Nahzonenerdseile zum Schutze von Überspannungsableitern gegen Blitzstrom-Überlastungen

Autor(en): **Burger, U.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins : gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)**

Band (Jahr): **55 (1964)**

Heft 12

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-916728

Nutzungsbedingungen

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

Haftungsausschluss

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

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

http://www.e-periodica.ch

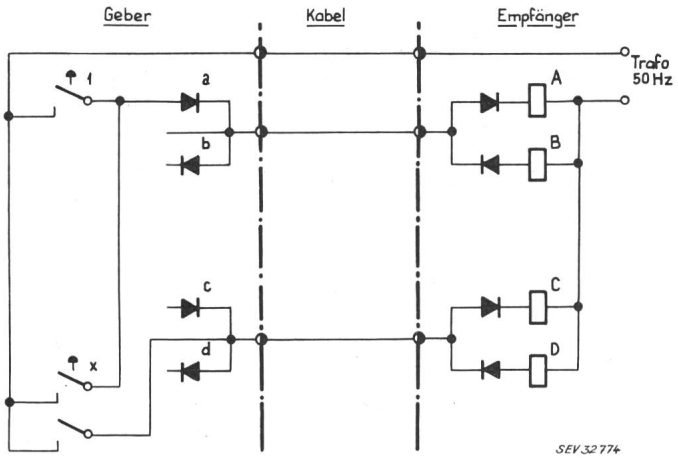


Fig. 9
Prinzip der Befehlsübermittlung vom Geber auf den Empfänger
(Halbwellenschaltung)

Die optische Anzeige, und damit die Belegung einer Gruppe, wird auf dem Stelltisch erst nach dem Einstellen der Fahrstrasse gelöscht.

10. Wechselsprechen

Die Wechselsprech-Einrichtung ist eine Zusatzeinrichtung zum Gleismelder, die nur für die Übermittlung von besonderen Meldungen gebraucht wird. Vom Geber aus kann eine Verbindung nur verlangt werden. Der Aufbau der Sprechwege erfolgt immer vom Stelltisch aus. Der Gleismelder dient also nur zur Anzeige der anrufenden Gruppe und zur Aufschaltung des bedienten Gebers. Eine Wechselsprechverbindung ist daher nur mit einem bedienten Geber möglich, gleichgültig ob speziell Wechselsprechen oder eine Manöver-Fahrstrasse verlangt wurde.

Diese Zusatz-Einrichtung wird dann gebraucht, wenn eine verlangte Fahrstrasse durch anderweitige Belegung von Zwischengeleisen erst nach einiger Wartefrist eingestellt werden kann, oder wenn sonstige Spezialfälle auftreten, die durch die Anlage nicht übermittelt werden können.

In den neuesten Anlagen wird meist in jedem Geber ein Vorverstärker eingebaut. Die dadurch erreichte Anhebung des Pegels auf den Übertragungsleitungen hat wesentlich zur Verbesserung der Tonqualität und zur Reduktion der Störgeräusche beigetragen.

11. Zukünftige Entwicklung

Aus der vorangehenden Anlagebesprechung kann entnommen werden, dass die Gleismelder ihren Zweck nur erfüllen können, wenn die Geber auf dem Gleisfeld relativ dicht verteilt sind. Dies bedingt ein dichtes Kabelnetz. Es ist daher nicht verwunderlich, dass die Aussenanlage $^2/_3$ bis $^3/_4$ der ganzen Anlagekosten beansprucht.

Angesichts der raschen Entwicklung der drahtlosen Übertragungstechnik sind daher schon vor einiger Zeit Anstrengungen unternommen worden, um die drahtgebundenen Gleismelder durch ein drahtloses System zu ersetzen.

