

U. Burger, Zürich

Überspannungsableiter und Funkenstrecke als Schutz von Transformatoren mit direkt eingeführtem Kabel

Überspannungsableiter und Funkenstrecke als Schutz von Transformatoren mit direkt eingeführtem Kabel

Von U. Burger, Zürich

621.316.933:621.314.21

Transformatoren mit direkt eingeführtem Kabel erlauben einesteiis eine raumsparende Anordnung, erschweren aber andernteils den Überspannungsschutz. Erst an der dem Kabel vorgelegerten Freileitung kann eine Schutzeinrichtung, sei es nun Überspannungsableiter oder Funkenstrecke, angeordnet werden. Welches ist nun ihre wirksamste Aufstellung und wie gross ist die Überspannung am Transformator bei atmosphärischen Entladungen? Mit Hilfe einer Modellnachbildung einer 220-kV-Anlage werden diese Fragen unter Berücksichtigung möglichst aller wesentlichen Parameter beantwortet. Dabei erweist es sich als zweckmässig, zwei Grenzfälle der atmosphärischen Einwirkungen zu betrachten, nämlich den sehr weit entfernten und den sehr nahen Blitzeinschlag in die Leitung. Jener wirkt als einlaufende Spannungswelle, dieser als aufgedrückter Blitzstrom.

Les transformateurs avec entrée directe du câble permettent d'une part une disposition peu encombrante, mais rendent par contre la protection contre les surtensions plus difficile. Un dispositif de protection, que ce soit un parafoudre ou un éclateur à étincelles, ne peut être fixé qu'à la ligne aérienne précédant le câble. Quelle est maintenant la disposition la plus efficace de cette protection et quelle est l'ampleur des surtensions au transformateur lors des décharges atmosphériques? A l'aide d'un modèle d'une installation de 220-kV ces questions sont élucidées en considérant autant que possible tous les paramètres essentiels. A cette occasion il est indiqué de considérer deux cas-limites des influences atmosphériques, c'est-à-dire les coups-de-foudre très éloignés et très rapprochés, frappant la conduite. Le premier détermine une onde de tension montante, le second l'application d'un courant de foudre.

1. Einleitung

In den letzten Jahren sind vielerorts Kavernenkraftwerke entstanden, bei denen ausser den Generatoren oft auch die Transformatoren im Berginnern stehen. Das direkt in den Transformatorenkessel eingeführte Hochspannungskabel erlaubt eine gedrängte Anordnung und damit ein kleineres Bauvolumen. Ferner kann damit auch eine Durchführung eingespart werden. Diesen Vorteilen steht als Nachteil das Problem des Überspannungsschutzes gegenüber. Die gewohnte Aufstellung des Überspannungsableiters (im folgenden Ableiter genannt) direkt beim Transformator bietet ein Höchstmass an Schutz, ist aber hier nicht möglich. Für das Anbringen einer Schutzapparatur, sei es nun Ableiter oder Funkenstrecke, erweist sich als nahester Punkt vom Transformator aus der leitungsseitige Kabelendverschluss. Wie weit vermag nun diese Massnahme den Transformator zu schützen? Gibt es

einen noch besseren, wirksamern Aufstellort? In vielen Aufsätzen wurde bereits versucht, auf diese Fragen Antwort zu finden. Eine Zusammenfassung aller Veröffentlichungen bis 1958 über dieses Thema ist in [1]¹⁾ gegeben. Als ergänzende Arbeiten sind [2] und [3] zu erwähnen, wobei die zweite neben der Rechnung eine einfache Modellmessung enthält.

Beim Überblicken der bereits vorliegenden Arbeiten drängt sich die Unterscheidung zwischen dem sehr weit entfernten und dem sehr nahen Blitzeinschlag auf. Im ersten Fall wird nur eine ankommende Spannungswelle betrachtet, ohne Reflexionen an der Einschlagstelle zu berücksichtigen. Im 2. Fall wird das ganze Wellenspiel zwischen Einschlagstelle, Kabelendverschluss und Transformator behandelt. Ein Netzmodell, das für hochfrequente Vorgänge im Hochspannungslaboratorium der ETH gebaut wurde und in [4; 5] beschrieben ist, erlaubt eine gründliche Untersuchung der gestellten Aufgabe.

¹⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

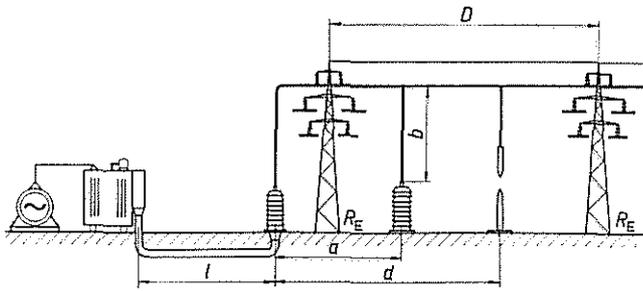


Fig. 1
Disposition der Anlage

l Kabellänge; D Mastdistanz; R_E Masterdungswiderstand; a, d Distanz vom Kabelendverschluss bis zum Ableiter- bzw. Funkenstreckenabzweigpunkt auf der Freileitung; b Distanz zwischen Freileitung und Ableiter längs des Abzweiges

2. Modellgrundlagen

Voraussetzung bildet eine 220-kV-Leitung, die über ein Kabel mit dem Transformator verbunden ist (Fig. 1). Die einzelnen Teile sollen so genau wie möglich nachgebildet werden.

2.1 Freileitung

Die mittleren Höhen über Boden einer bestehenden Leitung sind in Fig. 2 gegeben. Die Leitung weist Seile gemäss Tabelle I auf.

Masse der Seile

Tabelle I

| | Material | Querschnitt mm ² | Durchmesser mm | Distanz cm | Ersatzdurchmesser cm | Spezifischer Seilwiderstand Ω/km |
|------------|----------------------|--------------------------------|-------------------|---------------|-------------------------|-------------------------------------|
| Erdseil | Fe | 70 | 10,5 | — | — | 2,43 |
| Phasenseil | Fe Mg Si (Aldrey) | 2 × 300 | 22,5 | 40 | 13,4 | 0,06 |

Ausgehend von der Annahme eines Blitzeinschlages in das Erdseil oder den obersten Phasenleiter mit Überschlag auf den obersten Phasenleiter bzw. Erdseil genügt es vollauf, nur diese beiden Leiter darzustellen. Aus Fig. 2 berechnen sich die folgenden Grössen:

Phasenseil gegen Boden: $L_P = 1,36 \mu\text{H/m}$ $C_P = 6,82 \text{ pF/m}$
 Erdseil gegen Boden: $L_E = 1,91 \mu\text{H/m}$ $C_E = 4,3 \text{ pF/m}$
 Phasenseil zu Erdseil: $M = 0,43 \mu\text{H/m}$ $C_{PE} = 1,98 \text{ pF/m}$

worin L die Induktivität, M die Gegeninduktivität und C die Teilkapazität bedeuten.

Diese Werte dienen als Grundlage der π -Glieder der Nachbildung, wobei ein Glied in der Wirklichkeit einer Freileitungslänge von etwa 11 m entspricht. Die Grenzfrequenz der Kette beträgt dann 10 MHz.

In den betrachteten Stossvorgängen sind bis zum Erreichen des Spannungsmaximums im wesentlichen die oberen Frequenzen des Spektrums für den Verlauf verantwortlich. Entsprechend der Stromverdrängung im Boden, bzw. der geringen Eindringtiefe enthalten die oben berechneten und nachgebildeten Induktivitätswerte nur das Luftfeld. Wie bereits in [5] beschrieben ist, können L_P und L_E gekoppelt werden, dadurch ist auch die Nachbildung von M gewährleistet.

Ein Stahldraht für das Erdseil, ein Kupferdraht für das Phasenseil erlauben auch die Abbildung des Gleichstromwiderstandes der Leiter.

2.2 Kabel

Drei Einleiterkabel mit je 200 mm² Kupfer verbinden den Transformator mit dem Ende der Freileitung. Mit 26 mm

Durchmesser des Kupferleiters und 72,4 mm Aussendurchmesser des Kabels errechnet sich die Induktivität $L = 0,19 \mu\text{H/m}$, was bei einer Kapazität von 208 pF/m einen Wellenwiderstand von 30Ω ergibt ($v = 160000 \text{ km/s}$). Auch diese Grössen werden als π -Glieder (Grenzfrequenz 10 MHz) in Längen bis zu 400 m nachgebildet.

