

K. Berger, Zürich

Elektrische Anforderungen an Höchstspannungsleitungen

Elektrische Anforderungen an Höchstspannungs-Leitungen

Von K. Berger, Zürich

621.315.2.027.8

Die elektrischen Anforderungen gliedern sich in die drei folgenden Gebiete:

1. Anforderungen, die durch die hohe Betriebsspannung der Leitung begründet sind;
2. Anforderungen, die durch den Strom der Leitung bei Normalbetrieb und bei Störungen begründet sind;
3. Anforderungen an die Leitungsisolations bei Isolatorüberschlägen.

1. Anforderungen, die durch die hohe Betriebsspannung der Leitung begründet sind

1.1 Verhalten der Leitung gegenüber der normalen 50-Hz-Betriebsspannung

Die Leiter und ihre Isolation sind im Hinblick auf die Koronaverluste und mit Rücksicht auf die dadurch bedingten Radiostörungen in der Umgebung der Leitung zu bemessen. Beide Effekte können aus Kostengründen nicht gänzlich verhindert, sondern nur auf ein zulässiges Minimum reduziert werden. Besonders in bewohnten Gebieten verlangt die Einhaltung der zulässigen Störspannungen mehr von der Leitung als die Einhaltung wirtschaftlich noch tragbarer Koronaverluste.

Das technische Mittel zur Vermeidung beider genannten Störeffekte liegt in der Anwendung der sog. Bündelleiter (Mehrfachleiter), d. h. in der Ausstattung jeder Drehstromphase mit mehr als einem Leiterseil. Mit Rücksicht auf die Rauhreifbildung werden in der Schweiz z. B. 2 Leiter pro Phase benützt, im Ausland oft 3 oder 4. Die Koronaverluste eines Seiles oder eines Bündelleiters können in «Reusen» untersucht werden, in denen alle Witterungsverhältnisse nachgeahmt werden. In ihrer Versuchsstation Däniken hat die FKH¹⁾ 1950 eine solche Reuse errichtet, in der alle für 220 und 380 kV in Betracht kommenden Seile durchgemessen wurden²⁾, ebenso einige Seile für 650 kV. Aus der Seilanordnung in der Reuse können die Verluste auf jede beliebige Leitungsanordnung übertragen werden mit Hilfe des Pott-hoff-Gesetzes. Dieses sagt aus, dass bei gleicher Ladung auf der Seiloberfläche die Koronaverluste gleich gross sind. Man hat also in zwei verschiedenen Anordnungen desselben Seiles gleiche Verluste, wenn die spezifische Ladung, d. h. auch das Produkt aus Spannung und Betriebskapazität dieses Seils gleich gross ist. Das Gesetz ist vielfach bestätigt.

¹⁾ Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen.

²⁾ Siehe Bull. SEV 43(1952)14, S. 593...601.

Als Beispiel solcher Verlustmessungen zeigt Fig. 1 die Verluste jedes Phasen-Seiles sowie die Summenverluste der trockenen und berechneten Leitung. Daraus ersieht man, dass es wohl möglich ist, eine Leitung so zu bauen, dass sie bei schönem Wetter Verluste von z. B. weniger als 1 % der natürlichen Übertragungsleistung aufweist. Viel schwieriger und teurer wäre die Einhaltung so tiefer Verluste bei Regen oder Nebel.

Fig. 2 zeigt den Einfluss der Anzahl gleicher Leiter im Bündel. Die Kurve ist berechnet unter Voraussetzung von 1 % der natürlichen Leistung als mittlere Verlustleistung über das ganze Jahr, wobei die schweizerischen Niederschlagsmengen berücksichtigt sind.

Bekanntlich sind Bündelleiter, wie sie von Markt und Mengele schon am Anfang der Dreissigerjahre vorgeschlagen wurden, bezüglich Korona viel günstiger als dickere Einzelseile. Dies gilt besonders für den kritischen Fall, nämlich die berechnete Leitung. Die Kenntnis solcher Kurven, für welche die FKH ein besonderes «Korona-Buch» aufgestellt hat, ermöglicht die wirtschaftliche Dimensionierung der Leiterseile.

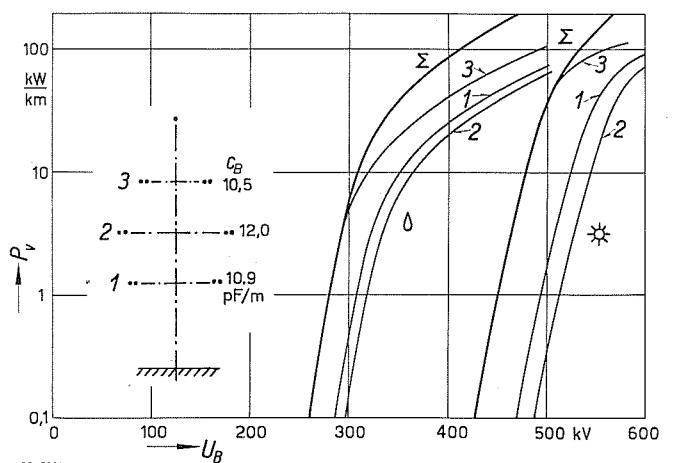


Fig. 1

Koronaverluste der 3 Bündelleiter eines Strangs einer 380-kV-Doppelleitung

Masthöhe 50 m, Bündel $2 \times 30 \phi$, Abstand 400 mm

U_B Betriebsspannung; P_k Koronaverluste; C_B Betriebskapazität;

δ berechnete Leitung; $\star$ trockene Leitung; 1, 2, 3 Phasenleiter;