Ein solches System würde die äussere Kabelanlage ersetzen und erst noch die notwendige Anzahl Geberapparate um ein Beträchtliches reduzieren. Die Geber müssten dabei entweder auf den Rangierlokomotiven montiert werden, oder wären dem Rangierpersonal als leichte tragbare Einheiten mitzugeben. Auf verschiedenen Bahnhöfen der Schweiz werden daher bereits sog. Rangierfunk-Anlagen installiert, alle bisherigen Ausführungsarbeiten jedoch mit Sprechfunk. Dadurch erfoglt die Anzeige im Stellwerk wieder akustisch, mit allen bereits beschriebenen Nachteilen. Betriebsmässig gesehen, stellt daher diese Entwicklung in Bezug auf die Anzeige der Meldungen einen Rückschritt dar. Für grössere Bahnhöfe wird es nie möglich sein, den ganzen Rangierverkehr mit dieser direkten Übertragung zu meistern.

Im Ausland ist man daher dazu übergegangen, eine Funkzentrale einzurichten. Alle akustischen Meldungen werden von einem Zentralisten übernommen, der sie dann zur optischen Anzeige an die Stelltische weitergibt. Leider erfordert diese Lösung zusätzliches Bedienungspersonal.

Als wirkliche Weiterentwicklung ist sicher erst ein Gleismelder-Funksystem zu betrachten, bei dem die Wahl durch Tasten, Drehschalter usw. vorgenommen werden kann. Die Anzeige würde dann natürlich auch optisch erfolgen, d. h. die Anlage müsste ganz ähnlich wie die heutigen Gleismelder funktionieren. Dabei würden die Kabel durch Funkkanäle und die ortsfesten Geber durch mobile Funkgeber ersetzt.

Die Konstruktion von solchen Funkgebern für den festen Einbau in Rangiermaschinen wäre ohne weiteres realisierbar. Jede auf dem Gleisfeld eines Bahnhofes benützte Maschine müsste dann mit einer solchen Gleisfunk-Anlage ausgerüstet sein. Dieser Forderung kann natürlich nicht entsprochen werden, da häufig auch ortsfremde Maschinen für Manöver benützt werden. Die Konstruktion eines leichten tragbaren Gerätes als Geber ist daher eine Grundforderung. Für die Entwicklung eines solchen Apparates muss jedoch noch ein grosser Schritt auf dem Gebiete der Miniaturisierung der Bauelemente getan werden.

Adresse des Autors:
H. Niederhauser, Chr. Gfeller AG, Bern-Bümpliz.

Nahzonenerdseile zum Schutze von Überspannungsableitern gegen Blitzstrom-Überlastungen

Von *U. Burger,* Zürich

621.316.992 : 621.316.98

Mit Hilfe der Modellnachbildung wird der Einfluss eines Nahzonenerdseils bei nahem Blitzeinschlag auf eine 50-kV-Freileitung untersucht. Die gemessenen Spannungen am Einschlagsort bei verschiedenen Blitzströmen und -formen, verbunden mit der gerechneten Spannungsanhebung der ungestörten Phasen, gestatten eine Aussage über den Rücküberschlag auf weitere Phasenleiter. Zahlenmässige Angaben über die Überspannungsableiter-Belastungen werden sowohl bei einphasigem wie dreiphasigem Rücküberschlag an der Einschlagstelle angegeben.

A l'aide d'un modèle, l'effet d'un câble protecteur de zone rapprochée a été examiné dans le cas d'un coup de foudre atteignant une ligne à 50 kV non loin d'un poste. Les tensions mesurées au point d'impact, pour différentes grandeurs et allures du courant de foudre, ainsi que l'élévation calculée de la tension dans les phases saines, permettent de prévoir s'il se produira ou non un contournement à d'autres conducteurs de phase. L'auteur fournit des indications numériques sur les sollicitations des parafoudres, aussi bien dans le cas d'un contournement monophasé que triphasé au point d'impact. On constate que la résistance

Dabei erweist sich der Erdungswiderstand der Maste von ausschlaggebender Bedeutung. Gelingt es, den ersten Mast vor der Anlage mit einem Erdungswiderstand von max. 5 Ω zu erden, dann verhindert ein Nahzonenerdseil über der ersten Spannweite jegliche Überlastung des Ableiters in der Anlage, wie sie sonst, als Folge naher Blitzeinschläge in die Freileitung, entstehen könnte.