2.3 Mast

Die Mastlänge von 39 m wird durch drei in ihrem Wellenwiderstand von oben (270Ω) nach unten (225Ω) abgestuften π -Glieder dargestellt. Die Nachbildung des Masterdungswiderstandes erfolgt in Form eines induktionsarmen Schichtwiderstandes; als Varianten wurden 5, 10 und 20Ω gewählt. Die Mastdistanz beträgt 250 m.

2.4 Blitz

Der weit entfernte Blitzeinschlag, bei dem die Reflexionen an der Einschlagstelle nicht berücksichtigt werden, macht sich durch eine einlaufende Spannungswelle bemerkbar. Für die Untersuchungen ist es zweckmässig, den einfachen Spannungsverlauf aus linearer Front und horizontalem Rücken zu wählen. Dies gibt einerseits für eine theoretische Untersuchung klare Bedingungen und stellt doch andererseits eine harte Beanspruchung dar.

Parameter der Überspannungswelle:

Frontsteilheit: 0,3, 0,6, 1,2 MV/ μs
 Amplitude: 520, 1050, 1500 kV

Der tiefste Wert des Scheitelwertes der Spannung ist die Ansprechspannung der Ableiter, bzw. Funkenstrecken bei sehr langsamem Spannungsanstieg. Der obere Wert von 1500 kV stellt sicher ein Maximum dar, das nur unter sehr günstigen Isolationsbedingungen auftritt.

Für nahe Blitzeinschläge wird auf eine bestimmte Spannungsform verzichtet; die massgebende Grösse ist hier der aufgedrückte Strom. Bei der Durchsicht der Messungen auf dem Monte San Salvatore [6] zeichnet sich für die Wahl der Stossform eine kleine Frontdauer von ca. $1 \mu\text{s}$ ab und ein Scheitelwert des Stromes von ca. 100 kA.

Parameter des Blitzstromes:

Stossform: 1/100, 10/100 μs
 Stromstärke: 30, 100 kA

Front- und Rückenhalbwertszeit entsprechen den Definitionen der CEI²⁾.

2.5 Transformator

Aus der Überlegung, dass ein Spannungsmaximum bei Stössen in den ersten zehn μs auftritt, muss der Transformator in seiner Wirkung nur für diese Zeit richtig nachgebildet werden. Die magnetischen Vorgänge weisen eine längere Zeitkonstante auf. Die Eingangskapazität gegen Erde und parallel dazu der Wellenwiderstand

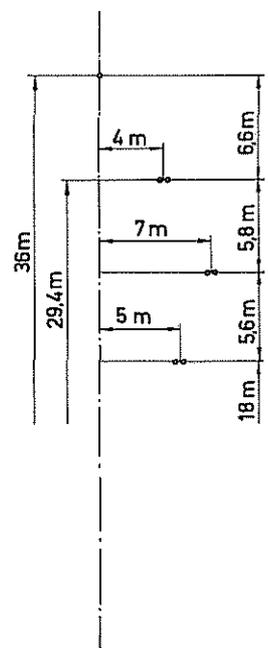


Fig. 2
Leiteranordnung einer 220-kV-Leitung

²⁾ Commission Electrotechnique Internationale.

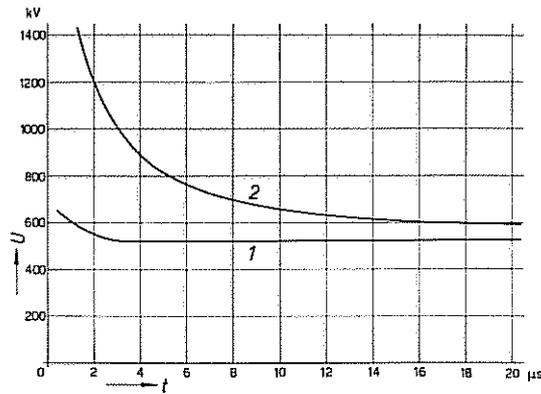


Fig. 3
Ansprechcharakteristik des Ableiters (1) und der Funkenstrecke (2)

der Wicklung genügen daher vollauf als funktionsgerechte Nachbildung des Transformators. Als Kapazität wurde 1000 pF (als Variante 5000 pF) und als Wellenwiderstand 10 kΩ gewählt. Der Sternpunkt war direkt geerdet.

2.6 Ableiter und Funkenstrecke

Ableiter und Funkenstrecke müssen im Modell wie in der Wirklichkeit eine bestimmte Ansprech-, bzw. Überschlagsverzögerung aufweisen. Bei beiden ersetzt ein schneller Transistor den Spannungszusammenbruch an der Funkenstrecke. Mittels eines Verzögerungsgliedes lässt sich die gewünschte Ansprechcharakteristik einstellen.

Die heute verwendeten Ableiter weisen in wirksam geerdeten 220-kV-Netzen eine Restspannung in der Grösse von 590 kV bei 10 kA auf. Die Nennspannung der Ableiter beträgt 200 kV. Fig. 3 zeigt die Ansprechcharakteristik dieses Ableiters.

Die heute in 220-kV-Netzen verwendete Funkenstrecken-schlagweite beträgt 1,05 m. Aus [7] lässt sich für diese Distanz bei linear ansteigender Spannungsfront die Ansprechcharakteristik entnehmen, sie ist in Fig. 3 wiedergegeben. Da die Funkenstrecken auf den Masten angebracht werden, ist der Einfluss des Bodens als Plattenelektrode nicht gross, die Kurve dürfte daher für beide Polaritäten annähernd dieselbe sein.

Die Strom-Spannungscharakteristik des Ableiters ist in Fig. 4 gegeben. Aus ihr bestimmt sich der Maßstab von Spannung U und Strom I im Modell. Die Restspannung der Funkenstrecke liegt bei 1,05 m Distanz in der Grössenordnung von 2 kV. Die Nachbildung dieses Wertes ist nicht möglich, da die Restspannung des Transistors umgerechnet etwa 20 kV beträgt (Fig. 4). Dieser Fehler ist verglichen mit den andern Spannungen ohne weiteres zu vernachlässigen.

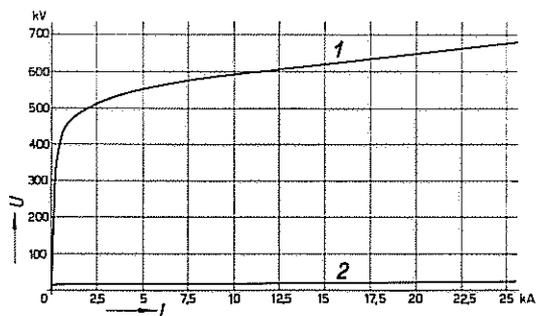


Fig. 4
Ableitercharakteristik (1) und Restspannung der nachgebildeten Funkenstrecke (2)

3. Weit entfernter Blitzeinschlag

Da hier die Reflexionen in der Einschlagstelle nicht berücksichtigt werden, genügt es, im Modell ein kurzes Stück Freileitung nachzubilden. Die Einspeisung der Spannungswelle erfolgt über den Wellenwiderstand der Leitung von 408 Ω. Die gegen den Speisepunkt zurückkommenden Wellen werden nicht reflektiert, was eine lange Leitung vortäuscht. Für die Untersuchung dieses Falles genügt es, einen der Phasenleiter (z. B. den obersten in Fig. 2) nachzubilden. Der Erdübergangswiderstand von Ableiter und Funkenstrecke wird als null angenommen.

Um das Ansprechen von Ableiter und Funkenstrecke bei verschiedenen Distanzen a und d (Fig. 1) zu bestimmen, wird der Spannungsanstieg am Aufstellort ohne die Schutzapparatur mit der Ansprechcharakteristik verglichen. Mit Hilfe des Verzögerungsgliedes des Schalttransistors lässt sich dieser auf den Schnittpunkt der beiden Kurven einstellen.

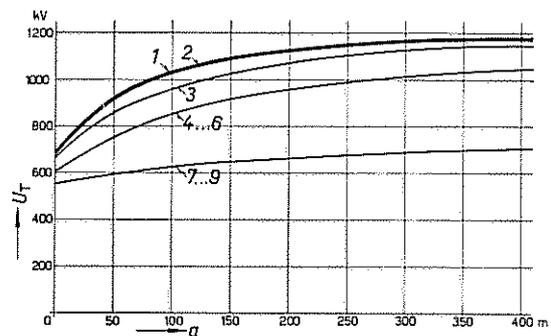


Fig. 5
Transformatorspannung U_T in Funktion der Ableiterdistanz a längs der Freileitung bei weit entferntem Blitzeinschlag
Kabellänge 100 m

Stossform

| Kurve | Scheitelwert der Spannung MV | Steilheit MV/ μ s |
|-------|------------------------------|-----------------------|
| 1 | 1,5 | 1,2 |
| 2 | 1,5 | 0,6 |
| 3 | 1,5 | 0,3 |
| 4 | 1,05 | 1,2 |
| 5 | 1,05 | 0,6 |
| 6 | 1,05 | 0,3 |
| 7 | 0,52 | 1,2 |
| 8 | 0,52 | 0,6 |
| 9 | 0,52 | 0,3 |

3.1 Schutz mit Ableiter

Aus den vielen Variablen sei in Fig. 5 ein repräsentativer Fall herausgegriffen. Beim Betrachten der Kurven ist wohl das Auffälligste, dass die kleinste Überspannung dann auftritt, wenn der Ableiter direkt neben dem Kabelendverschluss steht. Der recht komplizierte Vorgang kann mit Hilfe eines Wellenfahrplanes mit entsprechenden Reflexionskonstanten [8] oder mit der graphischen Methode von Bergeron [9] gelöst werden.