Σ Summenverluste der 3 Phasen; Messung in Koronareuse der FKH

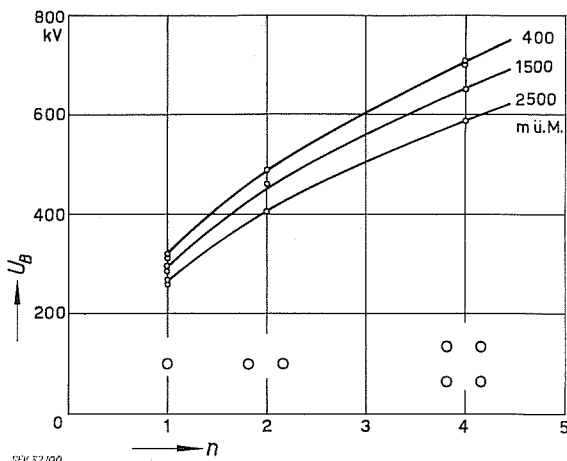


Fig. 2

Zulässige Betriebsspannung U_B einer Drehstromleitung mit 1, 2 oder 4 Leitern pro Phase

Seildurchmesser 30 mm, Seilabstand 400 mm
Voraussetzung: mittlere jährliche Koronaverluste $P_v = 1\%$ der natürlichen Leistung der betreffenden Leitung. Die Kurven gelten für schweizerische Witterungsverhältnisse in 400, 1500 und 2500 m mittlerer Höhe über Meer
 n Leiterzahl pro Phase

Die Vermeidung der beiden genannten Störeffekte bedingt bei hohen Spannungen auch eine minimale *Steuerung der Spannungsverteilung* an den langen Isolatorenketten. Dazu dienen Steuerelektroden an den Leitungsseilen, sofern nicht die Mehrfachleiter an sich schon eine genügende Steuerung der Spannungsverteilung bewirken.

1.2 Verhalten der Leitung bei den durch plötzliche elektrische Zustandsänderungen bedingten Spannungserhöhungen mit Betriebsfrequenz

Wichtig ist vor allem das Einschalten der unbelasteten und die plötzliche Entlastung einer ausschliesslich von einer mässig starken Kraftwerkgruppe gespeisten Leitung. Das Verhältnis der Ladeleistung der Leitung zur Kurzschlussleistung oder angenähert auch zur Nennleistung der speisenden Generatorgruppe bestimmt in erster Linie den Spannungssprung, der beim Einschalten der spannungslosen Leitung und noch ausgeprägter bei der plötzlichen Entlastung der Leitung entsteht. Derselbe Sprung erscheint umgekehrt beim Ausschalten der leerlaufenden Leitung als plötzliche Spannungssenkung.

Versuche in einer 220-kV-Anlage mit 13 km Kabel bestätigen den theoretischen Verlauf der plötzlichen Spannungserhöhung und Spannungssenkung (Fig. 3 und 4). Wenn unzulässige Spannungserhöhungen vermieden werden sollen,

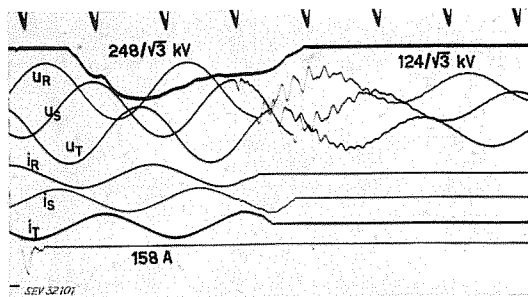


Fig. 3

Oszillogramm der Spannungssenkung beim Ausschalten von 13 km Kabel + 49 km Freileitung für 220 kV ab Generatorgruppe mit 56 MVA Nennleistung
Schema siehe Fig. 4

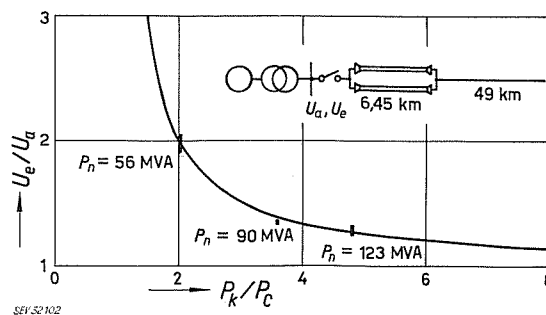


Fig. 4

Plötzliche Spannungserhöhung beim Zuschalten von 13 km Kabel + 49 km Freileitung an Kraftwerke der Nennleistung P_n bzw. der Kurzschlussleistung P_k

Nennspannung 230 kV; Ladeleistung bei Nennspannung 51,5 MVA
 P_C Ladeleistung von Kabel + Freileitung; U_a Anfangsspannung (vor Zuschalten der Leitung); U_e Endspannung (nach Zuschalten der Leitung)

muss die Kurzschlussleistung der speisenden Generatoren ein Mehrfaches, besser ein Vielfaches der Ladeleistung betragen.

Theoretisch lassen sich diese Spannungserhöhungen durch eine Zeitstafelung der Schaltbefehle umgehen, derart, dass die Leitung stets von der Seite des starken Netzes zuletzt aus- und zuerst eingeschaltet wird, nicht von der separaten Kraftwerkgruppe. Die grossen Ladeleistungen der Höchstspannungs-Leitungen lassen sich kompensieren durch Parallel-Reaktanzen entsprechender MVA-Grösse, die fest mit der Leitung verbunden sein müssen. Die betriebsfrequenten Spannungserhöhungen lassen sich damit beliebig reduzieren, sofern die entsprechenden Kosten in Kauf genommen werden.