Ein letzter Abschnitt untersucht die gleichen Ableiterbeanspruchungen einer 220-kV-Anlage. Allgemein zeigt sich dabei, dass grosse Ableiterbeanspruchungen durch nahe Blitzeinschläge in die Freileitung in erster Linie in Mittelspannungsanlagen mit Holzstangenleitungen vorhanden sind, und weniger bei Höchstspannungen, bei denen stets geerdete Stahl- oder Betonmasten verwendet werden.

à la terre des supports a une importance décisive. Si l'on parvient à mettre à la terre, avec une résistance de 5Ω au maximum, le premier support avant l'installation, un câble protecteur de zone rapprochée, disposé dans la première portée, empêchera toute surcharge du parafoudre dans l'installation, en cas de coup de foudre atteignant directement la ligne aérienne, non loin de là.

Pour terminer, l'auteur examine les mêmes sollicitations des parafoudres d'une installation à 220 kV. D'une façon générale, on constate que de fortes sollicitations des parafoudres par suite de coups de foudre proches dans la ligne aérienne se présentent avant tout dans des installations à moyennes tensions avec lignes sur supports en bois et, moins souvent, dans des installations à très hautes tensions, dont les lignes sont toujours tirées sur des supports en métal ou en béton mis à la terre.

1. Einleitung

Der Schutz und die Betriebssicherheit für Hochspannungsanlagen beginnt bei der Freileitung. Bei höheren Spannungen werden die Leitungen heute im allgemeinen mit Eisenmasten ausgeführt, bei tieferen (z. B. 50 kV) dagegen sehr oft mit Holzmasten. Das damit erreichte und gewünschte hohe Isolationsniveau wirft aber bei der Dimensionierung des Ableiterschutzes besondere Fragen und Schwierigkeiten auf.

Die übliche Massnahme besteht auch hier im Verlegen eines Erdseiles. Wird dieses Seil nur in der Anlage geerdet, so muss bei sehr steilen Überspannungswellen der Abstand zu den Phasenleitern so gross sein, dass die Spannung, die dem Produkt aus Blitzstrom mal halbem Wellenwiderstand entspricht, nicht zum Überschlag führt. Diese Spannung erfordert aber, wie eine kurze Rechnung sofort zeigt, schon bei kleinen Blitzströmen sehr grosse Leiterabstände. Eine metallische Verbindung zwischen Erdseil und Boden bei jedem Mast reduziert wohl diese Spannung wesentlich, bedingt jedoch grosse Ausleger, um den Erdungsdraht ohne Überschlag um die Phasenleiter herum zum Mastfuss zu führen. Eine Lösung, die diese Forderung erfüllt, wurde in Amerika gefunden, indem links und rechts der Drehstromleitung eine weitere Mastenreihe steht, wovon jede nur ein Erdseil trägt. Dieser wohl sichere Blitzschutz ist für die engen Verhältnisse der Schweiz kaum anwendbar. Um mit vernünftigem Aufwand die Anlage und die Leitung zu schützen, muss daher auf das hohe Isolationsniveau vor der Anlage verzichtet werden. Somit hat das Problem eine Verlagerung erfahren. Die Lösung liegt somit nicht mehr in einem absoluten Schutz vor Blitz- oder Rücküberschlag, sondern lässt jetzt einen solchen zu, verlangt aber, dass wichtige Anlageteile, wie z. B. der Überspannungsableiter, nicht durch Überlastung zerstört werden dürfen.

