch die Stationen lassen sich aus wirtschaftlichen Gründen nicht so hoch isolieren, dass alle atmosphärischen Überspannungen ohne Entladungen ausgehalten werden.

Wenn man dafür sorgt, dass die Stationen nicht durch direkte Blitzschläge getroffen werden, so sind die in die Stationen einlaufenden atmosphärischen Überspannungen durch die Isolationsfestigkeit der angeschlossenen Freileitungen begrenzt. Häufig ist aber die Isolation einer solchen Freileitung höher als diejenige des Stationsmaterials; ganz besonders trifft das bei Holzmastenleitungen zu. Dazu kommen dann noch die Reflexionen in der Station, wodurch die Überspannungen im ungünstigsten Fall bis auf etwa den doppelten Wert der einlaufenden Wanderwellen erhöht werden können. Man sieht also leicht ein, dass das Problem durch blosser Erhöhung der Isolationsfestigkeit des Stationsmaterials nicht in wirtschaftlicher Weise gelöst werden kann.

Isolationsabstufung in den Stationen

Den Ausweg hat man gefunden in der Verwendung von schwachen Stellen, an denen sich die atmosphärischen Überspannungen entladen können, bevor sie eine Höhe erreichen, die die Isolation des Stationsmaterials gefährdet. Als solche schwachen Stellen, die die atmosphärischen Überspannungen in den Stationen begrenzen, dienen vornehmlich Überspannungsableiter, in gewissen Fällen auch Funkenstrecken.

Damit sind wir nun bei der Isolationsabstufung angelangt, und es soll gleich betont werden, dass diese Abstufung nur für atmosphärische Überspannungen, d. h. mit anderen Worten für Stoßspannungen vorgesehen ist. Bei industriefrequenter Spannung wird lediglich verlangt, dass sämtliches Material einen bestimmten Spannungswert aushält, ohne dass Überschläge oder Durchschläge vorkommen; bei Stoßspannung ist ausserdem noch eine Abstufung zwischen verschiedenen Teilen einer Anlage vorgesehen.

Bei der Durchführung dieser Isolationsabstufung besteht nun ein grundsätzlicher Unterschied zwischen den alten und den neuen Regeln des SEV. Die alten Regeln sahen eine doppelte Abstufung vor, derart, dass die sog. innere Isolation höher war als die äussere und diese ihrerseits höher als das Schutzniveau. Es ergaben sich auf diese Art drei verschiedene Niveaus. Die innere Isolation, das höchste Niveau, umfasste alle festen und flüssigen Isolationen sowie die geöffneten Unterbrechungsstellen von Trennern und Schaltern und die Luftdistanzen zwischen verschiedenen Polleitern. Zur äusseren Isolation und somit zum mittleren Niveau gehörte im wesentlichen die Luftisolation inklusive Isolatoroberflächen zwischen Polleitern und Erde. Das tiefste oder Schutzniveau wurde durch Über-

spannungsableiter oder Schutzfunkenstrecken dargestellt.

Die CEI hat die Isolationsabstufung dadurch vereinfacht, dass sie die innere und die äussere Isolation in ein einziges Niveau zusammenfasst. Es wird also vorgeschrieben, dass alles Stationsmaterial mit Ausnahme der Ableiter und Schutzfunkenstrecken einen bestimmten Stoßspannungswert, die sog. Stosshaltespannung, ohne Überschlag und Durchschlag aushalten muss. Die Abstufung gegen das Schutzniveau, d. h. gegen die Ableiter oder Schutzfunkenstrecken, wird dann dadurch sichergestellt, dass die Ansprech- und die Restspannung dieser Überspannungsschutzapparate unterhalb eines bestimmten Wertes bleiben müssen, der natürlich kleiner ist als die Stosshaltespannung des Materials. Die Isolationsabstufung der CEI kennt also nur zwei Niveaus, ein Isolationsniveau und ein Schutzniveau.

Jede der beiden Methoden der Isolationsabstufung, die mit drei und die mit zwei Niveaus, hat gewisse Vor- und Nachteile, und es ist weitgehend eine Ermessensfrage, welcher man den Vorzug gibt. Da sich die CEI in ihren Koordinationsregeln, an deren Ausarbeitung ja auch die schweizerische Delegation beteiligt war, für die Methode mit zwei Niveaus entschieden hat, übernahm das FK 28 für die neuen Regeln des SEV grundsätzlich ebenfalls diese Methode.