Die grossen Spannungserhöhungen beim Abschalten grosser Belastungen, wobei lange Höchstspannungsleitungen oder gar Kabel noch an den speisenden Kraftwerken hängen bleiben, verlangen Belastungen dieser Werke mit $\cos \varphi \approx 1$, d. h. mit kleinen Generatorerregungen. Dieser Vorteil bezüglich Überspannungen wirkt sich als Verschlechterung der Stabilität dieser Maschinen aus. Grössere Kabelstrecken bilden in jedem Fall in Höchstspannung ausserordentlich schwierige technische und finanzielle Probleme, entspricht doch 1 km Kabel als Kapazität ungefähr 25...30 km Freileitung.

1.3 Verhalten der Leitung gegenüber Schaltüberspannungen

Diese Überspannungen sind in erster Linie von den Eigenschaften des Höchstspannungsschalters abhängig: Sie verlieren ihre grosse Bedeutung mit der Anwendung rückzündfreier moderner Schalter. Über Schaltüberspannungen wurde gelegentlich der letzten Schalterdiskussionsversammlung des SEV im Januar 1962 berichtet; es kann hier darauf verwiesen werden ³⁾.

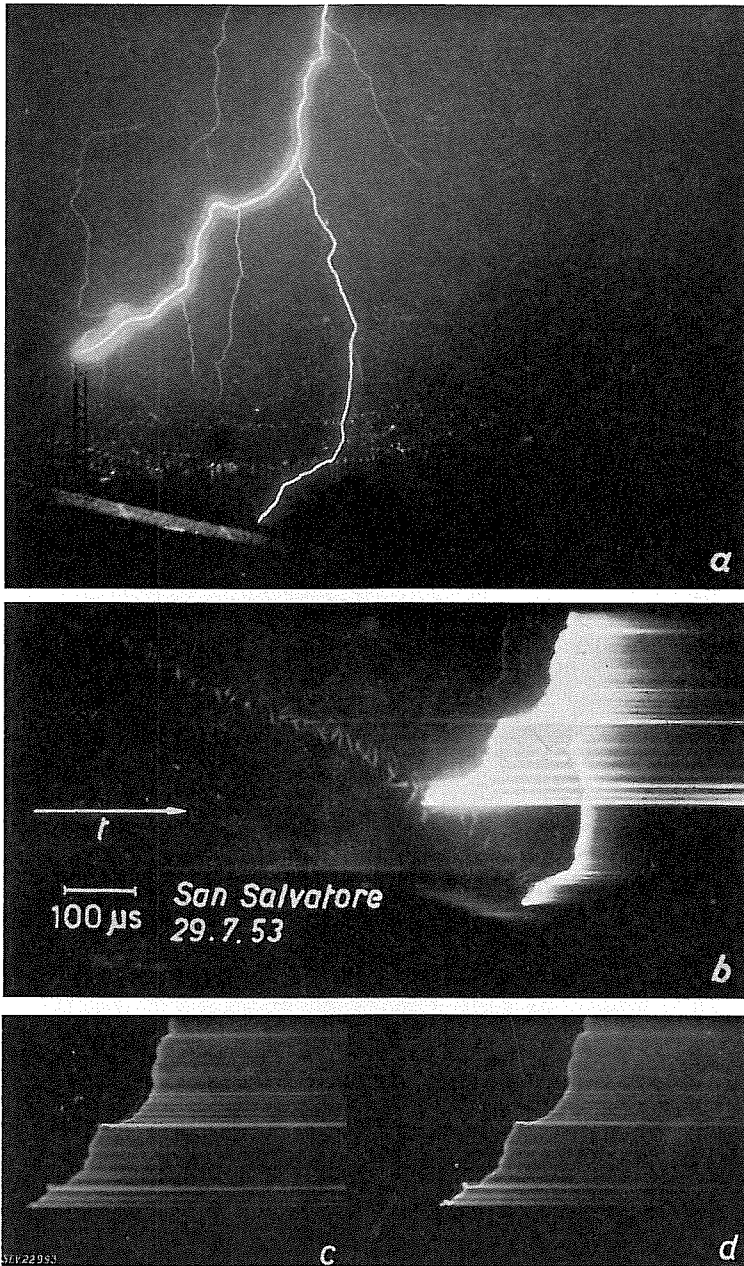
1.4 Verhalten der Leitung bei Blitzeinschlägen

Von den beiden möglichen Störungseinwirkungen, nämlich Blitzeinschlag in Masten und Erdseile mit Rücküberschlag, und direkter Einschlag in eine Leitungsphase, gewinnt der zweite Fall bei den Höchstspannungsleitungen überwiegende Bedeutung. Die Ursache davon liegt in den wesentlich höheren Leitungsmasten mit den grösseren Abständen zwischen den Phasen- und Erdseilen und in der Art des Blitzvorwachsens. Bei unseren, für 380 kV isolierten, bisher mit

³⁾ Siehe Bull. SEV 53(1962)10, S. 500...509.

Fig. 5

Blitzeinschlag in den 70-m-Turm auf dem Monte San Salvatore
a Aufnahme auf ruhendem Film; *b...d* Aufnahmen auf bewegtem Film; *b* erster Teilblitz mit ruckweise aus der Gewitterwolke gegen Erde vorwachsender Vorentladung; *c* zweiter Teilblitz 80 ms später; *d* dritter Teilblitz 150 ms später



220 kV betriebenen Alpenleitungen besteht eine besondere Gefährdung vor allem in vermehrten Blitzeinschlägen in die äusseren Phasenleiter dort, wo die Leitung einem steilen Abhang entlang läuft.

