

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 50 (1959)
Heft: 20

Artikel: Einführung zu den Leitsätzen für die Koordination, Bemessung und Prüfung der Isolation von Hochspannungsfreileitungen
Autor: Kläy, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059480>

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: 15.05.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS (SEV) UND
DES VERBANDES SCHWEIZERISCHER ELEKTRIZITÄTSWERKE (VSE)

Einführung zu den Leitsätzen für die Koordination, Bemessung und Prüfung der Isolation von Hochspannungsfreileitungen

Von H. Kläy, Langenthal

621.316.93 : 621.315.17.048

Einleitung

Die neu aufgestellten Leitsätze für die Koordination, Bemessung und Prüfung der Isolation von Hochspannungsfreileitungen¹⁾ umfassen die wesentlichen Bestimmungen, welche beim Bau betriebssicherer und wirtschaftlicher Leitungen zu beachten sind. Für bestehende Freileitungen gelten die Leitsätze nicht. Diese berücksichtigen aber alle mit bestehenden Freileitungen gemachten, guten Erfahrungen bei der Isolationsbemessung.

1. Verhalten bei Lichtbögen

Freileitungen verbinden elektrische Anlagen untereinander und müssen ohne Überwachung betriebssicher arbeiten. Wegen ihrer grossen Ausdehnung sind sie, mehr als die Stationen, atmosphärischen Entladungen ausgesetzt. Diese sollen, wenn möglich, keine schädlichen Überspannungen auf den Freileitungen erzeugen. Auch soll die Isolation so hoch sein, dass die Betriebsüberspannungen keine Überschläge auf der Freileitung erzeugen können. Jeder Überschlag auf der Freileitung hat in der Regel bei einem unter Spannung stehenden Netz einen stromstarken Lichtbogen zur Folge, der meist nur durch Abschaltung der Leitung gelöscht werden kann.

Freileitungen sollen so gebaut sein, dass bei einem kurzdauernden Überschlag kein bleibender Schaden entsteht, welcher den Weiterbetrieb der Freileitung verunmöglicht. Bei wichtigen Leitungen werden häufig an den Isolatorketten *Lichtbogenarmaturen* angebracht, welche den Lichtbogen vom Leiter und den Isolatoren fernhalten.

Es ist möglich, den Lichtbogen durch zweckmässig gebaute Lichtbogenhörner in einen bestimmten Raum zu steuern. Da wegen der Staffelung der Relaiszeiten nicht immer mit einer Schnellabschaltung gerechnet werden kann, sind Lichtbogenarmaturen zu empfehlen. Die Schutzringe schirmen die Klemmen überdies so ab, dass weniger Glimmentladungen und damit Radiostörungen auftreten; es ist aber darauf zu achten, dass diese Schutzarmaturen nicht selbst glimmen.

2. Atmosphärische Überspannungen

Direkte Blitzschläge in die Freileitung erzeugen in ihr hohe Überspannungen. Die Grösse und der Verlauf des Blitzstromes wurden auf Freileitungen

an stark exponierten Punkten gemessen, und es wurde eine Häufigkeitsverteilung nach Fig. 1 festgestellt.

Blitzentladungen nach Erde sind überwiegend negativ. Die Spannung beträgt einige Millionen Volt. Bei direktem Blitzschlag in eine Freileitung wurde in der Nähe der Einschlagstelle eine Steilheit des Spannungsanstieges von der Grössenordnung 1000