Für die kurze theoretische Untersuchung müssen folgende Vereinfachungen vorgenommen werden:

- Idealisierte Ableiterkennlinie, Ansprechspannung = Restspannung = konstant;
- Ankommende Spannungswelle sei ein Rechteckstoss;
- Transformator am Ende des Kabels wird weggelassen.

Mit diesen Vereinfachungen zeigt Fig. 6 die theoretisch am transformatorseitigen Kabelende auftretenden Spannungen. Als Parameter $p = \tau_A/\tau_K$ ist das Laufzeitverhältnis des Freileitungsstückes zwischen Kabelendverschluss und Ab-

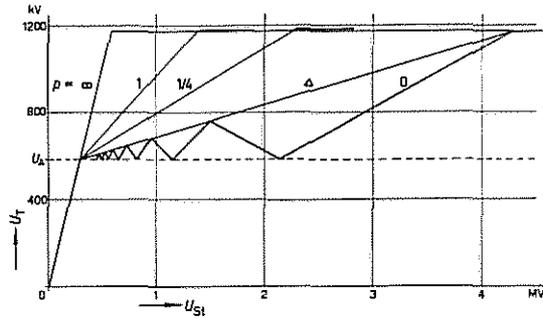


Fig. 6

Theoretische Transformatorspannung U_T beim Schutz mit idealem Ableiter in Funktion der einlaufenden Stoßspannung U_{St}

Parameter $p = \tau_A/\tau_K$; τ_A Laufzeit vom Kabelendverschluss bis zum Ableiter; τ_K Laufzeit im Kabel; U_A Ansprech- bzw. Restspannung

leiter zum Kabel gegeben. Interessant ist besonders die Kurve mit $p = 0$ (Ableiter unmittelbar neben dem Endverschluss). Es ist sofort ersichtlich, dass alle Wellen über 4,28 MV am Transformator die doppelte Ableiterrestspannung bewirken. 4,28 MV ist die Amplitude der Welle, die beim Auftreffen auf das Kabel trotz dem Absenken gerade noch die Ansprechspannung des Ableiters erreicht.

Die auftretenden Maxima und Minima lassen sich aus dem Wellenspiel im Kabel erklären:

a) *Minima*: Die am Transformator ankommenden Teilwellen verdoppeln sich, wobei die Summe aller Wellen die Spannung U_T ergibt. Die zurücklaufenden Wellen laden das Kabel auf diese Spannung U_T . Wird dabei gerade die Ansprechspannung U_A des Ableiters erreicht, so erfolgt keine weitere Reflexion am Kabelanfang (Ableiter: Restspannung = Ansprechspannung). Das

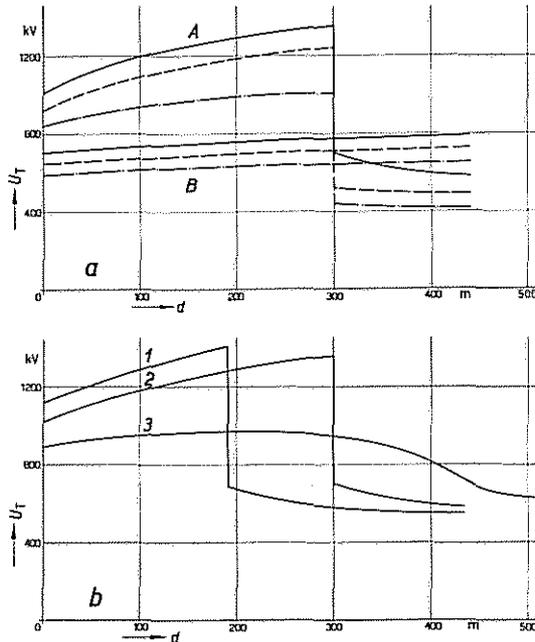


Fig. 7

Transformatorspannung U_T in Funktion der Schutzfunkenstreckendistanz d

| Kurve | Scheitelwert der Stoßspannung MV | Steilheit des Stoßes MV/ μ s |
|---------|----------------------------------|----------------------------------|
| Fig. 7a | A | 1,5 |
| | B | 0,52 |
| Fig. 7b | 1 | 1,5 |
| | 2 | 1,5 |
| | 3 | 1,5 |

Kabellänge: — 50 m; - - - 100 m; ——— 200 m

Wellenspiel im Kabel ist zu Ende, die Spannung am Transformator bleibt U_A .

b) *Maxima*: Eine vom Transformator kommende Welle bewirkt am Kabelendverschluss infolge des höhern Wellenwiderstandes der Freileitung eine Spannungserhöhung. Erreicht nun diese erhöhte Spannung gerade die Ableiteransprechspannung, so läuft noch die volle reflektierte Teilwelle in das Kabel zurück. Infolge der Verdopplung am Transformator entsteht ein Maximum, das wesentlich über U_A liegt.

Der Verlauf von $p = \tau_A/\tau_K = \Delta \rightarrow 0$ ist so zu erklären, dass infolge eines ganz kleinen Abstandes des Ableiters vom Kabel bei der angenommenen unendlich steilen Front der Spannungswelle immer der Übergang vom Kabel zur Freileitung vor dem Ableiter wirksam ist. Es entsteht dann eine unendlich schmale Spannungsspitze von nur theoretischer Bedeutung; bei grösserer Distanzierung ($p \gg 0$) jedoch wird sie zum Träger der Überspannung. Der berechnete Verlauf für verschiedene $p = \tau_A/\tau_K$ ist in Fig. 6 eingezeichnet.

Erhöhung der Überspannung pro 10 m Ableiterdistanz

Tabelle II

| | Kabellänge | | |
|--------------------------------------|------------|-------|-------|
| | 50 m | 100 m | 200 m |
| <i>Scheitelwert 1,5 MV</i> | | | |
| U_T $a = 0, b = 0^1)$ | kV 715 | 680 | 670 |
| ΔU_T $0 < a < 30$ m, $b = 0$ | % 10 | 8 | 6,5 |
| ΔU_T $0 < b < 30$ m, $a = 0$ | % 8 | 6,5 | 6 |
| <i>Scheitelwert 1,05 MV</i> | | | |
| U_T $a = 0, b = 0^1)$ | kV 625 | 610 | 605 |
| ΔU_T $0 < a < 30$ m, $b = 0$ | % 8 | 5,5 | 4 |
| ΔU_T $0 < b < 30$ m, $a = 0$ | % 6 | 4,5 | 3 |

Die Steilheit beträgt 1,2 MV/ μ s. Eine Steilheit von 0,6 MV/ μ s ergibt nur für 200-m-Kabel wesentlich kleinere Werte.

¹⁾ gemäss Fig. 1.

Die Forderung, den Ableiter mit Abstand null am Endverschluss zu montieren, ist leider praktisch selten realisierbar. Sowohl eine kleine Längs- wie Querdistanz wird benötigt, um den Apparat überhaupt aufzustellen. Aus der Überlegung, dass in erster Näherung nur das Laufzeitverhältnis Kabel/Freileitung massgebend ist, wird der Einfluss einer Montagedistanz umso kleiner, je länger das Kabel ist.

Tabelle II gibt die Erhöhung der Überspannung pro 10 m Ableiterdistanzierung vom Endverschluss in % der Überspannung bei idealer Aufstellung (Abstand = 0) an. Für die Kombination von Längs- (a) und Querdistanz (b) liegt die Überspannung unter der Summe der entsprechenden Werte.

Eine letzte Betrachtung gilt dem Einfluss der Transformatorkapazität. Erwartungsgemäss zeigt sich eine Reduktion der Spannung beim Vergrössern der Kapazität C_T , dies besonders bei kurzen Kabellängen. Die gemessenen Differenzen der Transformatorspannung U_T bei Änderung der Kapazität von 1 auf 5 nF sind in Tabelle III zusammengefasst.