Während man sich früher auf sog. «Schutzraumtheorien» stützte, die stets auf mehr oder weniger willkürlichen Annahmen beruhten, hat die Blitzforschung der letzten Jahrzehnte eine Möglichkeit gegeben, sich über die Schutzwirkung von Blitzableitern und Erdseilen ein physikalisch begründetes, zahlenmässiges Bild zu machen. Die Methode soll hier kurz erwähnt werden.

Auf Grund der photographischen Beobachtungen mit der Boys-Kamera bildet sich der Blitzkanal ruckweise in Stufen, deren Länge zwischen etwa 20 und 100 m liegt (Fig. 5). Der von der Wolke gegen den Erdboden oder gegen die Leitung vorwachsende Blitzkanal kann mit einem geladenen elektrischen Leiter verglichen werden, der sich bei annähernd konstanter Spannung dem Boden nähert. Der Überschlag vom Leiter zum oder vom Boden tritt erfahrungsgemäss bei Spannungen bis zu mindestens einigen MV dann ein, wenn die

mittlere Feldstärke auf dieser Strecke einen Wert von knapp 5 kV/cm erreicht. Aus der Spannung des Blitzkanals und dieser mittleren Feldstärke ist die «Rest-Schlagweite» zwischen Blitzkopf und irgendwelchen geerdeten Leitern bestimmt, sofern in erster Näherung von den Einflüssen der Elektrodenform und Polarität abgesehen wird.

Die Spannung des Blitzkanals hängt direkt mit seiner Ladung, bzw. mit der Ladung pro Längeneinheit zusammen. Diese bestimmt nach *Golde* aber auch den Stoßstrom im Hauptblitzkanal ⁴⁾, (Fig. 6). Es ist daher möglich, für jede Blitzkanalladung oder für jeden Blitzstrom-Scheitelwert entweder die Bodenfeldstärke oder direkt die Schlagweite zu berechnen, über die sich der Blitzkanal zur Erde zuletzt stossartig schliesst, sei es als sogenannte Fangentladung nach oben oder als letzte Stufe des Blitzvorwachsens nach unten ⁵⁾.

Die räumliche Lage dieser Rest-Schlagweite entscheidet, ob ein Einschlag in das Erdseil, in einen Phasenleiter oder den Boden erfolgt. Einige graphisch berechnete Beispiele betreffen je einen 150-kV- und 400-kV-Doppelleitungsmast mit 30° und 45° Schutzwinkel des Erdseiles. Den Figuren 7, 8 und 9 liegt die Annahme zu Grunde, dass im Moment, wo die kritische Feldstärke am Erdboden nach *Golde* (3 kV/cm) erreicht wird, lediglich die Distanz vom Blitzkopf nach der Erde, dem Erdseil oder einem Phasenseil massgebend ist dafür, welcher dieser drei Gegenstände getroffen wird. Die Blitzrichtung ist als vertikal vorausgesetzt.

Eine verfeinerte Theorie müsste wohl auch die Elektrodenformen (Leiterseil oder Erdboden) und die Polarität des Blitzes berücksichtigen. Die sehr einfachen Figuren zeigen jedoch deutlich, dass je nach dem Mastbild nur eine Auslese von Blitzströmen bestimmter Höhe in der Lage ist, ein Phasenseil zu treffen. Auch die Breite des Streifens längs der Leitung, innerhalb dessen Blitze zu den Phasenseilen gelangen können, ist beschränkt. Sie wird für die Doppelleitung mit B_A bezeichnet, der grösste zu den Phasenleitern gelangende Blitzstrom mit I_B .

In einer graphischen Tabelle sind die 4 Masten bezüglich Blitzeinschlagswahrscheinlichkeit in Phasenleiter zusammengestellt (Fig. 10). Die %-Zahlen beziehen sich einmal auf die Gesamtzahl der vertikalen Blitze, die innerhalb der Auffangbreite B_A der betreffenden Leitung vorkommen, das andere Mal auf die grösste Auffangbreite, nämlich jene der 380-kV-45°-Leitung; das sind 2×105 m. Diese Zahlen er-

⁴⁾ R. M. Golde, ETZ-A 1961, Nr. 9.

⁵⁾ R. Davis, Frequency of Lightning Flashover on Overhead-Lines Leatherhead 1962.

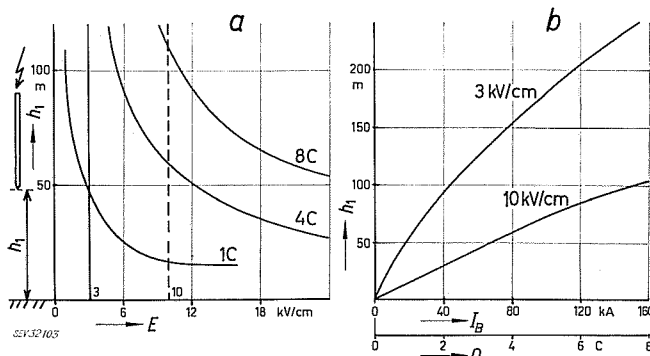


Fig. 6

Bodenfeldstärke E unter dem Blitzkopf in Höhe h_1 über Boden bei Ladungen von 1, 4 und 8 C des Blitzkanals

a elektrische Feldstärke E unter dem Blitzkopf in Höhe h_1
b Höhen h_1 für Blitzladung Q [C] oder Blitzstrom I_B [kA] bei Bodenfeldstärken von 3 und 10 kV/cm