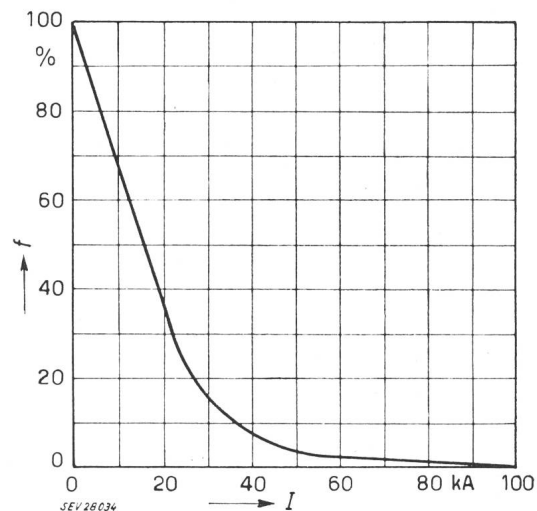


Fig. 1
Häufigkeitsverteilung des Blitzstromes
f Häufigkeit; I Blitzstrom

kV/ μ s gemessen [4]²⁾). Die Überspannungswelle läuft auf der Freileitung von der Einschlagstelle nach beiden Seiten weg und wird durch Sprühverluste rasch gedämpft [1]. Der Scheitelwert beträgt schon nach 1 km Laufweg nur noch einen Bruchteil des ursprünglichen. Die maximale Höhe der Welle ist durch die Überschlagspannung der Isolation nach Erde bestimmt und kann bei Holzstangenleitungen besonders hohe Werte annehmen. Es ist daher zu empfehlen, vor der Station diese Überspannungen durch Funkenstrecken, Ableiter oder beides zu begrenzen.

Bei Blitzentladungen in der Nähe von Freileitungen werden in ihnen durch Induktion *indirekte Überspannungen* erzeugt. Diese sind viel häufiger als direkte Blitzeinschläge, erreichen aber nur Werte bis etwa 200 kV. Es wird in den Leitsätzen empfoh-

¹⁾ siehe Seiten 988...992.

²⁾ siehe Literaturverzeichnis am Schluss der Einführung.

len, die Mindestisolation unabhängig von der Betriebsspannung auf allen Freileitungen so hoch zu wählen, dass diese indirekten Überspannungen keinen Überschlag erzeugen.

3. Betriebsüberspannungen

Beim Abschalten leerlaufender Freileitungen und Transformatoren oder auch bei anderen Schaltmanövern entstehen Überspannungen. Diese Betriebsüberspannungen sind abklingende, mittelfrequente Schwingungen, deren Maximalwert etwa die doppelte verkettete Spannung erreichen kann [2]. Die Isolation der Freileitung soll so hoch sein, dass bei den auf die Freileitung gelangenden Überspannungen kein Überschlag erfolgt, wobei auch die Minderung des Isolationsvermögens der Isolatoren durch Verschmutzung und Feuchtigkeit berücksichtigt werden muss. Die Kontrolle dieser Isolationsfestigkeit geschieht mit industriefrequenter Prüfspannung auf berechneten Isolatoren.

4. Erdseile

Nach statistischen Ergebnissen führten 50 % der Blitzeinschläge in eine Freileitung ohne Erdseil zu

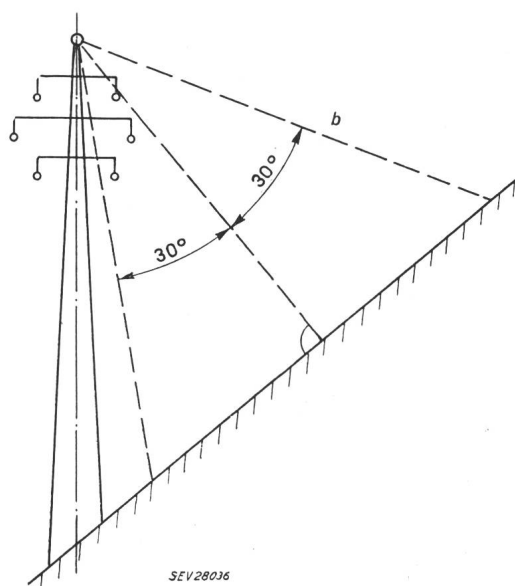
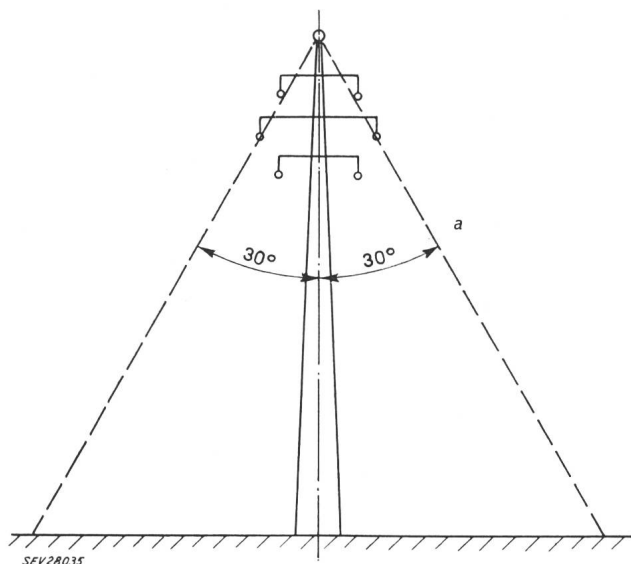


Fig. 2
Schutzbereich des Erdseiles
a Leitung in der Ebene; b Leitung am Berghang

einem Überschlag nach Erde (Erdschluss), bei Freileitungen mit Erdseil dagegen nur 20 % [3]. Damit ist die Schirmwirkung des Erdseiles erwiesen. Für den Schutzbereich des Erdseiles (Fig. 2) wurde ein Winkel von $2 \times 30^\circ$ gefunden, in dem Sinne, dass bei Anordnung der Leiter innerhalb dieses Schutzbereiches die weitaus meisten Blitzeinschläge in das Erdseil erfolgen.