Bei einer Kabellänge von 200 m ist der Einfluss einer Änderung der Transformatorkapazität von 4 nF bereits vernachlässigbar klein.

3.2 Schutz mit Funkenstrecken

An die Stelle des Ableiters tritt hier die Funkenstrecke als Schutzorgan. In Fig. 7 sind die Messresultate zusammengestellt.

Der Verlauf bei zunehmendem Abstand zeigt zuerst dasselbe Verhalten wie beim Ableiter, nur liegen die Spannungen

Änderungen der Transformatorspannung U_T bei Erhöhung der Kapazität C_T

Tabelle III

| Kabellänge | 50 m | 100 m | 200 m |
|---|------|-------|-------|
| Änderung von U_T bei Erhöhung von C_T von 1 auf 5 nF | -5% | -2,5% | -1% |
| Messbedingungen: Frontsteilheit: 0,6...1,2 MV/ μ s, Scheitelwert Stoßspannung: 1,5 MV. | | | |

wesentlich höher, entsprechend der hohen Ansprechcharakteristik der Funkenstrecke in Fig. 3. Bei einer bestimmten, von Frontsteilheit und Scheitelwert des Stosses abhängigen Distanz tritt ein grosser Sprung im Verlauf der Spannung ein. Dieses Verhalten ist an Hand von Fig. 8 leicht erklärbar.

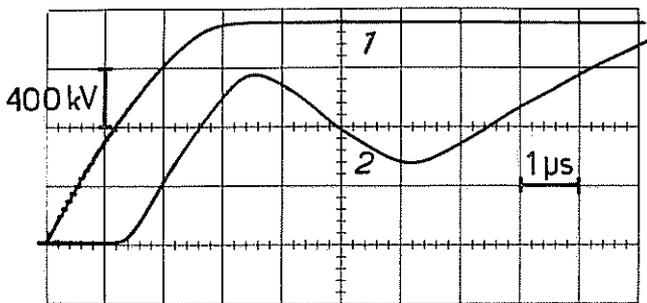


Fig. 8

Spannungsverlauf auf einer mit 100 m Kabel endenden Freileitung 1 ankommende Spannungswelle; Scheitelwert der Spannung 1,5 MW, Steilheit 0,6 MV/ μ s. 2 Spannungsverlauf auf der Freileitung in einer Distanz von 300 m vom Kabelendverschluss (ohne Ableiter und Funkenstrecke)

Auf der Freileitung lässt sich folgendes Wellenspiel beobachten. Die Spannung steigt gemäss der Steilheit der ankommenden Welle. Nach der doppelten Laufzeit zwischen Beobachtungspunkt und Kabelendverschluss kommt jedoch die erste Reflexion vom Kabel her, welche eine starke Absenkung der Spannung bewirkt. Erst nach der doppelten Kabellauzeit steigt die Spannung entsprechend dem Aufladevorgang des Kabels wieder an. Wird dieser Verlauf mit der Ansprechcharakteristik der Funkenstrecke verglichen, so zeigt es sich, dass ein Überschlag bei nahen Distanzen erst im zweiten, langsameren Anstieg der Spannung erfolgen kann. Mit zunehmender Entfernung der Funkenstrecke vom Kabelendverschluss gibt es einen von der Frontsteilheit der Welle abhängigen Abstand, von dem die Ansprechspannung bereits in der Front erreicht wird. Dieser Übergang bewirkt den Sprung in den Kurven von Fig. 7. Aus der Ansprechcharakteristik lassen sich für die gewählten Stoßspannungen theoretisch die genauen, kritischen Distanzen herauslesen (Tabelle IV).

Kritische Distanzen

Tabelle IV

| Scheitelwert der Stossspannung MV | Frontsteilheit MV/ μ s | Minimale Distanz für das Ansprechen der Funkenstrecke beim ersten Wellendurchgang m |
|-----------------------------------|----------------------------|---|
| 1,5 | 1,2 | 180 |
| | 0,6 | 300 |
| | 0,3 | 490 |
| 1,05 | 1,2 und 0,6 | 400 |
| | 0,3 | 490 |
| 0,52 | 1,2, 0,6, 0,3 | ∞ |

Die Messungen zeigen angenähert diese Werte. Abweichungen rühren von der nicht genau realisierbaren Spannungsfrente her.

Der starke Spannungssprung lässt sich aus der kleinen Restspannung erklären. Sind beim Ableiter Ansprech- und Restspannung praktisch fast gleich, so zeigt die Funkenstrecke weit auseinanderliegende Werte, indem die Restspannung (Lichtbogenanspannung) gegenüber der Ansprechspannung fast verschwindet. Von grösserer Bedeutung erscheint jetzt wieder der Erdungswiderstand, der multipliziert mit dem Ableitstrom einen Spannungsabfall bewirkt. Bei einem Scheitelwert der Stoßspannung von 1,5 MV und einem Erdungswiderstand von 20 Ω erreicht die Mastspannung 75 kV. Dieser Wert ist verglichen mit der Ansprechspannung immer noch sehr klein. Messungen mit verschiedenen Masterdungswiderständen haben gezeigt, dass dieser Parameter keinen Einfluss auf die Transformatorspannung ausübt, d. h. dass die Ansprechspannung verantwortlich ist für die Überspannung und nicht die Restspannung.

Bei einer Stoßspannung von 0,52 MV kann nie ein Ansprechen des Ableiters in der Front stattfinden, der Schutz wird erst wirksam, wenn sich das Kabel nach vielen Laufzeiten über diesen Wert hinaus geladen hat. Im Gegensatz zu den Feststellungen beim Ableiter zeigen sich beim Schutz mit Funkenstrecken die höheren Überspannungen bei tieferen Stoßscheitelwerten.

Zwei Beispiele des Spannungsverlaufes am Transformator beim Schutz mit Funkenstrecken werden in Fig. 9 gezeigt.

Die Schwingung aus Leitungsinduktivität und Kabelkapazität bei einer quasistationären Betrachtung ist ein typisches Merkmal des Funkenstreckenschutzes. Die aus der Schwingung resultierende grosse Spannungsänderung pro Zeiteinheit am Transformator (du/dt) kann eine Gefährdung des Transformators darstellen. Befinden sich aber Funkenstrecken weiter weg, z. B. wie in Fig. 9B, so erscheint neben der wesentlich kleineren Amplitude auch ein viel kleineres du/dt infolge der tiefen Schwingfrequenz. Eine Distanzierung ist somit von doppeltem Vorteil.

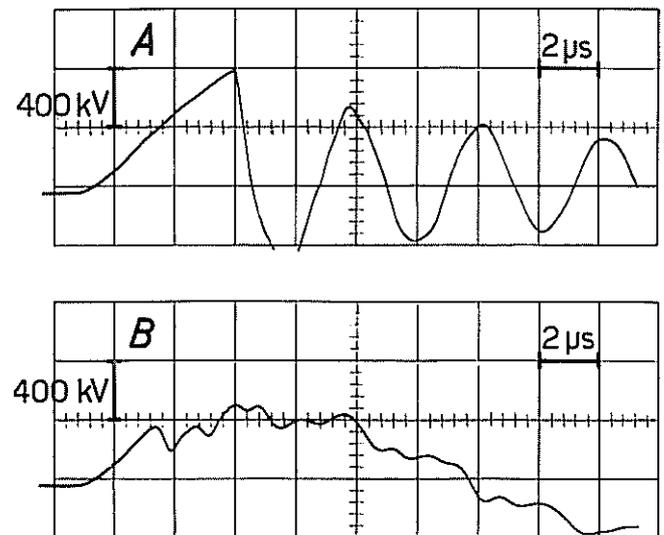


Fig. 9

Spannungsverlauf am Transformator beim Schutz mit einer Funkenstrecke Distanz der Funkenstrecke vom Kabelendverschluss: A 10 m, B 500 m; Stoss: Scheitelwert der Stoßspannung 1,05 MW, Steilheit 0,6 MV/ μ s; Kabellänge: 100 m

3.3 Schlussfolgerungen über die Schutzwirkung von Ableitern und Funkenstrecken bei weit entferntem Blitzeinschlag

Funkenstrecken stellen einen wirksamen Schutz gegen hohe Überspannungen aus weit entfernten Blitzeinschlägen dar. Der Aufstellungsort ist dabei nicht der Kabelendverschluss, sondern es sollten wenn möglich die drei letzten Masten mit solchen ausgerüstet werden. Dadurch gelingt es, die Überspannung am Transformator bei hohen Werten der einlaufenden Welle unter 700 kV zu halten, indem die am weitesten entfernte Funkenstrecke anspricht. Der Ableiter erhält in diesem Fall die Ansprechspannung nicht mehr oder zu spät, um eine weitere Reduktion von U_T zu bewirken. Ein guter Ableiter mit einer Restspannung von 590 kV vermag bei idealer Aufstellung dicht am Endverschluss, allein ohne Funkenstrecke die Spannung auch auf 700 kV zu begrenzen. Bei einer kleinen, praktisch unvermeidbaren Montagedistanz tritt jedoch bereits eine wesentliche Erhöhung der Überspannung auf, dies besonders bei kurzen Kabellängen (s. auch Tabelle II).