Äusserlich zeigt sich diese Änderung vor allem darin, dass für das Hochspannungsmaterial nicht mehr wie bisher die 50-%-Überschlagstoßspannung, sondern die Stosshaltespannung vorgeschrieben wird. Bisher war nämlich die Isolationsfestigkeit der äusseren Isolation, die sich zweckmässig durch eine 50-%-Überschlagstoßspannung charakterisieren lässt, zahlenmässig festgelegt, und die innere Isolation musste in vorgeschriebener Weise dagegen abgestuft werden. In Zukunft wird nun für die innere und äussere Isolation die gleiche Mindestfestigkeit verlangt, und da die innere Isolation unmöglich durch eine Überschlagspannung charakterisiert werden kann, muss man zwangsläufig für das Hochspannungsmaterial die Stosshaltespannung vorschreiben.

Zusätzliche Funkenstrecken

Nachdem wir festgestellt haben, dass die neuen Regeln des SEV im Prinzip die Isolationsabstufung mit zwei Niveaus vorsehen, muss noch erwähnt werden, dass eine gewisse Abweichung von diesem Grundsatz möglich ist. Das FK 28 hat es nämlich nach einigem Zögern schliesslich als zweckmässig erachtet, im Gegensatz zur CEI die Möglichkeit vorzusehen, dass neben Überspannungsableitern auch noch Funkenstrecken verwendet werden, deren Ansprechstoßspannung irgendwo zwischen der Anspruchstoßspannung der Ableiter und der Stosshaltespannung des Materials liegt. Solche zusätzlichen Funkenstrecken stellen jedoch kein eigentliches mittleres Niveau dar; denn der in den Regeln vorgesehene Abstand zwischen Isolations- und Schutzniveau gestattet nicht, ein drittes Niveau mit zuverlässiger Abstufung dazwischen zu schieben.

Die Zukunft wird nun zeigen, wie weit solche zusätzlichen Funkenstrecken in der Praxis tatsächlich verwendet werden. Zum mindesten in einem Fall scheinen sie unerlässlich, nämlich in Verbindung mit Trennern. Während die CEI diese Frage bisher noch nicht behandelt hat, verlangen die Regeln des SEV (sowohl die alten, als auch die neuen), dass an Trennern höchstens ein Überschlag nach Erde, mit Sicherheit aber kein Überschlag über die offene Trennstrecke vorkommt. Die Regeln des SEV schreiben daher für die geöffneten Trennstrecken von Trennern eine wesentlich höhere Stosshaltespannung vor als für das übrige Material. Diese erhöhte Stossfestigkeit der Trennstrecke kann aber die gewünschte Abstufung nicht sicherstellen, wenn nicht ausserdem die Stossfestigkeit gegen Erde irgendwie begrenzt wird. Zu diesem Zwecke dienen nun eben die Funkenstrecken auf beiden Seiten der Trenner.

Abstufung für positive und negative Stösse

Zur Frage der Isolationsabstufung bleibt noch zu erwähnen, dass diese Abstufung für positive und negative Stösse richtig sein muss. Bei einer Abstufung mit nur zwei Niveaus ist diese Forderung leicht einzuhalten. Es ist lediglich zu beachten, dass die Stosshaltespannung des Materials bei beiden Polaritäten den vorgeschriebenen Mindestwert erreichen muss und dass die Rest- und die Ansprechspannung der Überspannungsableiter und Schutzfunkenstrecken bei beiden Polaritäten die zulässigen Höchstwerte nicht überschreiten dürfen. Etwas heikler ist die Einstellung von zusätzlichen Funkenstrecken, da deren Stossansprechspannung bei beiden Polaritäten nicht grösser als die Stosshaltespannung des Materials, gleichzeitig aber auch nicht kleiner als die Stossansprechspannung der Ableiter sein darf. Hier kommt man nur zum Ziel, wenn man durch konstruktive Massnahmen dafür sorgt, dass die Stossansprechspannung bei beiden Polaritäten möglichst gleich gross ist.

Absolutwerte der Stosshaltespannung

Wenn man Ableiter als Überspannungsschutz verwendet, so wird die erforderliche Stossfestigkeit des Materials durch die technischen Möglichkeiten dieser Überspannungsschutzapparate festgelegt. Die Ableiter müssen nach einem Ansprechen und nach Ableiten der in der Überspannungswelle vorhandenen Energie mit Sicherheit löschen, d. h. die vorübergehend zwischen spannungsführendem Leiter und Erde hergestellte Verbindung wieder unterbrechen. Das können sie aber nur, wenn ihre Ansprech- und Restspannung nicht zu niedrig ist. Je höher unter sonst gleichen Umständen die an einem Ableiter vorkommende maximale Betriebspannung ist, um so höher muss auch seine Ansprech- und Restspannung sein, um ein sicheres Löschen zu gewährleisten.