Die Belastung des Ableiters bei Einschlag in die ungeschützte Freileitung ist in [1][1] mathematisch behandelt. Das Resultat zeigt, dass Einschläge mit wenigen km Entfernung von der Anlage schon bei mittleren Blitzstromstärken zur Zerstörung des Ableiters führen können. Bei der Verwendung eines mehrfach geerdeten Erdseiles als Schutz stellt sich sofort die Frage nach der notwendigen Länge unter Berücksichtigung des Masterdungswiderstandes. Zur Entlastung der Ableiter soll das Erdseil soviel Strom wie nur irgendwie möglich übernehmen. Dieses erweiterte Problem weist jetzt aber ein so kompliziertes Gleichungssystem auf, dass die Aufgabe nur mit Hilfe eines Digitalrechners gelöst werden kann.

Eine elegantere Methode ist die Modellnachbildung; sie gestattet, neben der Anschaulichkeit, bei einmal aufgestellter Anlage viele Varianten in kurzer Zeit zu studieren. Im Hochspannungs-Laboratorium der ETH wurde daher ein Modell für diesen Zweck gebaut, dessen Äusseres hier kurz beschrieben werden soll.

Das Modell zerlegt die Freileitung mit ihren kontinuierlich verteilten Grössen in Π-Glieder mit diskreten *L*- und *C*-Werten. Die ausgeführte Lösung ist aus Fig. 1 ersichtlich.

Als Aufbauplatte und zugleich als Rückleiter, d. h. Boden, dient ein Al-Blech. Der Phasenleiter, hier ein Cu-Draht, wird von Plexiglasstützern getragen, an denen zugleich die Leitungskapazitäten in Form von Glimmerkondensatoren befestigt sind. Ferroxcubescheiben, die den gestreckten Cu-Draht umfassen, bilden die Leitungsinduktivität nach. Neben einem Minimum an Störeffekten weist der gewählte Aufbau ein Höchstmass von Anschaulichkeit auf.

Soll nun das eingangs beschriebene Problem auf dem Modell gelöst werden, so erfordert dies sowohl beim Modell wie bei der Rechenmaschine gewisse Vereinfachungen und besonders eine bestimmte Auswahl aus der Fülle der möglichen Variabeln.

32'996 – 33'013

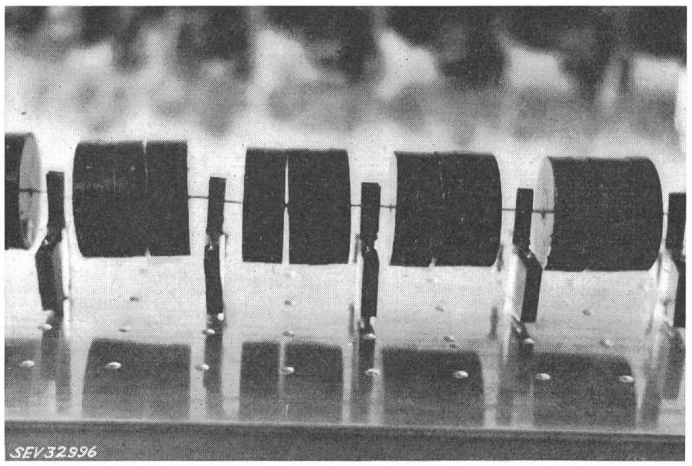


Fig. 1
Nachbildung einer Leitung im Modell

2. Voraussetzungen

Die Zuführungsfreileitung einer 50-kV-Anlage besitzt auf der Strecke l_1 ein Nahzonenerdseil, das mit der Anlageerdung verbunden ist (Fig. 2). Die Ableiterbeanspruchung bei Blitzeinschlag wird nun unter den folgenden Voraussetzungen bestimmt:

a) Der Blitz schlägt in das Ende des Erdseiles (freileitungsseitig) ein.

b) Es findet auf den mittleren Phasenleiter im Einschlagspunkt des Blitzes ein Rücküberschlag statt. In erster Untersuchung wird eine Einleiterausführung betrachtet, was auch der Drehstromleitung mit nur einer gestörten Phase entspricht. Der Abschnitt 5 behandelt dann die Wahrscheinlichkeit und Auswirkung eines Rücküberschlages auf die zweite und dritte Phase.