Tiefere Stosswellen, in der Grösse von 0,6 MV, zeigen in bezug auf die Schutzart gerade ein umgekehrtes Verhalten. Die nahen Funkenstrecken lassen am Transformator noch Überspannung von 700...750 kV zu. Ein vorhandener Ableiter würde jedoch vorher ansprechen und damit die Überspannung am Transformator ungefähr auf Werte begrenzen, welche die Restspannung nicht mehr wesentlich übersteigen.

4. Naher Blitzeinschlag

Wie bereits erwähnt, wird in den folgenden Untersuchungen auf eine bestimmte Spannungsform verzichtet. Massgebende Grösse sei ein Strom mit definierter Form, den der Blitz am Einschlagsort aufdrückt. Dabei gilt die folgende Annahme: Der Blitz treffe das oberste Phaseisil und führe sofort zum Überschlag auf das Erdseil oder auf den Mast. Die kurze Spannungsspitze, die infolge der Ansprechverzögerung entsteht, wird vernachlässigt mit der Begründung, dass solche extrem kurzen Spannungsspitzen durch Verluste stark gedämpft und durch das Kabel auf ungefährliche Werte abgesenkt werden. Somit ist es erlaubt, das richtig nachgebildete Phasen- und Erdseil an der Einschlagstelle kurzzuschliessen.

Da sowohl Form wie Amplitude des Blitzes verschiedene Resultate ergeben, erscheint eine Behandlung der Überspannung getrennt nach den 4 vorstehend gewählten Blitzströmen zweckmässig.

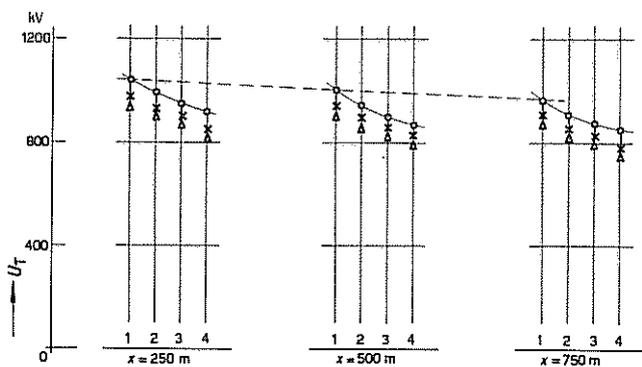


Fig. 10
Transformatorspannung U_T beim Schutz mit einem Ableiter am Kabelendverschluss in Funktion der Blitzeinschlagdistanz x
Kabellängen: 1 50 m; 2 100 m; 3 200 m; 4 400 m
Stärke des Blitzstromes: 100 kA
Stossform: 1/100 μ s
Masterdungswiderstände:
 Δ 5 Ω \times 10 Ω \circ 20 Ω

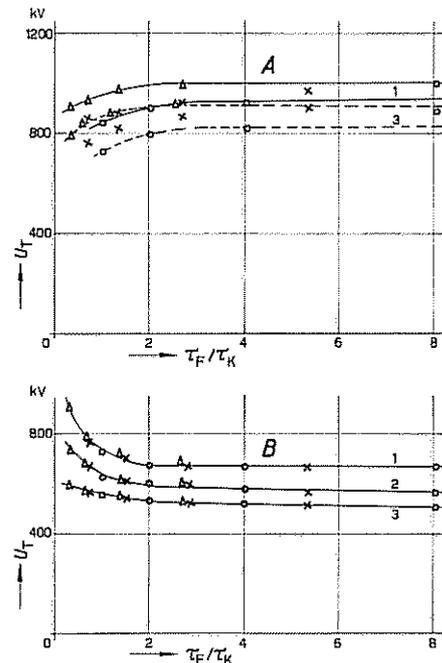


Fig. 11
Transformatorspannung U_T beim Schutz mit Ableiter am Kabelendverschluss in Funktion des Laufzeitverhältnisses τ_F/τ_K
A Masthöhe 40 m; B Masthöhe 0 m
 τ_K Laufzeit im Kabel; τ_F Laufzeit auf der Freileitung zwischen Kabelendverschluss und Einschlagstelle
Stärke des Blitzstromes: 100 kA
Stossform: 1/100 μ s
Einschlagstellen: Δ 250 m; \times 500 m; \circ 750 m;
Masterdungswiderstände:
A: 1 20 Ω (—), 3 5 Ω (---)
B: 1 20 Ω , 2 10 Ω , 3 5 Ω

4.1 Blitz: Stossform 1/100 μ s, Scheitelwert des Blitzstromes 100 kA

4.1.1 Ableiter am Kabelendverschluss, keine Funkenstrecken an den Masten

In Fig. 10 sind die gemessenen Transformatorspannungen angegeben für Blitzeinschläge in die ersten, dem Kabelendverschluss vorgelagerten Masten von 40 m Höhe. Die Resultate sind auch gültig für Leitungseinschläge in die unmittelbare Umgebung des entsprechenden Mastes.

Die auffälligsten Erscheinungen sind dabei die folgenden:

- Bei kurzen Kabellängen liegt die Überspannung immer höher als bei längeren, und zwar unabhängig von der Einschlagstelle.
- Mit zunehmender Distanz des Einschlagpunktes vom Kabelendverschluss nimmt die Spannung nur wenig ab.
- Der Einfluss des Erdungswiderstandes ist nicht sehr gross.

Fig. 11 A zeigt die Überspannungen von Fig. 10 in Funktion des Laufzeitverhältnisses Kabelendverschluss-Einschlagpunkt zu Kabel. Dieser Verlauf entspricht nicht dem aus [3] bekannten Bild und bedarf daher einer näheren Untersuchung.

Für die theoretische Betrachtung werden die folgenden Vereinfachungen vorgenommen:

- Rechteckförmiger Blitzstrom I_B ;
- Mast ersetzt durch einen Ohmschen Widerstand entsprechend dem Erdungswiderstand R_E (Mastlänge = 0);
- Kein Erdseil.

Steht der Ableiter direkt neben dem Endverschluss, so sind in Fig. 12 die nach dem Wellenfahrplan berechneten Überspannungen am Transformator in Funktion der Mastspannung am Einschlagpunkt für verschiedene Laufzeitverhältnisse gegeben. Mit unendlich steiler Front unter Vernachlässigung der Verluste ist die Spannung wie erwartet nur eine Funktion des

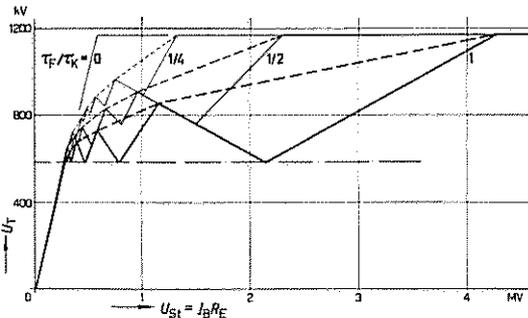


Fig. 12

Theoretisch berechnete Transformatorspannung U_T beim Schutz mit idealem Ableiter am Kabelendverschluss in Funktion der Spannung U_{St} am Einschlagspunkt

U_A Ansprech- bzw. Restspannung; I_B Scheitelwert des Blitzstromes; R_E Masterdungswiderstand

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 11

Laufzeitverhältnissen und nicht der absoluten Längen. Im Verlauf der Kurven treten die bereits besprochenen, aus dem Wellenspiel erklärbar Maxima und Minima auf. Die Umhüllende der Maxima ist für den Fall der kleinen Distanz des Ableiters richtig, wobei aber diese Werte schmale Spannungsspitzen von doppelter Distanzlaufzeit bedeuten.

In dieser vereinfachten theoretischen Betrachtung erscheint als wichtigstes Resultat die Tatsache, dass bei abnehmender Distanz der Einschlagsstelle vom Kabelendverschluss, d. h. bei kleiner werdendem τ_F/τ_K die Überspannung rasch ansteigt. Der Vergleich mit den Messungen (Fig. 11A) zeigt deutlich, dass eine der vorgenommenen Vereinfachungen nicht zulässig ist. Sowohl im obigen theoretischen Fall wie in den bis jetzt erschienenen Veröffentlichungen wurde die Mastlänge vernachlässigt und nur der Masterdungswiderstand berücksichtigt. Modellmessungen mit Mastlänge = 0 (Fig. 14B) zeigen sofort

das theoretisch erwartete Resultat: Die Spannungen steigen bei Laufzeitverhältnissen, die kleiner als 2 sind, rasch an.