Damit ist der tiefst mögliche Wert des Schutzniveaus (Rest- und Ansprechspannung der Ableiter) in Abhängigkeit von der Betriebspannung festgelegt. Die Stosshaltespannung des Materials muss dann noch etwas höher sein mit Rücksicht auf die

unvermeidlichen räumlichen Abstände zwischen Ableiter und zu schützendem Material sowie auf die Schwankungen der Überschlagspannung bei wechselnder Luftdichte oder in verschiedener Höhenlage. Natürlich ist weder der tiefst mögliche Wert des Schutzniveaus noch die notwendige Marge zwischen Schutzniveau und Stosshaltespannung eine wirklich exakt bestimmbar Grösse, so dass auch der mindestens erforderliche Wert der Stosshaltespannung nicht mit wissenschaftlicher Genauigkeit angegeben werden kann.

Verwendet man als Überspannungsschutz nur Funkenstrecken, so löschen diese nach einem Ansprechen in der Regel nicht von selber. Die tiefst mögliche Ansprechspannung wird also im Gegensatz zu Ableitern nicht durch eine Löschbedingung festgelegt. Weil aber in der Regel Funkenstrecken nicht von selber löschen und daher nach einem Ansprechen gewisse Anlageteile abgeschaltet werden müssen, dürfen solche Funkenstrecken nicht zu häufig ansprechen; diese Forderung führt nun dazu, dass die Stossansprechspannung einen gewissen Wert nicht unterschreiten darf. Auch hier muss dann die Stosshaltespannung des Materials — aus den gleichen Gründen wie vorhin — noch etwas höher sein.

Wie hoch nun bei einer bestimmten Betriebspannung die Ansprechspannung mindestens sein muss, damit die Schutzfunkenstrecken «nicht zu häufig» ansprechen, lässt sich natürlich noch weniger genau bestimmen als die tiefst mögliche Ansprech- und Restspannung der Ableiter. Man muss ja hier vorwiegend auf Betriebserfahrungen abstellen. Interessanterweise findet man aber, dass in Stationen ohne Ableiter meistens Material mit ungefähr gleicher Stosshaltespannung verwendet wird wie in entsprechenden Stationen mit Ableitern. Eine grundsätzliche Ausnahme bilden nur die Anlagen mit reduzierter Isolation, auf die wir später zu sprechen kommen. Im übrigen kann man aber sehr wohl die Stosshaltespannung des Stationsmaterials vorschreiben, ohne Unterschiede mit Rücksicht auf die Art des Überspannungsschutzes zu machen. Wenn in einer Station ohne Ableiter, die entsprechend SEV oder CEI isoliert ist, zu häufige Überschläge vorkommen, so wird man eher nachträglich Überspannungsableiter einbauen als die Isolation verstärken.

Man kann also sagen, dass die notwendige Stosshaltespannung des Stationsmaterials aus Überlegungen im Zusammenhang mit den Ableitern gefunden werden kann und dass dann die gleichen Werte der Stosshaltespannung auch in Stationen ohne Ableiter angewendet werden dürfen. Das war so bei den alten Regeln des SEV und ist auch so bei den Empfehlungen der CEI.

Nach den vorherigen Ausführungen ist es jedoch nicht verwunderlich, dass die in den Regeln des SEV bzw. Empfehlungen der CEI geforderten Werte der Stossfestigkeit nicht genau übereinstimmen. Die Stossfestigkeiten nach CEI sind bei den meisten Betriebspannungen merklich höher als diejenigen des Isolationsgrades I, d. h. der Mindestisolation der alten Regeln des SEV. Man könnte es

bedauern, in Anlehnung an CEI die Isolationsforderungen zu erhöhen, wenn die früheren Vorschriften eigentlich genügt haben. Tatsächlich hat sich aber die Mehrzahl der grossen schweizerischen Elektrizitätswerke nicht mit dem Isolationsgrad I begnügt, und daher hat man seinerzeit in den Regeln des SEV für Betriebsspannungen bis 127 kV daneben noch zur freien Wahl den Isolationsgrad II eingeführt. Die Stosshaltespannung des Isolationsgrades II der alten Regeln des SEV ist aber bei allen Betriebsspannungen mindestens so hoch wie nach CEI, zum Teil sogar ziemlich höher.

Daraus ersieht man, dass die CEI-Werte wohl etwas höher sind als das absolut notwendige Minimum, aber doch nicht so hoch, dass sich ihre Einführung wirtschaftlich nicht verantworten liesse. Bei Betriebsspannungen über 100 kV lassen die Empfehlungen der CEI ausserdem unter bestimmten Bedingungen die reduzierte Isolation zu, deren Stosshaltespannung eher etwas niedriger ist als diejenige der alten Regeln des SEV. Bei dieser Situation erachtete es das FK 28 als zweckmässig, die Stosshaltespannungen der CEI für die neuen Regeln des SEV in vollem Umfang zu übernehmen. Es hatte viele Jahre gedauert, bis man sich in der CEI auf gemeinsame Werte einigen konnte; nachdem das schliesslich (mit Ausnahme der USA und von Kanada) gelungen ist, wollen wir nicht abseits stehen. — Mit der Einführung der CEI-Werte besteht nun natürlich kein Grund mehr, in unseren Regeln zwischen einem Isolationsgrad I und II zu unterscheiden.