(Nach Golde, ETZ A, Bd. 1961, Nr. 9)

lauben einen zahlenmässigen Vergleich der bei 150-kV-Leitungen und 380-kV-Leitungen zu erwartenden Einschlagshäufigkeit in Phasen. Sie erlauben ferner die Abschätzung der absoluten mittlern Anzahl Phaseinschläge pro km und Jahr, wenn die Anzahl Blitze zur Erde pro km² und Jahr sowie die Häufigkeitskurve verschieden hoher Blitzströme bekannt sind. Nach den Beobachtungen auf dem Monte San Salvatore beträgt im Tessin die Einschlagshäufigkeit ungefähr 3 Blitze pro km² und Jahr. Darin sind Blitze aller Stromstärken eingeschlossen. Die Häufigkeit verschiedener Blitzstromstärken ist für den Monte San Salvatore selbst für die Jahre 1947...1954 im Bulletin SEV 1955, Nr. 5 und 9, dargestellt. Für unseren Fall interessieren nur Blitze mit Stromstärken von 5 kA und mehr, weil kleinere Ströme keinen Überschlag der ca. 1 MV (Stoss) betragenden Leitungsisolations bewirken. Nach Fig. 39 des erwähnten Aufsatzes führen rund 50 % aller Blitze auf dem Berg Ströme von 5 kA oder mehr. Rechnen wir somit mit 1,5 Blitzeinschlägen pro km²

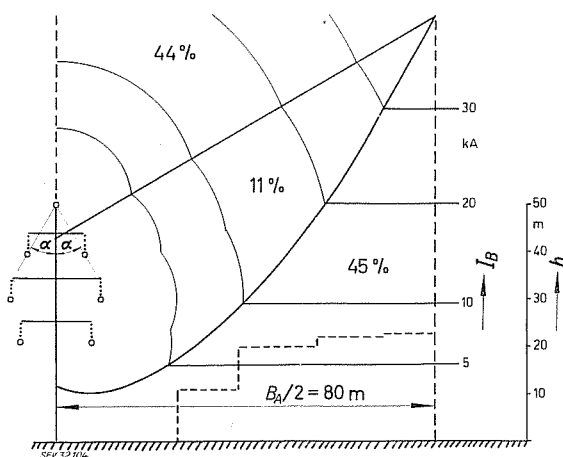


Fig. 7

Blitzeinschlagverteilung auf eine 380-kV-Leitung mit einem Erdseilwinkel von $\alpha = 30^\circ$

Voraussetzungen:

1. vertikal fallende Blitze;
2. Fangentladung bzw. letzte Blitzstufe bei einer Bodenfeldstärke von 3 kV/cm (Fig. 6) in den nächstgelegenen Leiter (Boden, Leiterseile oder Erdseil)

Die Zahlen bedeuten die relative Anzahl Einschläge in das Erdseil, in die Phaseenseile und in den Erdboden, wobei 100 % der Blitzeinschläge auf die Auffangbreite B_A der Phaseenseile entfallen

I_B Blitzstrom; h Höhe über Erdboden

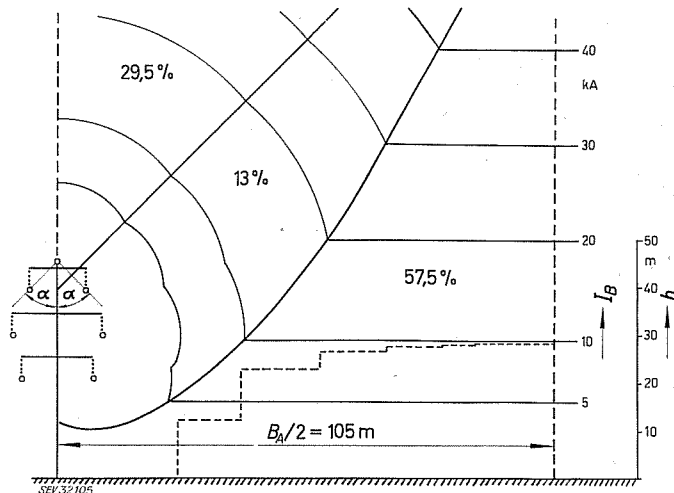


Fig. 8

Blitzeinschlagverteilung auf eine 380-kV-Leitung mit einem Erdseilwinkel von $\alpha = 45^\circ$

Erklärungen siehe Fig. 7

und Jahr mit Stromstärken von mindestens 5 kA, so ergeben sich auf 210 m Breite rund 0,3 Einschläge pro Jahr und km Leitung. Diese Zahl entspricht nun 100 % der Tabelle, Kolonne $B = 210$ m der Fig. 10. 10 % Phase-Einschläge bedeuten somit $0,1 \cdot 0,3 = 0,03$ Phaseinschläge pro Jahr und Leitungs-km, d. h. alle 33 Jahre einen zum Überschlag führenden Phaseinschlag pro km Leitungslänge, oder pro Jahr 1 Phaseinschlag pro 33 km Leitung.

Der Vergleich der Gefährdung der 150-kV- und der 380-kV-Leitung durch direkte Leitereinschläge nach Fig. 10 zeigt eine Erhöhung auf das 2...3fache für die 380-kV-Leitung.

2. Anforderungen, die durch den Strom der Leitung bei Normalbetrieb und bei Störungen begründet sind

2.1 Die Beanspruchung der Leitung durch den normalen Betriebsstrom

Eine Beanspruchung der Leitung durch den normalen Betriebsstrom bietet keine grundsätzlich neuen Probleme. Bekannt ist die Wichtigkeit geschweisster Seilverbindungen bei Al-Seilen, wodurch die früheren Enttäuschungen mit solchen Seilen vermieden werden können.