Dabei ist zu beachten, dass dieser Winkel zum Lot auf der Erdoberfläche gemessen wird und dass bei einer Leitung am Berghang (Fig. 2b) die talseitigen Leiter schlechter geschützt sind. Dass trotz richtig angeordnetem Erdseil noch Erdschlüsse vorkommen können, ist auf folgendes zurückzuführen: Der durch das Erdseil aufgefangene Blitzstrom fließt über die benachbarten Masten nach Erde ab. Es tritt dabei am Mast ein Spannungsabfall auf, der sich in erster Näherung aus Blitzstromanteil mal Erdwiderstand berechnen lässt. Dieser Spannungsabfall kann u. U. genug sein, um einen Rücküberschlag über die Leitungsisolation auf den Leiter zu bewirken, wodurch ein Erdschluss eingeleitet wird. Diese Rücküberschläge sind um so seltener, je höher die Betriebsspannung und damit die Isolation der Leitung ist und je besser der Mast geerdet ist. Bei sehr hohen Masten spielt auch der induktive Spannungsabfall im Mast eine Rolle.

5. Masterdung

Bei einem Blitzeinschlag in das Erdseil oder den Mast fließt die Ladung nach Erde ab. An der Masterdung tritt ein Spannungsabfall von der Grösse IR auf. Nach der Blitzstatistik muss mit Blitzstromstärken bis etwa 60 kA gerechnet werden. Grössere Blitzströme kommen nur selten vor. Soll ein Einschlag ins Erdseil oder den Mast nicht zu einem Rücküberschlag über die Freileitungsisolation auf den Leiter führen, so muss dieser Spannungsabfall kleiner als die Stossüberschlagsspannung U_s der Isolation sein, d. h.

$$IR < U_s$$

oder

$$R < \frac{U_s}{I}$$

oder

$$R [\Omega] < \frac{U_s [\text{V}]}{60 \cdot 10^3}$$

Die Leitsätze schreiben je nach maximaler Betriebsspannung die minimale Stossisolation vor. Daraus kann bei Annahme eines maximalen Blitzstromes von 60 kA der zulässige Stoss-Erdungswiderstand bestimmt werden. Dieser darf also bei höheren Betriebsspannungen grösser sein als bei niedrigen, wie Tabelle I zeigt.

Maximal zulässiger Stoss-Erdungswiderstand

Tabelle I

U_m [kV]	12	(17,5)	24	36	52	72,5	170	245	420
U_n [kV]	10	(15)	20	30	45	60	150	220	380
U_s [kV]	250	250	250	250	250	325	750	1050	1550
R_{max} [Ω]	4,16	4,16	4,16	4,16	4,16	5	12	17	25

6. Stossüberschlag und Stossdurchschlag

Alle atmosphärischen Überspannungen haben Stosscharakter: Sie steigen rasch auf den Höchstwert an und klingen langsamer wieder ab. Die Überschlagserscheinungen an einer Funkenstrecke werden beeinflusst von Höhe, Polarität und Steilheit des Spannungstosses. Bei Spannungen über dem kritischen Wert $U_{0\%}$ kann an der Funkenstrecke ein Durchschlag erfolgen, wenn gerade im richtigen Moment und an der günstigen Stelle der Entladestrecke Ladungsträger vorhanden sind. Wenn dies nicht zutrifft, so erfolgt auch bei grösseren Spannungen als $U_{0\%}$ kein Überschlag.

Bei höherer Stoßspannung nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Entladung über die Funkenstrecke stark zu, weil die Spannung während längerer Zeit über dem kritischen Werte liegt. Bei der Spannung $U_{100\%}$ kommt es bei jedem Stoss zu einem Überschlag (100-%-Überschlagspannung).