c) Der oder die weiterführenden, nicht mehr durch ein Erdseil geschützten Phasenleiter befinden sich auf Holzmasten. Die vom

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes

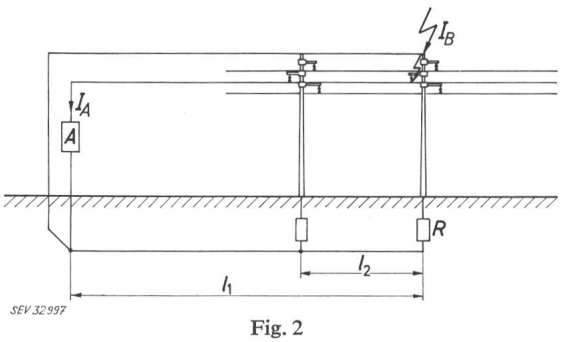


Fig. 2

Grundlage der Untersuchung über die notwendige Nahzonenerdseillänge zum Schutze eines Überspannungsableiters gegen Blitzstromüberlastung

I_A Ableiterstrom; I_B Blitzstrom; R Masterdungswiderstand; A Ableiter; l_1 Erdseillänge; l_2 Mastabstand (Spannweite)

Einschlagsort weggehende Spannungswelle bewirkt auf diesen keinen weitern Überschlag mehr. Die Länge der Leitung sei so gross, dass die durch die Reflexion zurückkommenden Wellen nicht mehr berücksichtigt werden müssen.

d) Vom Einschlagsort aus geht eine Spannungswelle gleicher Höhe auf dem Erdseil und auf dem Phasenseil in Richtung zur Anlage. Ein weiterer Überschlag auf diesem Teil der Leitung (Erdseilstrecke) soll nicht erfolgen.

e) Es wird nur das Luftfeld der Leiter ohne den Ohmschen, dämpfenden Einfluss des Bodens berücksichtigt. Dies bedeutet, dass die Masten wohl einen bestimmten gegebenen Erdungswiderstand aufweisen, dass aber die Eindringtiefe des magnetischen Feldes und der kilometrische Erdwiderstand selbst null sind.

f) Erdseil und Ableiter sind mit derselben Anlageerdung verbunden. Diese selbst hat einen Widerstand von 0 Ω.

g) Ableiterdaten: Ableiternennspannung 50 kV;
Ableiterrestspannung 185 kV bei 10 kA;
Ansprechspannung 140 kV.

h) Das Mastbild zeigt Fig. 3, die Angaben sind in Tabelle I zusammengefasst.

Angaben der untersuchten 50-kV-Leitung

Tabelle I

	Querschnitt mm²	Durchmesser mm	Material	Durchhang mm
Erdseil	50	8,5	Fe	2,5
Phasenseil	300	22,5	AlMgSi-Legierung (Aldrey)	3

Als Variable treten die folgenden Grössen auf:

a) Erdseillänge: Minimal 1...2 Mastweiten, maximal jedoch 1,5 km;

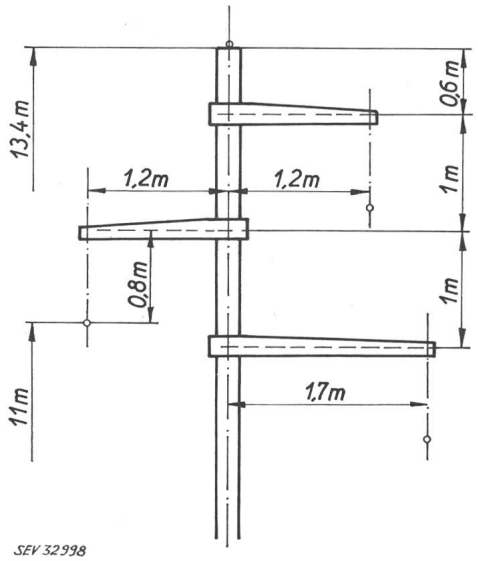


Fig. 3

Mastbild einer 50-kV-Leitung

b) Mastabstände: 100, 200, 300 m;
c) Masterdungen: 5, 10, 30 Ω;
d) Blitzstrom-Scheitelwert: 30 und 100 kA;
e) Blitzstrom-Formen: 10|20, 10|100, 1|20, 1|100 µs