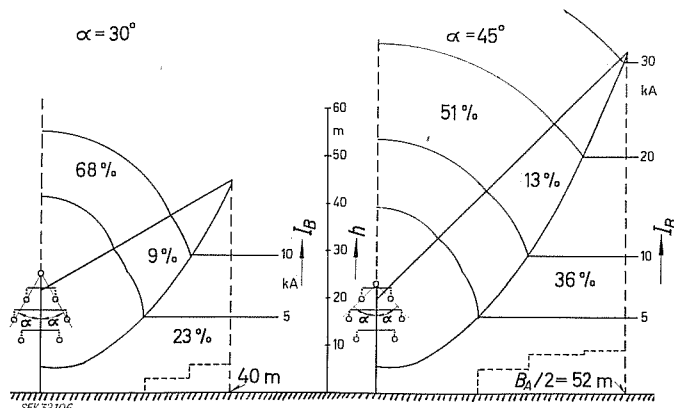


Fig. 9

Blitzeinschlaghäufigkeit auf eine 150-kV-Leitung mit Erdseilwinkeln von $\alpha = 30^\circ$ bzw. 45°

Erklärungen siehe Fig. 7

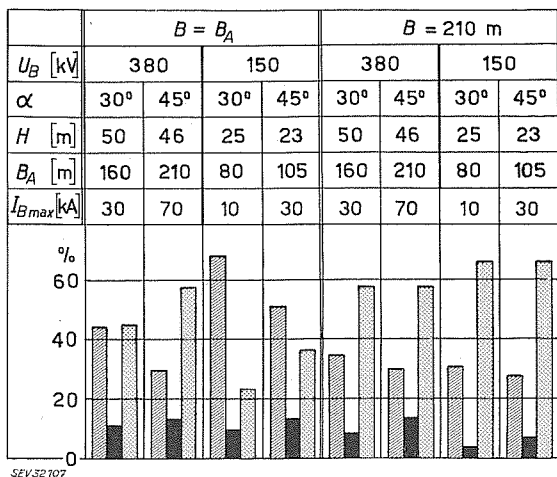
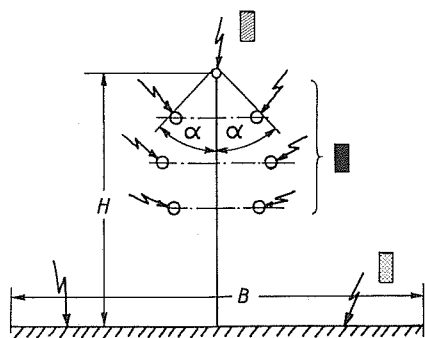


Fig. 10

Blitzschlagverteilung in Erdseil, Phasenleiter und Boden innerhalb eines Raumes der Breite B für die 4 Masten in Fig. 7...9

1. Darstellung $B = B_A$: Prozentuale Verteilung auf die Auffangbreite B_A jeder betreffenden Leitung (100 % auf die Breite B_A der betreffenden Doppelleitung);

2. Darstellung $B = 210 \text{ m}$: Prozentuale Verteilung auf die grösste Auffangbreite der 4 Leitungen (380 kV, 45°). (100 % auf Auffangbreite 210 m der Doppelleitung 380 kV, 45°).

Die Darstellung 2. erlaubt den Vergleich der absoluten Ziffern der Phaseinschläge z. B. pro 100 km und Jahr in 150-kV- und 380-kV-Leitungen

U_B Betriebsspannung der Leitung; α Erdseilwinkel; H Höhe des Erdseils über Boden; $I_{B \max}$ grösster Blitzstrom der zum Einschlag in ein Phasenseil führen kann

2.2 Anforderungen an die Höchstspannungsleitung bezüglich des bei Erdschluss auftretenden Überstromes

Hier stellen sich 3 Probleme von praktisch hoher Bedeutung:

1. Die elektromagnetische Fernwirkung der gestörten Leitung;
2. Die Frage der thermischen Belastung des Erdseils durch den Fehlerstrom;
3. Die Frage der Masterdungen.

2.2.1 Die Fernwirkung der Leitung

Die Fernwirkung von Freileitungen entsteht durch den grossen Erdschlußstrom, der über den Erdboden und das oder die Erdseile zurückfliesst, wobei die Erdrückleitung eine riesige Schleife mit mehreren 100 m Weite (Eindringtiefe in den Erdboden) und vielen km Länge bildet. Parallel geführte Freileitungen und auch Kabel erfahren dadurch eine beträchtliche Induktionswirkung. Schwachstromkreise, seien es nun werkeigene (ferngesteuerte Kraftwerke, Seilbahnen, Wasserschlossinstallationen usw.) oder werkfremde (PTT-Kabel, Steuerkabel von Ölleitungen und Ferngasleitungen, Seilbahnen usw.) können durch die entstehenden Überspannungen und Überströme beträchtliche Schäden erleiden und ev. Fehlbefehle erteilen. Es fragt sich, wie weit durch zweckentsprechenden Bau der Höchstspannungs-

leitung selber diese störenden Fernwirkungen vermindert werden können.

Grundsätzlich kann dies dadurch geschehen, dass dem Erdseil ein möglichst hoher Anteil des Fehlerstromes zugewiesen, und damit der Erdboden entlastet wird.