Werte des Schutzniveaus

Die «Directives pour la coordination de l'isolement» der CEI enthalten keine Bestimmungen über Überspannungsableiter. Dagegen hat die CEI besondere Empfehlungen für Ableiter aufgestellt, die vor kurzem den Ländern nach der Sechsmonateregeln zur Genehmigung vorgelegt wurden [Dokument 37(Bureau Central)3]. Die dortigen Grenzwerte der Rest- und Stossansprechspannung sind im allgemeinen wesentlich höher als die der alten Regeln des SEV. Das FK 28 und das für die Ableiter zuständige FK 37 waren jedoch der Meinung, man könne ruhig an die Ableiter etwas schärfere Anforderungen stellen als die CEI, und so wurden die Grenzwerte in den neuen Koordinationsregeln des SEV für die meisten Betriebsspannungen etwas tiefer angesetzt als in den Ableiterempfehlungen der CEI. Dadurch wird die Marge zwischen der Stosshaltespannung des Materials und dem Schutzniveau grösser und der Überspannungsschutz sicherer.

In Übereinstimmung mit den Empfehlungen der CEI wird nun die 100-%-Ansprechstoßspannung, d. h. die Spannung, bei der ein Ableiter jedesmal anspricht, vorgeschrieben, während früher die 50-%-Ansprechstoßspannung festgelegt war. Diese Neuerung sowie die Festlegung der Stoßhaltespannung an Stelle der 50-%-Überschlagstoßspannung beim Material wirken ebenfalls im Sinne einer Vergrösserung der Marge zwischen Isolations- und Schutzniveau.

Die Ableiterregeln des SEV enthalten noch die alten SEV-Werte. In Zukunft gelten nun die in den neuen Koordinationsregeln des SEV niedergelegten Werte; die Ableiterregeln werden entsprechend anzupassen sein. Das dafür zuständige FK 37 hat den Beschluss zur Revision der Ableiterregeln bereits gefasst.

Die Schutzfunkenstrecken sind von der CEI noch nicht behandelt worden. In den Regeln des SEV wurden bisher für die Stossansprechspannung der Schutzfunkenstrecken die gleichen Grenzwerte vorgeschrieben wie für die Stossansprechspannung der Ableiter, eine Regelung, die auch für die neuen Regeln des SEV übernommen wurde. Da die Stossansprechcharakteristik der Funkenstrecken viel ungünstiger ist als die der Ableiter, hätte man zwar ein Interesse, bei Funkenstrecken eine tiefere Ansprechspannung einzustellen, um eine grössere Marge gegenüber der Stosshaltespannung des Materials zu bekommen. Andererseits sollen aber die Funkenstrecken, weil sie in der Regel nicht von selber löschen, möglichst selten ansprechen und daher eine hohe Ansprechspannung haben. Die beiden widersprechenden Forderungen lassen sich nicht gleichzeitig erfüllen, und man muss sich notgedrungen damit abfinden, dass Funkenstrecken einen wesentlich schlechteren Schutz gegen Überspannungen bieten als Ableiter. Insbesondere können Transformatoren nicht durch Funkenstrecken gegen hohe, steile Spannungsstöße geschützt werden.

Werte der industriefrequenten Prüfspannung

Nachdem gezeigt wurde, wie die Stoßspannungswerte in den neuen Koordinationsregeln des SEV festgelegt worden sind, soll noch kurz erwähnt werden, dass die Spannungswerte für die industriefrequenten Prüfungen ausnahmslos von den Empfehlungen der CEI übernommen wurden. Die Prüfspannung für Öltransformatoren und andere Isolationen in Öl ist dadurch bei den meisten Betriebsspannungen ein bisschen höher geworden als bisher. Die Einminuten-Prüfspannung der Hochspannungsapparate und der Isolatoren ist dagegen durchwegs etwas kleiner als bis jetzt. Das will jedoch nicht heissen, dass dieses Material schwächer isoliert sei als vorher; denn für die Bemessung der Isolation ist in den meisten Fällen die vorgeschriebene Stosshaltespannung massgebend.

Volle und reduzierte Isolation

Eine wichtige Neuerung, die aus den Empfehlungen der CEI in die neuen Regeln des SEV übernommen wurde, ist die Unterscheidung zwischen voller und reduzierter Isolation. Zwar boten schon die alten Koordinationsregeln des SEV gewisse Möglichkeiten, bei Leistungstransformatoren mit dauernd geerdetem Sternpunkt eine reduzierte Isolation zu verwenden; eine klare Regelung dieser Frage für alles Hochspannungsmaterial bringen jedoch erst die neuen Koordinationsregeln.