4.1.2 Ableiter am Kabelendverschluss, Funkenstrecken an den ersten Masten

Aus den Messungen geht die Mastlänge als wichtiger, nicht zu vernachlässigender Faktor hervor. Er bewirkt, dass die Spannung am Einschlagsort nicht sofort auf die aus Maststrom mal Erdungswiderstand gegebene Grösse absinkt. Die vom Einschlagsort ausgehenden Spannungswellen weisen dann sehr hohe Anfangsspitzen auf. Die Vermutung liegt nahe, dass dadurch weitere Funkenstrecken ansprechen können. Bei einem Einschlag in 750 m Distanz vom Kabelendverschluss sind in Fig. 13 die Spannung zwischen Phaseenseil und Erdseil, d. h. an der Funkenstrecke, gegeben. Die Kabellänge beträgt 200 m, die Erdungswiderstände der Masten 10Ω .

Die Spannung weist eine sehr kurze Anfangsspitze auf. Verglichen mit der Ansprechcharakteristik dürfte die Grösse von

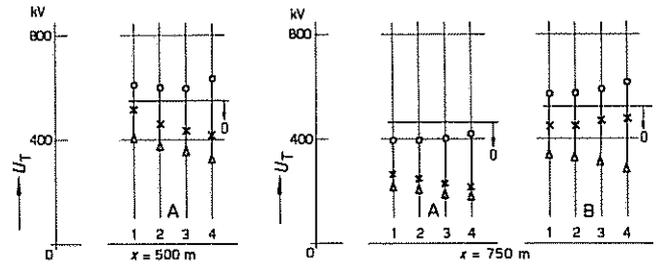


Fig. 14

Transformatorspannung U_T beim Schutz mit Ableiter am Kabelendverschluss in Funktion der Blitzzeinschlagdistanz x
Angaben siehe Fig. 10

Weitere Überschlüge: A bei Mast in 250 m, B bei Mast in 500 m Distanz

0: unter dieser Spannung hat der Ableiter nicht mehr angesprochen

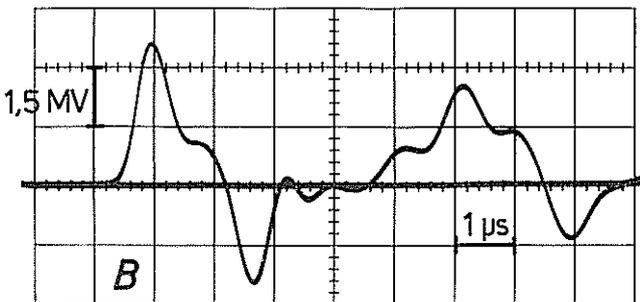
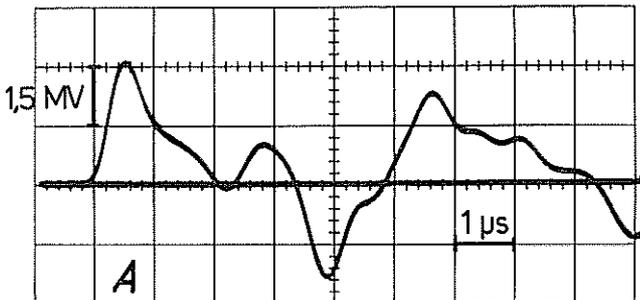


Fig. 13

Verlauf der Spannung zwischen Phase und Erdseil am Mast in 500 m (A) und 250 m (B) Entfernung vom Kabelende bei einem Blitzzeinschlag in 750 m Entfernung vom Kabelendverschluss (Ableiter am Kabelendverschluss)

Stärke des Blitzstromes: 100 kA

Stossform: $1/100 \mu s$

Masterdungswiderstand: 10Ω

Kabellänge: 200 m

über 3 MV zum Ansprechen führen. Modellmessungen mit obiger Annahme zeigen, dass Funkenstrecken, die vom Einschlagspunkt aus in Richtung Freileitung entfernt liegen, die Spannung am Transformator nicht zu senken vermögen; umgekehrt wirken sich Funkenstrecken zwischen Kabelendverschluss und Einschlagsstelle äusserst günstig aus, wie die Messungen von Fig. 14 zeigen. Es gelingt dadurch auch bei höheren Masterdungswiderständen die Spannung unter 650 kV zu halten; der Ableiter spricht teilweise überhaupt nicht mehr an. Es ist somit möglich, Einschläge in den 2. und 3. Mast mit Hilfe der Funkenstrecken zu meistern.

Ungünstig liegen die Verhältnisse beim Einschlag in den ersten Mast: Rückwärtige Funkenstrecken sprechen wohl noch an, nützen aber, wie bereits erwähnt, nichts mehr. Ein Weg zur Verbesserung liegt in der Reduktion der Masthöhe, sofern es gelingt, den Masterdungswiderstand auf höchstens 10Ω zu reduzieren. Fig. 15 zeigt einen Vergleich der auftretenden Spannungen bei verschiedenen Masthöhen. Bei der gewählten Stossform von $1/100 \mu s$ ist es zulässig, bei einer Reduktion der Masthöhe von 40 auf 20 m den Einfluss dieser Länge zu vernachlässigen.

Schliesslich soll der Fall betrachtet werden, wo der Blitz nicht mehr in Mastnähe einschlägt, sondern in der Mitte der Spannweite. Bei dieser Variante war es aus rein praktischer Gründen nicht möglich, den Strom mit der Frontzeit von $1 \mu s$ aufzudrücken. Die Messungen mit einer Frontdauer von $2 \mu s$ und einem Scheitelwert des Stromes von 100 kA sind in Fig. 16 dargestellt. Dabei gilt folgende Annahme: Der Blitz schlägt ir

die Mitte der Spannweite und führt an den benachbarten Masten sofort zum Überschlag. Als gefährlichster Fall erweist sich naturgemäß ein Einschlag in die erste Spannweite. Am Transformator erscheint dann die doppelte Restspannung des Ableiters. Ausser der wahrscheinlichen Zerstörung des Ableiters [5] bewirkt ein Einschlag in die erste Spannweite auch die Zerstörung des Transformators. Mit Hilfe von zwei von den Phasenleitern gut distanzierten Erdseilen sollte diese Gefahr zu beheben sein, sofern Masterdungen von ca. 10Ω realisiert werden können.

Einschläge in die folgenden Spannweiten sind weniger gefährlich als direkte Masteinschläge, wie Fig. 16 zeigt. Die Erklärung ist in der Stromaufteilung zu suchen, indem die benachbarten Masten praktisch nur je die Hälfte des Blitzstromes erhalten.

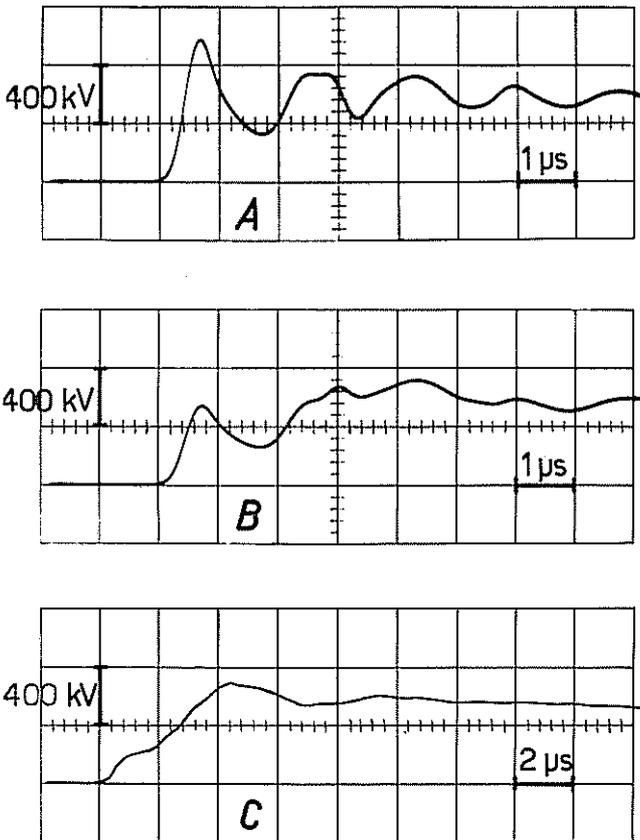


Fig. 15

Spannung am Transformator bei Blitzschlag in den ersten Masten in 250 m Entfernung vom Kabelendverschluss

Stärke des Blitzstromes: 100 kA
Stossform: 1/100 μ s
Masthöhen: A 40 m, B 20 m, C 0 m
Masterdungswiderstand: 10Ω
Kabellänge: 200 m

4.2 Blitz: Stossform 10/100 μ s, Scheitelwert des Blitzstromes 100 kA

4.2.1 Ableiter am Kabelendverschluss, Funkenstrecke an den Masten

In Fig. 17 sind wieder Transformatorüberspannungen eingezeichnet, unter der Annahme eines Einschlages in das Phasenseil, mit sofortigem Überschlag auf den Masten.