Zwischen $U_{0\%}$ und $U_{100\%}$ hat die Kurve der Überschlagwahrscheinlichkeit einen S-förmigen Verlauf (Fig. 3). Nur für eine grosse Anzahl von Stössen kann die Überschlagwahrscheinlichkeit einigermaßen zutreffend bestimmt werden. Für die Koordination sind die 3 Werte wichtig: Die 0-%-Überschlagspannung oder *Haltespannung*, bei welcher gerade

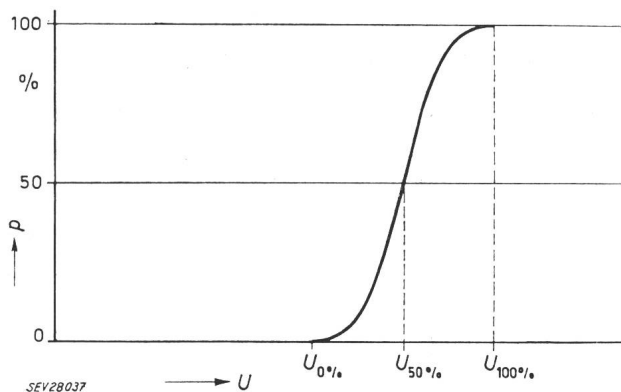


Fig. 3

Überschlagwahrscheinlichkeitskurve

p Wahrscheinlichkeit; U Spannung; $U_{0\%}$ Haltespannung; $U_{50\%}$ 50-%-Überschlagspannung; $U_{100\%}$ 100-%-Überschlagspannung

noch kein Überschlag erfolgt; die 100-%-Überschlagspannung, bei welcher jeder Stoss zu einem Überschlag führt; die 50-%-Überschlagspannung, bei welcher die Hälfte der Stösse zu einem Überschlag führen.

Die Breite des Spannungsbereiches von der Haltespannung bis zur 100-%-Überschlagspannung ist gross für Anordnungen mit unhomogenem Feld — z. B. Stabfunkenstrecken. Deshalb eignen sich solche Anordnungen schlecht als Schutzfunkenstrecken, weil ihr Ansprechen innerhalb des Ansprechspannungsbereiches unsicher ist. Bei Spannungen unterhalb der 100-%-Überschlagspannung kann der Überschlag erst nach Erreichen des Scheitelwertes im Rücken der Spannungswelle stattfinden. Bei Stossspannungen über dem 100-%-Wert erfolgt der Überschlag dagegen immer während des Anstieges, in der Front der Spannungswelle. Die Zeit bis zum Durch-

schlag ist um so kürzer, je steiler die angelegte Stossspannung ist. Bei sehr steilen Stössen kann die Überschlagspannung eines Isolators ein Mehrfaches der Überschlagspannung bei Industriefrequenz erreichen. Die Durchschlagspannung von Isoliermaterialien nimmt mit steiler werdendem Stoss nicht im selben Masse zu, weil das elektrische Feld im Innern des Materials in der Regel homogener ist. Deshalb besteht bei sehr steilen Spannungstössen Durchschlagsgefahr.

Die hyperbelartigen Kurven der Überschlag- bzw. Durchschlagspannung in Funktion der Zeit heissen *Stosscharakteristiken*. Auch sie sind abhängig von der Art der Funkenstrecke. Von 2 parallel geschalteten Anordnungen schlägt diejenige mit der tiefer liegenden Stosscharakteristik zuerst durch. Fig. 4 zeigt die grundsätzlichen Stosscharakteristiken eines Isolators und eines Ableiters. Sowohl bei einer Überspannungswelle mit der Steilheit S_1 als auch bei einer solchen mit der Steilheit S_2 spricht immer zuerst der Ableiter an (Punkte A_1 und A_2). Ist kein Ableiter vorhanden, so kommt es bei der Welle mit der Steilheit S_1 zuerst zu einem Überschlag in Luft (Punkt B_1), während mit der Steilheit S_2 ein Isolationsdurchschlag im Punkte C_2 eintritt.