Diese unterscheiden nicht mehr zwischen direkt geerdetem und isoliertem Sternpunkt der Transformatoren, sondern zwischen wirksam und nicht wirk-

sam geerdetem Nullpunkt der Netze. Es genügt nämlich nicht, die Sternpunkte von ein paar beliebigen Transformatoren zu erden, um eine wirksame Erdung des ganzen Netzes zu erzielen. Was man mit der Nullpunkterdung erreichen will, ist, während eines einpoligen Erdschlusses die betriebsfrequente Spannung zwischen gesunden Polen und Erde möglichst klein zu halten. In einem Netz mit Löschspulen oder mit isoliertem Nullpunkt ist diese Spannung im wesentlichen gleich der vollen verketteten Spannung; bei idealer Nullpunkterdung wäre sie dagegen nur gleich der Phasenspannung, d. h. $\frac{1}{\sqrt{3}}$ mal kleiner. Dieser Idealfall lässt sich jedoch in der Praxis nicht erreichen. Nach den Koordinationsregeln gilt der Nullpunkt eines Netzes dann als wirksam geerdet, wenn während eines ein- oder zweipoligen Erdschlusses die höchste betriebsfrequente Spannung zwischen der oder den gesunden Polen und Erde höchstens 80% der höchsten verketteten Spannung erreicht.

Diese Spannungen gegen Erde lassen sich mit der Methode der symmetrischen Komponenten berechnen. Bekanntlich kann man jedes unsymmetrische dreiphasige Strom- oder Spannungssystem in drei symmetrische Systeme zerlegen, ein sog. Mit-, Gegen- und Nullsystem. Die Reaktanzen und Widerstände, die ein Netz für die einzelnen symmetrischen Strom- und Spannungssysteme, die sog. symmetrischen Komponenten, darstellt, heissen Mitreaktanz, Nullreaktanz, Nullwiderstand usw. Das Kriterium, dass die Spannungen zwischen gesunden Polen und Erde bei Erdschluss nicht grösser als 80% der verketteten Spannung werden, lautet nun: das Verhältnis von Nullreaktanz zu Mitreaktanz darf höchstens gleich 3 und das Verhältnis von Nullwiderstand zu Mitreaktanz höchstens gleich 1 sein. Natürlich hängen diese Widerstand- und Reaktanzverhältnisse hauptsächlich davon ab, wie das Netz geerdet ist, also von der Zahl der geerdeten Transformatoren und deren Schaltung, von der Distanz zwischen der Erdschlussstelle und den geerdeten Transformatoren, von den Erdungswiderständen usw.

Nach diesem kleinen Exkurs wollen wir wieder zur Frage der vollen und reduzierten Isolation zurückkehren. Es wurde bereits erwähnt, dass die Rest- und die Ansprechspannung der Überspannungsableiter unter sonst gleichen Bedingungen um so tiefer gewählt werden können, je tiefer die maximale betriebsfrequente Spannung an den Ableitern ist. Daher lassen sich in Netzen mit wirksam geerdetem Sternpunkt, wo die Spannung an den Ableitern höchstens 80% der verketteten Spannung beträgt, Ableiter mit tieferem Schutzniveau verwenden als in Netzen mit isoliertem Sternpunkt. Somit kann im ersten Fall ohne Reduktion der Sicherheitsmarge Material mit tieferer Stosshaltenspannung verwendet werden. Die neuen Regeln des SEV sehen daher in gleicher Weise wie die Empfehlungen der CEI vor, dass bei Betriebsspannungen über 100 kV bei wirksam geerdetem Nullpunkt reduzierte Isolation verwendet werden darf. Es ist zu empfehlen, von dieser Möglichkeit nur dann Gebrauch zu machen, wenn tatsächlich Ableiter an-

gewendet werden. In Netzen mit isoliertem, über Löschspulen geerdetem oder nicht wirksam geerdetem Sternpunkt darf natürlich nur volle Isolation verwendet werden.

Beiläufig sei noch erwähnt, dass die verlangten Prüfspannungswerte bei reduzierter Isolation etwa 13...18% tiefer sind als bei voller Isolation und dass bei Betriebsspannungen von 300 und 420 kV überhaupt nur reduzierte Isolation vorgesehen ist, da bei Netzen mit diesen hohen Betriebsspannungen der Nullpunkt immer wirksam geerdet werden soll.