Die Folgerungen aus den theoretischen Betrachtungen des vorhergehenden Abschnittes, welche die Masthöhe nicht berücksichtigten, werden hier gut bestätigt. Die langsam ansteigende Front lässt dem Wellenspiel auf dem Mast genügend Zeit sich auszugleichen, wirksam bleibt daher nur noch der

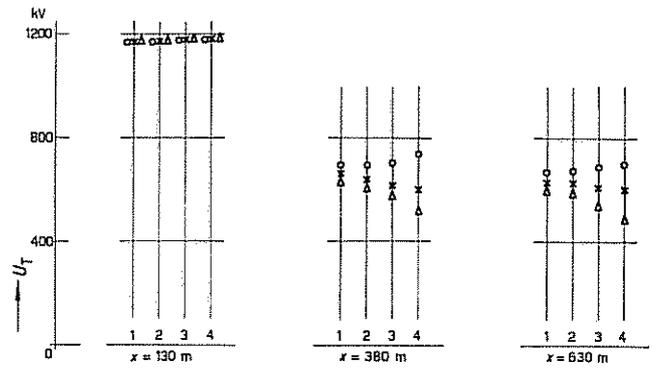


Fig. 16

Transformatorspannung U_T beim Schutz mit Ableiter am Kabelendverschluss in Funktion der Einschlagdistanz x

Einschlag in die Mitte der Spannweite

Stärke des Blitzstromes: 100 kA

Stossform: 2/100 μ s

Kabellängen und Masterdungswiderstände wie in Fig. 10

Masterdungswiderstand. Je länger das Kabel, um so höher liegt die Spannung bei nahen Einschlägen. Die Spannungen von Fig. 17 liegen etwas unter den Werten, die beim 1/100- μ s-Stoss bei Masthöhe null gemessen werden. Innerhalb der 10- μ s-Front können bereits die benachbarten Masterdungen über das Erdseil wirksam werden.

Weitere, dem Einschlagsort benachbarte Funkenstrecken kommen nicht zum Ansprechen. Die gemessenen Werte erfahren somit keine weitere Reduktion. Der Schutz für den Transformator liegt somit nur in einem tiefen Erdungswiderstand pro Mastfuss, wobei bereits mit 10Ω die Spannung unter 700 kV bleibt.

Die Messungen bei einem Blitzschlag in die Mitte der Spannweite zeigen auch hier deutlich, dass die erste Spannweite so gut wie möglich gegen direkte Einschläge geschützt werden muss. Einschläge in die folgenden Spannweiten sind weniger gefährlich als die Einschläge direkt in der Nähe der Masten.

Die Resultate gelten bei idealer Aufstellung des Ableiters am Endverschluss. Wird der Einfluss einer Montagedistanz untersucht, so zeigt sich, dass innerhalb einer Länge von 20...30 m praktisch nur die absolute Distanz des Ableiters vom Endverschluss von Bedeutung ist. D. h. es spielt keine Rolle, ob er im Zuge der Freileitung oder z. B. in deren Verlängerung steht. Eine quasistationäre Betrachtung bestätigt dies. Die Spannungserhöhungen zeigen im Falle von 500 m Einschlagsdistanz die folgenden Werte pro 10 m:

50 m Kabel 3 % Erhöhung
400 m Kabel 1,5 % Erhöhung

Die entsprechenden Werte bei sehr weit entferntem Blitzschlag (Tabelle II) liegen fast doppelt so hoch.

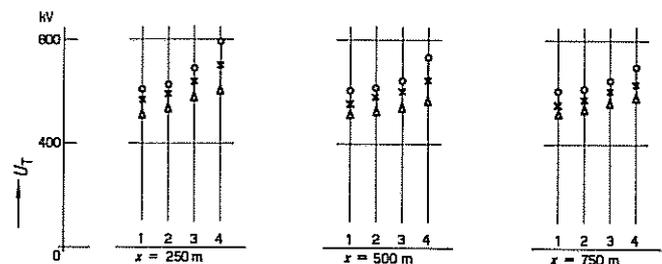


Fig. 17

Wie Fig. 16, aber für eine Stossform des Blitzes von 10/100 μ s
Bezeichnungen siehe Fig. 10

Auch diese Messungen bestätigen die Annahme, dass für den besten Schutz der Ableiter so nahe wie möglich am Endverschluss stehen soll.

4.3 Scheitelwert des Blitzstromes 30 kA; Stossform 1/100 µs und 10/100 µs

4.3.1 Ableiter am Kabelendverschluss

Die gemessenen Überspannungen U_T sind in Tabelle V zusammengestellt.

Gemessene Überspannungen

Tabelle V

| Erdungswiderstand R_E | 5 Ω | 10 Ω | 20 Ω |
|-------------------------|---|---|---|
| Stoss 1/100 µs, 30 kA | kein Ansprechen des Ableiters $U_T \leq 450$ kV | kein Ansprechen des Ableiters $U_T \leq 520$ kV | der Ableiter spricht an $U_T \leq 560$ kV |
| Stoss 10/100 µs, 30 kA | kein Ansprechen des Ableiters $U_T \leq 250$ kV | kein Ansprechen des Ableiters $U_T \leq 350$ kV | kein Ansprechen des Ableiters $U_T \leq 520$ kV |

Die Werte sind Maxima. Die betrachteten Parameter sind dabei:
 Einschlagsdistanz: 250 m, 500 m, 750 m
 Kabellänge: 50 m, 100 m, 200 m, 400 m

Ein Blitzschlag mit einem Scheitelwert des Stromes von 30 kA erweist sich somit als ungefährlich. Ausser im Fall von 20 Ω, Stoss 1/100 µs, spricht der Ableiter nicht einmal an. Ein Einschlag in das Erdseil wird nur bei sehr steilem Stromanstieg zu einem Überschlag führen.

4.4 Schlussfolgerungen über Schutzwirkung von Ableitern und Funkenstrecken bei nahen Blitzeinschlägen

Die Messungen zeigen, dass nahe Blitzeinschläge weitaus höhere Überspannungen bewirken als weit entfernte, die sich nur durch eine einlaufende Spannungswelle bemerkbar machen. Die dort gefundenen Schutzmassnahmen haben sich auch hier als beste Lösung bestätigt, nämlich:

- Schutzfunkenstrecken an drei dem Kabelendverschluss vorgelagerten Freileitungsmasten;
- Ableiter so nahe wie möglich am Kabelendverschluss.

Als zusätzlicher Parameter von grosser Bedeutung erweist sich der Masterdungswiderstand. Die grössten zulässigen Erdungswerte, die nötig sind, um die Transformatorspannung unter 700 kV zu halten, sind in der Tabelle VI zusammengestellt.

Maximal zulässige Erdungswiderstände

Tabelle VI

| Einschlagstelle | 250 m | 500 m | 750 m |
|------------------|-------------------------|-------|-------|
| | Erdungswiderstände in Ω | | |
| Kabellänge: 50 m | 20 | 20 | 20 |
| 100 m | 20 | 20 | 20 |
| 200 m | 10 | 20 | 20 |
| 400 m | 10 | 10 | 20 |

Blitzstrom: 100 kA, 10/100 µs.
 Ableiterrestspannung: 590 kV.

Diese Bedingungen sind auch gültig für die Blitzstromform 1/100 µs, sofern der erste Mast nicht zu hoch ist (≤ 20 m). Eine gute Erdung des ersten Mastes ist besonders wichtig.

Die erste Spannweite lässt sich mit zwei in genügender Distanz von den Phasenseilen angeordneten Erdseilen gegen direkte Phaseneinschläge und Rücküberschläge schützen. Diese Massnahme ist auch nötig, um die Ableiter vor Überlastungen zu schützen.

5. Isolationsniveau, Gefährdungswahrscheinlichkeit

Die wirksame Erdung des Transformatorsternpunktes erlaubt die Anwendung einer reduzierten Ableiternennspannung [10; 11]. Das genormte Schutzniveau sinkt damit auf 680 kV. Es ist heute möglich, Ableiter einer Nennspannung von 200 kV mit einer Restspannung von 590 kV herzustellen. Dieser Wert war auch die Grundlage der durchgeführten Untersuchungen.