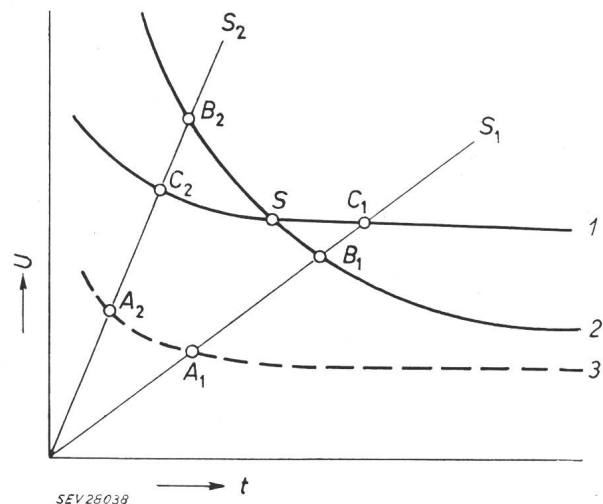


Fig. 4

Stosscharakteristiken

U Stoßspannung; t Zeit

1 Isolator; 2 Luft; 3 Ableiter

Weitere Bezeichnungen siehe Text

Da auf der Freileitung in der Regel keine Ableiter eingebaut werden, soll die Freileitungsisolations in sich selber koordiniert sein, d. h. der Überschlag soll vor dem Durchschlag erfolgen. Da nur ganz selten auch bei direktem Blitzschlag Spannungswellen grösserer Steilheit als 3000 kV/ μ s vorkommen, sollen Freileitungsisolatoren Spannungstösse dieser Steilheit ohne Durchschlag aushalten können [5]. In diesem Sinne ist ein Isolator in sich koordiniert und durchschlagsicher, wenn bei einem Spannungstoss der angegebenen Steilheit immer nur ein Überschlag, aber nie ein Durchschlag erfolgt. Im Gegensatz zur Luftisolation kann ein fester Isolierstoff durch mehrere hohe Spannungstösse allmählich zerstört werden.

7. Holzisolation auf Freileitungen

Bis zu 52 kV höchster Betriebsspannung bzw. 45 kV Nennspannung werden für Freileitungen meistens Holzstangen verwendet. Die damit gesammelten guten Betriebserfahrungen beruhen auf dem Isoliervermögen des Holzes. Die Stossüberschlagspannung beträgt etwa 400 kV/m für trockenes und etwa 200 kV/m für nasses Holz. Auch der Ableitwiderstand der nassen Holzstangen ist noch sehr hoch (0,1 M Ω /m) und begrenzt damit einen Erdschlußstrom über die Stange auf Werte, bei denen der Erdschlußlichtbogen von selber löscht. Bei Stoss übernimmt die Holzstange einen grossen Teil der Spannungsbeanspruchung durch die Blitzüberspannung. Deshalb kann durch Holztraversen und -einsätze auf geerdeten Masten die Stossfestigkeit der Leitung wesentlich erhöht werden.

Für Holzteile besteht allerdings Brandgefahr, wenn bei einem Feuchtigkeitsniederschlag auf sonst trockenem Holz und gleichzeitiger Ableitung über die Isolatoren ein genügend hoher Kriechstrom auftritt. Dann kann an Stellen grosser Stromdichte, z. B. um die Befestigungsbolzen herum, eine starke Wärmeentwicklung das Holz zum Verkohlen bringen. Zur Verhinderung dieser Stromkonzentration kann der Kriechstrom durch aufgenagelte blanke Leiter am Umfang des Holzquerschnittes gesammelt und auf die Bolzen abgeleitet werden [6].

8. Radiostörungen

Überschreitet die elektrische Feldstärke an unter Spannung stehenden Anlageteilen die Glimmgrenzspannung, so entstehen in der Luft Sprühentladungen. Diese regen in den Leitern hochfrequente Schwingungen an, welche die Ursache von Radiostörungen sind. Diese Glimentladungen treten bei Freileitungen an Armaturen der Isolatoren sowie an scharfen Kanten von Klemmen und Schutzarmaturen auf. Auch die Sprühentladung der Leiter (Korona) verursacht Radiostörungen. Die Hochfrequenzschwingungen laufen längs der Freileitung und machen sich daher noch weit von der eigentlichen Störquelle entfernt bemerkbar. Senkrecht zu der Freileitung klingt die Störfeldstärke etwa nach der $-1,5$ -Potenz der Entfernung ($s^{-1,5}$) ab [7] und wirkt bis etwa 500 m Entfernung von der Freileitung. Zur Verhinderung der Radiostörungen — es wird dadurch auch die leitungsgerichtete Hochfrequenz betroffen —, müssen die Störursachen bekämpft werden. Durch die Steuerung des elektrischen Feldes können Isolatoren weitgehend entstört werden. Kanten von Klemmen und Schutzarmaturen sind sorgfältig abzurunden. Mit Rücksicht auf die Koronaverluste sind für die Leiterseile genügend grosse Durchmesser zu wählen. Mit Bündelleitern ausgerüstete Leitungen erzeugen weniger Radiostörungen als Leitungen mit Einfachleitern bei gleicher maximaler Oberflächenfeldstärke.