Um die Möglichkeiten dieser Stromverlagerung zu erkennen, ist die Stromverteilung bei einem Erdschluss berechnet, und in den Fig. 11...13 dargestellt worden. Ohne hier auf die Berechnung einzugehen, sollen die Resultate wie folgt zusammengefasst werden:

Die Verwendung gut leitender Erdseile von ca. 200 mm² Al an Stelle der für Mittelspannungsleitungen üblichen Stahlseile kleineren Querschnitts von 50...100 mm² bewirkt einerseits eine Entlastung des Erdrückstromes, andererseits aber auch eine gewisse Erhöhung des Erdschlußstromes infolge der Reduktion der Nullimpedanz. Eine Reduktion des Ohmschen Erdseil-Widerstandes auf höchstens ca. 1/3 seiner Reaktanz, d. h. auf höchstens ca. 0,2 Ω /km ist erstrebenswert. Die Reduktion der magnetischen Fernwirkung ist aus den Differenzkurven (Erdschluss minus Erdseilstrom) deutlich ersichtlich; sie erreicht netto etwa 20 %. Das bedeutet, dass die induzierten Spannungen in benachbarten Schwachstromleitungen im gleichen Mass kleiner werden. Bei gleichen Induktionsspannungen kann andererseits der Querschnitt des leitenden Mantels von Kabeln im gleichen Mass reduziert werden. Die Bedeutung dieser elektromagnetischen Fernwirkung dürfte besonders in unsern Alpentälern wesentlich sein, wo wir gezwungen sind, Leitungen aller Spannungen auf grosse Strecken parallel zu führen.

2.2.2 Thermische Belastung des Erdseiles

Was die thermische Belastung des Erdseils betrifft, so lässt sich dessen Längenausdehnung einfach berechnen, wenn Strom und Zeit bekannt sind. Für die Seillinie gilt bekanntlich folgender Zusammenhang zwischen Länge L , Durchhang f , und Spannweite a :

$$L = a + \frac{8f^2}{3a}$$

Ein 70 mm² Stahlseil erwärmt sich bei 10 kA in 1 s um ca. 850 °C. Betrag der statische Durchhang des kalten Erdseiles z. B. 15 m bei 300 m Spannweite und 302 m Seillänge, so springt die Seillänge innert 1 s auf 305 m und der Durch-

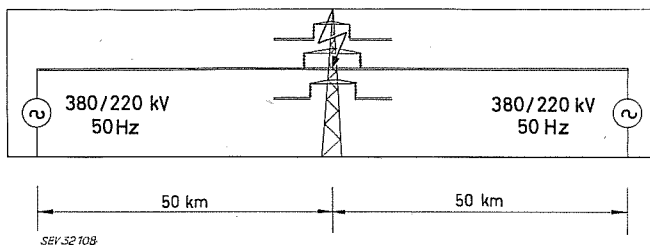


Fig. 11

Grundlagen für die Berechnung der Reduktion magnetischer Fernwirkungen einer Höchstspannungsleitung mit Zweierbündeln durch verschieden gut leitende Erdseile

Berechnungsgrundlagen:

$$\omega L_p = 0,62 \text{ } \Omega/\text{km}, \omega L_E = 0,76 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$\omega M = 0,23 \text{ } \Omega/\text{km}, \rho = 200 \text{ } \Omega\text{m}$$

Masterdung 5 und 20 Ω ; Mastdistanz 300 m; Zweiseitige Speisung in 50 km Entfernung

ωL_p Reaktanz des mittleren Phasenseils pro km (Zweierbündel);

ωL_E Reaktanz des Erdseils pro km;

ωM Kopplungsreaktanz zwischen Phasenleiter und Erdseil pro km;

ρ spezifischer Erdwiderstand; r Erdseilwiderstand pro km als Parameter

Annahmen:

$r/\omega L_E = 0, 1/3, 1$ und 3 (Der Wert 1/3 entspricht einem Al-Seil von ca. 200 mm², der Wert 3 einem Stahlseil von ca. 70 mm²)

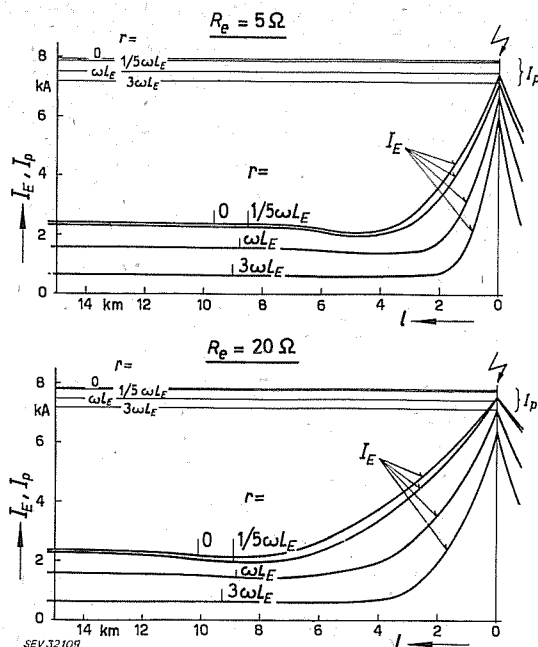


Fig. 12

Erdseilstrom I_E in Funktion des Abstandes l vom Erdschluss (bei 0 km), zum Schema in Fig. 11

für Einzelmasterdungen $R_e = 5 \Omega$ und $R_e = 20 \Omega$, bzw. für Erdseilwiderstände r gemäss $r/\omega L_E = 0, 1/5, 1$ und 3 . Die dünn gezeichneten Horizontalen bedeuten den Erdschlussstrom I_p bei entsprechenden Erdseilwiderständen r

hang von 9 m auf rund 24 m! Ein Erdseil von 550 mm² Al erfährt im obigen Fall nur ca. 10 cm mehr Durchhang.