Ort des Einbaues der Ableiter

Was die Anordnung der Ableiter in elektrischen Anlagen anbelangt, haben sich die Ansichten seit der Herausgabe der ersten Auflage der Koordinationsregeln des SEV auch etwas gewandelt. Es gibt zwei grundsätzlich verschiedene Methoden: Nach der einen werden bei jeder ankommenden und abgehenden Freileitung — und zwar auf der Leitungsseite des Schalters — Ableiter angeschlossen, um die atmosphärischen Überspannungen dort abzufangen, wo sie in die Station einlaufen. Weitere Ableiter sind dann nur in räumlich sehr ausgedehnten Stationen mit Rücksicht auf die Reflexionen der Überspannungswellen erforderlich. Die andere Methode geht davon aus, dass die Ableiter in erster Linie zum Schutz der Transformatoren dienen, und empfiehlt daher, möglichst nahe bei jedem Transformator Ableiter anzuschliessen, wobei unter Umständen auch ein einziger Satz Ableiter an einer Sammelschiene mehrere Transformatoren schützen kann. Bei dieser Methode braucht man im allgemeinen eine kleinere Anzahl Ableiter, und die Transformatoren sind besser geschützt; dafür werden die übrigen Teile der Anlage weniger gut vor Überschlügen bewahrt.

Die alten Regeln des SEV haben ausschliesslich die erste Methode empfohlen. Die Praxis hat aber gezeigt, dass die Betriebsleute — in der Schweiz und in andern Ländern — zum mindesten bei Höchstspannungsanlagen mit Rücksicht auf die hohen Kosten nicht bereit sind, so viel Ableiter aufzustellen, wie diese Methode erfordert. Daher empfehlen nun die neuen Regeln, Ableiter in erster Linie zum Schutz der Transformatoren einzusetzen, und nur dort, wo es sich kostenmässig verantworten lässt — also insbesondere in Mittelspannungsanlagen —, noch weitere Ableiter bei den ankommenden und abgehenden Freileitungen anzuschliessen⁴⁾.

Ableiter zum Schutz gegen nichtatmosphärische Überspannungen

Als letztes Problem im Zusammenhang mit Überspannungsableitern sei noch kurz auf deren Verwendungsmöglichkeit zum Schutz gegen andere als atmosphärische Überspannungen hingewiesen. Wie

⁴⁾ Wenn es heisst: «in erster Linie zum Schutz der Transformatoren» und dabei die rotierenden Maschinen nicht erwähnt werden, so nur deshalb, weil diese in den Koordinationsregeln nicht behandelt werden. Selbstverständlich sind Ableiter auch zum Schutz von rotierenden Maschinen zu empfehlen, sofern diese atmosphärischen Überspannungen ausgesetzt sind.

bereits eingangs erwähnt, dienen die Ableiter in der Regel nur zum Schutz gegen atmosphärische Überspannungen. Auf alle Fälle muss das Material betriebsfrequente Spannungserhöhungen sowie Erdschlussüberspannungen aushalten, und die Ableiter dürfen nicht ansprechen, weil sie den dabei auftretenden Beanspruchungen nicht gewachsen wären. Dagegen ist es durchaus möglich, die Ableiter zum Schutz gegen gewisse Arten von Schaltüberspannungen zu verwenden. Insbesondere sind heute die meisten Ableiter imstande, die Abschaltüberspannungen von leerlaufenden Transformatoren oder von Drosselspulen wirksam zu begrenzen. Es besteht also im Gegensatz zu früher, als die Ableitertechnik noch nicht so weit entwickelt war, kein Grund mehr, die Ansprechspannung der Ableiter so hoch zu wählen, dass diese auf die Überspannungen beim Ausschalten induktiver Ströme nicht ansprechen. Dagegen sind auch die heute üblichen Ableiter nicht imstande, die Überspannungen beim Abschalten langer Leitungen zu bewältigen; diese Überspannungen müssen daher so klein gehalten werden, dass die Ableiter nicht darauf ansprechen.

Nach Besprechung all dieser grundsätzlichen Probleme soll nun noch kurz erwähnt werden, welches Material neu in die Regeln aufgenommen worden ist, was für neue Prüfungen eingeführt wurden und welche wichtigen Fragen in den neuen Regeln erstmals behandelt werden.

Serie- und Messkondensatoren

Im Kapitel «Kondensatoren» werden nun auch die Seriiekondensatoren sowie die Messkondensatoren (kapazitive Spannungswandler) aufgeführt.

Stossprüfung der Transformatoren

Bei den Transformatoren ist im Gegensatz zur ersten Auflage der Koordinationsregeln eine Stoßspannungsprüfung mit 3 positiven und 3 negativen, vollen Stößen vorgesehen. Diese Prüfung war bereits am 1. November 1954 durch eine Änderung der ersten Auflage der Koordinationsregeln eingeführt worden, damals jedoch mit den alten Werten der Stoßprüfspannung.