9. Mastschalter

Im Zuge einer Freileitung werden Mastschalter zum Abtrennen eines Leitungsstückes aufgestellt. Bei offenem Mastschalter darf kein Überschlag auf

das abgeschaltete Leitungsstück erfolgen. Der Mast-schalter muss deshalb so koordiniert sein, dass beim Auftreffen einer Überspannung auch dann keine Entladung über die offene Trennstrecke erfolgt, wenn die Spannungsdifferenz über die offene Trennstrecke durch die Betriebsspannung auf der Gegenseite vergrössert wird. Diese Bedingung ist dann erfüllt, wenn die Überschlagspannung über die offene Trennstrecke um einen von der Betriebsspannung abhängigen Betrag grösser ist als die Überschlagspannung nach Erde. Die Überschlagspannung nach Erde muss aus diesem Grunde am Mastschalter herabgesetzt werden. Das kann durch die in Tabelle I der Leitsätze³⁾ angegebenen Anordnungen geschehen. Für die Erdung bestehen grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten: Erden am Fusse des Mastschalters oder an einem benachbarten Maste. Bei entfernter Erdung entsteht auf der Erdleitung ein hoher Spannungsabfall, entsprechend dem Produkt aus Stossstrom mal Wellenwiderstand der Leitung (ca. 500 Ω).

Durch eine solche Erdleitung könnte ein Überschlag über die offene Trennstrecke nicht verhindert werden. Es verbleibt somit nur die Erdung am Fusse des Mastschalters. Diese Erdung setzt die hohe Stossüberschlagspannung gegen Erde herab, weshalb der Mastschalter einer schwachen Stelle in der Holzstangenleitung gleichkommt. Da die Mastschalter-Erdung nur in geöffneter Stellung wirksam sein muss, könnte für Mastschalter, die nur ausnahmsweise geöffnet sind, eine Konstruktion gewählt werden, bei der die Erdung des Schaltergestelles bzw. des Antriebes nur bei geöffnetem Schalter eingeschaltet ist. Ein so ausgeführter Mastschalter würde im eingeschalteten Zustand die hohe Isolation der Holzstangenleitung nicht herabsetzen.

Auch am Mastschalter muss die Isolation zwischen den Polleitern den verlangten Werten entsprechen. Da die Stützen der Isolatoren auf dem Schaltergestell leitend miteinander verbunden sind, wogegen auf dem Holzmast zwischen den Stützen eine Isolation vorhanden ist, müssen am Mastschalter grössere Isolatoren gewählt werden als auf der Leitung. Es ist zu beachten, dass die Stossüberschlagspannung über die zwei in Reihe liegenden Isolatoren kleiner ist als die Summe der Stossüberschlagspannungen der beiden einzelnen Isolatoren [8].

Literatur

- [1] Roth, A. und A. Imhof: Hochspannungstechnik. 3. Aufl. Wien: Springer 1950. S. 295.
- [2] Berger, K.: Überspannungen beim Schalten leerlaufender Transformatoren und Leitungen. Bull. SEV Bd. 44(1953), Nr. 9, S. 397...409.
- [3] Baatz, H.: Überspannungen in Energieversorgungsnetzen. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1956.
- [4] Baatz, H.: Blitzeinschlag-Messungen in Freileitungen. Elektrotechn. Z. Bd. 72(1951), Nr. 7, S. 191...198.
- [5] Park, J. H. und H. N. Cones: Puncture Tests on Porcelain Distribution Insulators Using Steep-Front Voltage Surges. Trans. AIEE Bd. 72(1953), Part III, August, S. 737...741.
- [6] Ross, P. M.: Burning of Wood Structures by Leakage Currents. Trans. AIEE Bd. 66(1947), S. 279...287.
- [7] Meyer de Stadelhofen, J. und W. Walter: Beitrag zur Voraussage des Störverhaltens von Höchstspannungsleitungen. Techn. Mitt. PTT Bd. 35(1957), Nr. 11, S. 456...479.
- [8] Kläy, H.: Die Isolation von Freileitungen auf Holzstangen. Bull. SEV Bd. 38(1947), Nr. 2, S. 25...28.

Adresse des Autors:

Dr. sc. techn. H. Kläy, Vizedirektor der Porzellanfabrik Langenthal AG, Langenthal (BE).

³⁾ siehe S. 991.