3. Die Nachbildung

a) Freileitung

Mit den gegebenen Voraussetzungen lassen sich die Induktivitäten und Kapazitäten berechnen. Da die Bodenbeschaffenheit den am wenigsten bekannten und erfassbaren Faktor darstellt, wird in erster Näherung der kilometrische Erdwiderstand und damit die Eindringtiefe des magnetischen Feldes gleich null gesetzt. Diese Annahme ist zulässig, da sie den ungedämpften und somit gefährlichsten Fall darstellt.

Bei dieser Nachbildung tritt ein neues Problem auf. Phasen- und Erdseil laufen parallel. Die Teilkapazitäten und die Gegeninduktivität drücken die Kopplung der elektrischen Felder aus. Die Darstellung jener geschieht mit Hilfe der entsprechenden Kondensatoren; die magnetische Nachbildung bereitet dagegen im allgemeinen Schwierigkeiten.

Die gewählte Bauweise (Fig. 1) des Modells gestattet jedoch eine sehr einfache Lösung. Indem runde Ferritscheiben mit einem zentrischen Loch die Induktivitäten darstellen, ist es möglich, zwei Drähte, d. h. das Erdseil und das Phasenseil, durch ein Loch zu ziehen. Die gemeinsame Anzahl Scheiben pro Π-Glied entspricht dem Wert der Gegeninduktivität. Somit erhält jeder Leiter einzeln gesehen die richtige Induktivität, wobei aber ein Teil pro Π-Glied miteinander gekoppelt ist.

Die nach [2] berechneten Teilkapazitäten und Induktivitäten des Luftfeldes betragen:

C_E = 5,04 pF/m (Erdseil — Boden) L_E = 1,73 µH/m
C_p = 6,19 pF/m (Phase — Boden) L_p = 1,47 µH/m
C_{Ep} = 1,80 pF/m (Erdseil — Phase) M = 0,39 µH/m

Das verwendete Modell-Π-Glied, das sowohl bei den vorausgesetzten Blitzformen eine amplituden- und phasengetreue Nachbildung erlaubt, als auch den vorhandenen festen Induktivitätswerten angepasst ist, entspricht einer Freileitungslänge von 8,45 m. Neben den Phasen- und Erdseilen wird der ungeschützte Teil der weiterführenden Phase, der ∞-lang gedacht ist, durch den Wellenwiderstand von 443 Ω ersetzt.

Ein sog. Montagestab, einbetoniert in den 50-kV-Betonmast, verbindet das Erdseil mit der Erdung des Mastes. Dieser Leiter wird durch 3 im Wellenwiderstand abgestufte Π-Glieder dargestellt. Die Nachbildung des Masterdungswiderstandes erfolgt in Form eines präzisen induktionsarmen Schichtwiderstandes. Er verbindet die Grundplatte, d. h. den Boden, mit dem Mastabbild.

b) Blitz

Ein entsprechend gebautes Hilfsgerät enthält einen einstufigen Stossgenerator mit Quecksilber-Relais als Schaltfunkenstrecke. Die verwendeten Blitzströme zeigen folgende Formen:

1|20, 1|100, 10|20, 10|100 µs

Front- und Rückenhalbwertzeiten entsprechen den CEI-Definitionen.

c) Ableiter

Der Ableiter muss im Modell, genau wie in der Wirklichkeit eine bestimmte Ansprechverzögerung oder Ansprechcharakteristik und eine bestimmte Strom-Spannungs-Charakteristik aufweisen. Ein schneller Transistor ersetzt die Funkenstrecke

im Ableiter, er kann genau mit gewünschter Verzögerung geschaltet werden. Die Serieschaltung der Restspannung von sehr schnellen Siliziumdioden mit entsprechenden Parallelwiderständen gestattet die Nachbildung der Ableitercharakteristik, wie sie in Fig. 4 dargestellt ist.