Reduktion der Prüfspannungen auf atmosphärische Normalbedingungen

Die neuen Koordinationsregeln geben nun auch klar an, in welcher Weise bei den verschiedenen Prüfungen der Einfluss der Luftdichte und Luftfeuchtigkeit zu berücksichtigen ist. Die Empfehlungen der CEI machen sich die Aufgabe leicht, indem sie einfach angeben, dass die vorgeschriebenen Stoßspannungswerte bei äusserer Isolation für atmosphärische Normalbedingungen 760/20/11 gelten. Nun hat aber jeder Apparat sowohl innere als auch äussere Isolation, und man kann nur beide zusammen mit dem gleichen Spannungswert prüfen. Prüft man mit den in den Tabellen angegebenen Werten, so wird wohl die innere Isolation richtig, die äussere aber zu hoch beansprucht, da der Versuch in der Schweiz in der Regel bei einer relativen Luftdichte kleiner als 1 durchgeführt werden muss. Reduziert man dagegen

die Prüfspannungswerte so, dass die äussere Isolation gerade richtig beansprucht wird, so wird dafür die innere nicht voll geprüft.

Die neuen Regeln des SEV schreiben nun vor, dass die Tabellenwerte bei der Stossprüfung von Hochspannungsapparaten und Isolatoren entsprechend der vorhandenen Luftdichte und Luftfeuchtigkeit zu reduzieren sind, so dass die äussere Isolation nur bei atmosphärischen Normalbedingungen die vollen Tabellenwerte aushalten muss. Man nimmt also bei diesem Material in Kauf, dass die innere Isolation nicht ganz voll geprüft wird. Bei Transformatoren, Drosselspulen, Messwandlern, Kondensatoren und Kabeln muss dagegen die Stoßspannungsprüfung mit den vollen Tabellenwerten durchgeführt werden. Dadurch wird eine gewisse Überdimensionierung der äusseren Isolation nötig, die man bei diesem Material in Kauf nimmt, um die so viel wichtigere innere Isolation voll prüfen zu können. Der Versuch darf aber nicht verlangt werden, wenn die relative Luftdichte nicht mindestens gleich 0,92 ist.

Die Prüfungen mit Wechselfeldspannung sind bei allem Material mit den in den Tabellen angegebenen Spannungswerten ohne jede Reduktion durchzuführen. Auch diese Versuche dürfen nicht verlangt werden, wenn die relative Luftdichte nicht mindestens gleich 0,92 ist.

Anlagen in exponierter und nicht exponierter Lage

Die neuen Regeln unterscheiden zwischen Anlagen in exponierter und solchen in nicht exponierter Lage, je nachdem eine Anlage atmosphärischen Überspannungen ausgesetzt ist oder nicht. Der erste Fall trifft zu, wenn eine Anlage an Freileitungen angeschlossen ist, sei es direkt oder über kurze Kabelstrecken. Dagegen sind Stationen in reinen Kabelnetzen keinen atmosphärischen Überspannungen ausgesetzt.

Die Bestimmungen der Regeln gelten für Anlagen in exponierter Lage. Einem Besteller von Hochspannungsmaterial für Anlagen in nicht exponierter Lage steht es frei, die gleichen Bestimmungen vorzuschreiben oder die Anforderungen irgendwie zu reduzieren. Eine Verkleinerung der industriefrequenten Prüfspannung kommt dabei natürlich nicht in Betracht, weil die betriebsfrequenten Spannungserhöhungen in nicht exponierter Lage nicht geringer sind. Ein allfälliger Verzicht auf die Stossprüfung muss sorgfältig überlegt werden, mit Rücksicht auf Schalt- und Erdschlussüberspannungen. Dagegen kann bei nicht exponierter Lage natürlich ohne Bedenken auf Überspannungsableiter verzichtet werden, sofern diese nicht zu irgendeinem andern Zweck als zum Schutz gegen atmosphärische Überspannungen vorgesehen sind.

Wahl des Materials und Normungsfragen

Zum Schluss sollen noch ein paar Bemerkungen zur Normung des Hochspannungsmaterials gemacht werden; denn die Koordinationsregeln erfüllen auch eine wichtige Aufgabe im Dienste der Nor-

mung. Die Tabellen enthalten diejenigen Werte der höchsten Betriebsspannung, die in den Regeln des SEV über Genormte Werte der Spannungen, Frequenzen und Ströme (Publ. Nr. 159) als Normwerte aufgeführt sind. Zu jedem Normwert der höchsten Betriebspannung werden dann bestimmte Werte der Stosshaltespannung und der industriefrequenten Prüfspannung des Materials sowie die Grenzwerte des Schutzniveaus vorgeschrieben. Obschon die Betriebspannungen der schweizerischen Netze zum Teil nicht mit den Normwerten zusammenfallen, sollen trotzdem für das Hochspannungsmaterial nur Normwerte vorgeschrieben werden.

Man geht dabei so vor, dass man sich über die wirkliche höchste Betriebspannung einer Anlage klar wird und im weiteren ausschliesslich mit dem nächst höheren *genormten* Wert der höchsten Betriebspannung operiert. Es werden also für die Stosshaltespannung und die industriefrequente

Prüfspannung nur die in den Tabellen aufgeführten Normwerte verwendet, aber keine interpolierten Werte.