Bei der gleichzeitigen Anwendung von Funkenstrecken und neuen Ableitertypen scheint es theoretisch möglich, die reduzierte Transformatorisolation [12] anzuwenden, sofern die Masterdungswiderstände genügend tiefe Werte haben. Besonders diese letzte Anforderung ist aber vielerorts schwer realisierbar. Es nützt leider wenig, ein Bodenseil vom letzten Mast an die Anlageerde zu legen, da diese Verbindung für rasche Vorgänge viel zu induktiv ist. Gelingt es nicht, den Masterdungswiderstand gegenüber Stossvorgängen tief zu halten, so ist es zweckmässig, Transformatoren mit direkter Kabeleinführung voll zu isolieren.

Für den Fall schlechter Masterdungen soll noch die Wahrscheinlichkeit der Blitzgefährdung untersucht werden [13; 14]. Nach den Beobachtungen auf dem Monte San Salvatore im Tessin ist pro km² mit ca. 5 Blitzen im Jahr zu rechnen. Die Stromstärken sind bei 22,5 % über 50 kA und bei 2,5 % über 100 kA. Eine Trassebreite von 200 m (Einzugsgebiet für stromstarke Blitze [13] ergibt für die Fläche über zwei Spannweiten von 250 m 0,1 km². Die Rechnung zeigt nun, dass alle 9 Jahre ein Blitz über 50 kA oder alle 80 Jahre ein Blitz über 100 kA in die zwei kritischen Spannweiten zu erwarten ist.

Diese Zahlen sind zu beachten, wenn es darum geht, zwischen der zulässigen Gefährdung und dem möglichen Aufwand zu deren Behebung die Wahl zu treffen.

6. Zusammenfassung

Die vielen zu berücksichtigenden Varianten verunmöglichen die Angabe einer einfachen, absolut sicheren Schutzmassnahme. Es liegt im Ermessen des Ingenieurs, einen Mittelweg zwischen dem Aufwand für Schutzmassnahmen und der nach seiner Ansicht noch zulässigen Gefahrenwahrscheinlichkeit zu finden. Die getroffenen Massnahmen bieten dann eine teilweise bis volle Sicherheit je nach den Umständen, wobei als wichtigster Parameter die Einschlagsdistanz des Blitzes vom Kabelendverschluss erscheint. Die im folgenden gegebenen Zahlenwerte gelten für eine 220-kV-Anlage.

Wird das Phasenseil der ersten Spannweite getroffen, sei es nun direkt oder als Rücküberschlag, so führt die Überspannung in der Höhe der doppelten Ableiterrestspannung auch bei kleineren Blitzströmen zur Zerstörung des Transformators. Weder Funkenstrecken noch Ableiter gewähren hier einen ausreichenden Schutz; Ableiter können infolge Überlastung noch selbst zerstört werden. Zwei Erdseile, mit möglichst grosser Distanz über den Phasenleitern angeordnet, vermögen einen Grossteil der Blitze gefahrlos abzuleiten.

Bei einem Einschlag in den ersten Masten vor dem Kabelendverschluss erweisen sich Blitzstromsteilheiten und Amplitude neben Kabellänge und Masthöhe von ausschlaggebender Bedeutung. Kann in einem 50-kV-Netz die Masthöhe ohne

weiteres vernachlässigt werden, so ist dies bei 220 kV und höheren Spannungen nicht mehr zulässig. Zu hohe Masten wirken bei raschem Stromanstieg zuerst als Wellenwiderstand; erst nach einigen Mastlaufzeiten sinkt dieser Wert auf den Masterdungswiderstand ab. Die Messungen haben gezeigt, dass für den 1/100- μ s-Stoss bei einer Masthöhe von 20 m bereits mit dem Erdungswiderstand allein gerechnet werden darf. Dieser Widerstand erhält somit eine ausschlaggebende Bedeutung. Eine Grenze der Transformatorüberspannung von 700 kV erfordert den maximalen Masterdungswiderstand von $\leq 10 \Omega$ (Ableiterrestspannung 590 kV).

Die Höhe des *zweiten und der folgenden Masten* vor dem Kabelendverschluss ist nicht mehr ausschlaggebend, indem bei grosser Blitzstromsteilheit weitere Funkenstrecken zwischen Einschlagspunkt und Kabelendverschluss ansprechen und dadurch die Überspannung senken. Für eine Transformatorüberspannung unter 700 kV sind die folgenden maximalen Masterdungswiderstände zulässig:

- $\leq 10 \Omega$ für Maste, die innerhalb der doppelten Kabellänge vom Endverschluss aus stehen;
- $\leq 20 \Omega$ für die folgenden.

Diese für einen Blitzstrom von 100 kA notwendigen Werte sind als Ersatzwiderstände der Mastfüsse gegenüber Stossvorgängen zu verstehen.

Der weitaus häufigste Fall wird jedoch der *entfernte Blitzeinschlag* sein. Gerade hier ist aber die einfachste Massnahme äusserst wirkungsvoll: Werden die drei letzten Masten vor dem Kabelendverschluss mit den heute üblichen Funkenstrecken (im 220-kV-Netz 1,05 m Schlagweite) ausgerüstet, so lässt sich die Überspannung am Transformator auf 700 kV begrenzen. Dies ist auch dann möglich, wenn die Masterdungswiderstände nicht die vorher geforderten, tiefen Werte aufweisen. Die weitest entfernte Funkenstrecke spricht bei hohen einlaufenden Spannungen an, die nahen Funkenstrecken schützen bei kleiner Wellenspannung. Nur im zweiten Fall kann der Ableiter, sofern die Restspannung wesentlich unter 700 kV liegt, die

Spannung am Transformator noch etwas tiefer senken als die Funkenstrecke. In den andern Fällen spricht der Ableiter gar nicht mehr an, die Funkenstrecken übernehmen die volle Schutzfunktion.

Literatur

- [1] *W. Waste*: Überspannungsbeanspruchung von Stationen bei Kabeleinführungen. Deutsche Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen, Technischer Bericht Nr. 192, Nellingen/Esslingen a/N. 1959.
- [2] *J. A. Giaro*: Surtensions aux extrémités d'un câble raccordé à une ligne aérienne frappée de coups de foudre au delà de la zone critique. Rapport CIGRE 310, 1964.
- [3] *M. Christoffel, E. Fischer und G. Hosemann*: Überspannungsschutz von Transformatoren mit direkt eingeführtem Kabel bei Blitzschlag in die vorgelagerte Freileitung. ETZ-A 83(1962)23, S. 761...772.
- [4] *U. Burger*: Elektrische Wirkung von Erdseilen, ihre Berechnung und Nachbildung im Modell. Dissertation der ETH Nr. 3472, Zürich 1964.
- [5] *U. Burger*: Nahzonenerdseile zum Schutze von Überspannungsableitern gegen Blitzstrom-Überlastungen. Bull. SEV 55(1964)12, S. 578...585.
- [6] *K. Berger und E. Vogelsanger*: Messungen und Resultate der Blitzforschung der Jahre 1955...1963 auf dem Monte San Salvatore. Bull. SEV 56(1965)1, S. 2...22.
- [7] *M. Ozkaya*: Die Stosskennlinie von trockenen und beregneten Isolieranordnungen mit Stoßspannungen verschiedener Steilheit. Deutsche Studiengesellschaft für Hochspannungsanlagen, Technischer Bericht Nr. 209, Nellingen/Esslingen a/N. 1965.
- [8] *L. V. Bewley*: Traveling Waves on Transmission Systems. Trans. AIEE 50(1931)2, S. 532...550.
- [9] *M. A. Mauduit*: Méthode graphique de Bergeron pour l'étude de la propagation des ondes le long des lignes électriques. Rev. gén. Electr. 63(1954)4, S. 191...221.
- [10] *Recommandations pour les parafoudres. Première partie: Parafoudres à résistance variable.* Commission Electrotechnique Internationale, Publication 99-1, Genève 1958.
- [11] *Regeln für Überspannungsableiter.* Publikation des SEV 3004.1960, Zürich 1960.
- [12] *Regeln für Transformatoren.* Publikation des SEV 0189.1956, Zürich 1956.
- [13] *F. Schwab*: Blitzsichere Freileitungen. Bull. SEV 55(1964)3, S. 87...90.
- [14] *K. Berger*: Elektrische Anforderungen an Höchstspannungs-Leitungen. Bull. SEV 54(1963)18, S. 749...755.

Adresse des Autors:

Dr. sc. techn. *U. Burger*, Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen, Seefeldstrasse 301, 8008 Zürich.