Die thermischen Schwierigkeiten verschwinden, sofern die Erdseile der Forderung kleiner Fernwirkung, d. h. mit $r \ll \omega L_E$ bemessen werden.

2.2.3 Anforderungen an die Masterdungen

Die Nullpunkterdung der Höchstspannungsnetze macht jeden Erdschluss zum Kurzschluss. Sowohl am Erdschlussmast wie an seinen Nachbarn entstehen grosse und gefährliche Schrittspannungen, wie dies in nicht geerdeten Netzen nur beim Doppelerdschluss der Fall ist. Das Erdseil verschleppt diese Gefahr. Wird jedoch die gesamte Fläche um die Masten, soweit die Schrittspannung gefährliche Werte erreicht, berechnet, so ergibt sich keine Änderung der gesamten Gefahrenfläche aller Masten. Es ist aus Kostengründen unmöglich, die Masterdung so gut zu machen, dass keine Gefährdung besteht. Diese kann nur durch bruch- und lichtbogensichere Isolatoren und rasche Störungsabschaltung auf das tragbare Minimum beschränkt werden. Günstiger als Strahlenerder sind kreisförmig um den Mastfuss verlegte Bänder. Bezüglich der Verhinderung von Rücküberschlägen beim Blitzeinschlag in Masten und Erdseilen genügen Mastfusswiderstände von 10...20 Ω auch für die grössten Blitzströme.

Die bisherigen Ausführungen beschränken sich absichtlich auf Probleme der Höchstspannungsleitungen. Die Erdungsfrage zwingt aber, noch ein Wort zu sagen über die mit den Leitungserdseilen zusammenhängenden Anlagenerdungen.

Bei einem Erdschluss in wenigen Spannweiten Entfernung von der Anlage fliesst der grösste Teil des Fehlerstromes über das Erdseil (Fig. 11...13). Bei weit entfernten Erdschlüssen dagegen fliesst der grosse Teil des Erdschlussstromes

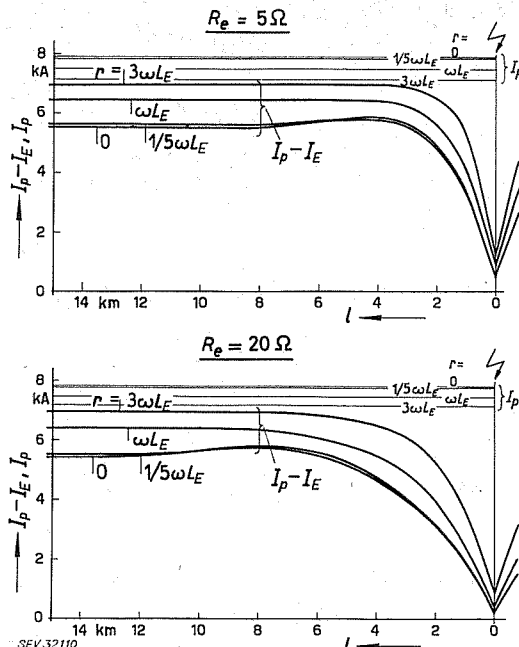


Fig. 13

Wie Fig. 12, aber für Differenzstrom $I_p - I_E$

Der Differenzstrom $I_p - I_E$ ist für die magnetischen Fernwirkungen massgebend

über die Erde zurück, selbst wenn ein gut leitendes Erdseil verwendet wird. Mit Erdschluss-Strömen der Grössenordnung 10 kA kommt dabei die Anlagenerdung auf 1 oder mehrere kV Spannung.

In der Umgebung der Anlagen entstehen hohe Schrittspannungen, und gegen nicht verbundene Leiter der Umgebung grosse Spannungsdifferenzen. Die Praxis ist mit den Jahren immer mehr dazu übergegangen, alle geerdeten und berührbaren Teile einer Hochspannungsanlage in einer einzigen Erdung zusammenzuschliessen. Dazu gehören z. B. auch die Bahngeleise, die gewöhnlich in die Anlagen eingeführt sind. Ein Problem besteht in vielen Fällen im Einbezug der Wasserleitungen, der Telefonkabel, sowie aller Leitungen nach Ortschaften oder Wohnkolonien.

Die FKH hatte Gelegenheit, bei Messungen der Berührungs- und Schrittspannungen in der Umgebung einer 380-kV-Anlage mitzuwirken. Diesen Erdungsfragen kommt mit dem Ausbau des Höchstspannungsnetzes erhöhte Bedeutung zu, und es wäre dringend zu wünschen, dass die seit Jahren brachliegende Anpassung der Starkstrom-Verordnung an die neuen Erfahrungen bezüglich Erdung bald von einem kompetenten Gremium behandelt würde.

3. Anforderungen an die Leitungsisololation bei Isolatorüberschlägen

Die Anforderungen bezüglich Lichtbogensicherheit der Leitungsisolatoren bezwecken, bei unvermeidbaren Isolator-Überschlägen den Schaden so gering zu halten, dass die Leitung betriebsfähig bleibt.

Da über dieses Problem im Rahmen der Diskussionsversammlung anschliessend ein Vortrag mit Filmvorführung vorgesehen ist, erübrigt es sich, hier darauf einzugehen.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. K. Berger, Versuchsleiter der FKH, Seefeldstrasse 301, Zürich 8.