Eine Abweichung ist für Überspannungsableiter vorgesehen, die ohne Schwierigkeit feiner abgestuft werden können. Ferner dürfen für die Spannung der 15- und 20-Minuten-Prüfung von Kabeln Zwischenwerte verwendet werden. Für alles übrige Material verlangen dagegen die Koordinationsregeln eine Beschränkung auf die in den Tabellen aufgeführten Normwerte. Diese Regeln legen also nicht nur die Isolationsforderungen an das Material mit Rücksicht auf die in den Anlagen vorkommenden Beanspruchungen fest, sondern sie bilden gleichzeitig auch die Grundlage für die Normung des Materials hinsichtlich seiner Isolationsfestigkeit.

Adresse des Autors:

Dr. sc. techn. W. Wanger, Vizedirektor der A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

Überspannungen und Überspannungsschutz

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV am 7. März 1957 in Bern,

von K. Berger, Zürich

621.316.93 : 621.31.048

In diesem Vortrag kann es sich bei der knappen verfügbaren Zeit nur um eine sehr gedrängte Zusammenfassung des heutigen Standes der Kenntnisse handeln. Dabei interessiert uns hier in erster Linie der Zusammenhang der Überspannungen mit der Bemessung der Isolation und mit der Beanspruchung der Überspannungsableiter. Wir fragen somit vor allem nach der Häufigkeit, Höhe und Form der Überspannungen verschiedenen Ursprungs. Anschliessend sollen die Schutzmöglichkeiten kurz dargestellt werden. Um nicht allzusehr statistisch und trocken zu werden, sollen am Schluss einige Beispiele von Überspannungsvorgängen und ihrer Darstellungsweise beschrieben werden. Für jene Zuhörer, die sich für Einzelheiten interessieren, sind am Ende einige Literaturhinweise beigefügt.

I. Überspannungen

1. Atmosphärische Überspannungen

Was uns Elektriker interessiert, ist die Häufigkeit der direkten Blitzeinschläge in Masten und Stationen, und der Stromverlauf des Blitzes, der die Ursache der wesentlichen Überspannungen ist. Zwei Messmethoden stehen zur Verfügung:

Blitzmessung mit Oszillographen in allen Einzelheiten dort, wo Einschläge häufig vorkommen, und Messungen an Hochspannungsleitungen mit sehr vielen, verteilten Messmitteln, die entsprechend einfach und billig sein müssen.

Im folgenden sei die *Häufigkeit* der auf Hochspannungsleitungen in der Schweiz zu erwartenden Blitzeinschläge mit deutschen Stahlstäbchenmessungen verglichen.

Aus den Zahlen der Tab. I ergibt sich für den Monte San Salvatore eine jährliche Blitzeinschlagszahl von total etwa 33, jedoch von nur etwa 5, sofern

nur die Blitze mit kräftigem Anfangsstoss von mehr als 5 kA, die bestimmt von den Wolken gegen den Boden vorwachsen, gezählt werden. Wie dieses Vorwachsen erfolgt zeigt Fig. 1.

Anzahl der gemessenen Blitzeinschläge auf dem Monte San Salvatore 1947...1954 Tabelle I

Benennung	In 8 Jahren		Mittel pro Jahr		Bemerkungen
	total	mit Anfangsstoss	total	mit Anfangsstoss	
Positive Blitze (+)	54	13	≈ 7 ¹⁾	1,6	Bis 1950 1 Auf- fangturm, ab 1951 2 Auf- fangtürme in Betrieb.
Negative Blitze (-)	197	27	≈ 25 ¹⁾	ca. 3,5	
± Blitze	13	2	1,6	0,25	
Total	264	42	33	5,2	

Mittlere Anzahl Blitzeinschläge mit Anfangsstoss (Vorwachsen nach unten): 5,2 pro Jahr. Das Einzugsgebiet beträgt 1...2 km² (Schätzung).

¹⁾ Maximale Einschlagzahl im Jahre 1954: 12 positive und 68 negative Blitze.

Wenn mit einem Einzugsgebiet des San Salvatore von 1...2 km² und mit einem Streifen von 2,5...3mal Leitungshöhe bei Freileitungen gerechnet wird, wäre im Mittelland etwa mit folgenden Einschlagzahlen kräftiger Blitze zu rechnen:

Für 10 m hohe Leitungen 1 Blitz pro Jahr auf etwa 16...32 km Leitungslänge;

Für 20 m hohe Leitungen 1 Blitz pro Jahr auf etwa 7...14 km Leitungslänge.

Zum Vergleich seien die Resultate der deutschen Stäbchenmessungen erwähnt [1]¹⁾. In den Jahren 1933...1940 wurden mittels maximal 115 000 Stahlstäbchen auf 2000 km deutschen Leitungen von 15...220 kV total 1434 Einschläge festgestellt. Das

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.