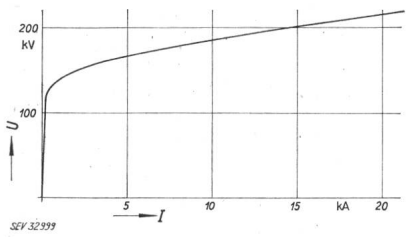


Fig. 4
Ableitercharakteristik

4. Messungen und Resultate unter der Annahme eines nur einphasigen Rücküberschlages an der Blitzeinschlagstelle

Der Ableiterstrom I_A wird bei verschiedenen Erdseillängen gemessen unter der Annahme, dass der Blitz mit vorgeschriebener Stossform in das Ende des Erdseiles einschlägt und nur dort zum Rücküberschlag auf die mittlere Phase führe. Der Strom im Ableiter weist für die kleinen Masterdungswiderstände einen stark gezackten Verlauf auf. Fig. 5 zeigt dafür ein Beispiel mit folgenden Grössen:

Blitzstrom und -dauer:	100 kA, 1|100 µs;
Mastdistanz:	150 m
Masterdung:	10 Ω
Erdseillänge:	1,5 km
kilometrischer Erdwiderstand:	0 Ω

Die Auswertung für den Stromscheitelwert und die Halbwertdauer basiert auf einer flächengleichen Kurve, d. h. die einzelnen Zacken werden in flächengleiche Rechtecke oder Rhomben verwandelt, die eine glatte Kurve bilden. In Fig. 6...8 sind die gemessenen Resultate graphisch zusammengestellt.

Die Ladung Q in C oder in As gibt ein Mass für die Belastung eines Ableiterquerschnitts. Die vom Ableiter aufgenommene Energie A ist die mit der mittleren Restspannung U_p multiplizierte Ladung. Da die Restspannung U_p im allgemeinen proportional mit der Ableiterlänge wächst, gibt A bei Bezug auf das Ableitervolumen dasselbe Beanspruchungsbild wie Q bei Bezug auf den Ableiterquerschnitt.

Die Entwicklung der Ableiter in den letzten Jahren zeigt bei den genormten Nennströmen ein stetiges Steigen der zulässigen Belastung Q. Die heute genormten und in Diskussion befindlichen Werte sind:

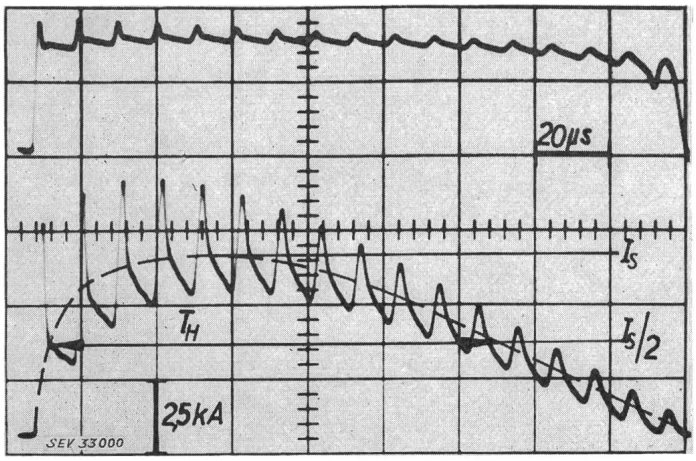


Fig. 5
Spannung *(obere Kurve)* **und Strom** *(untere Kurve)* **im Ableiter**

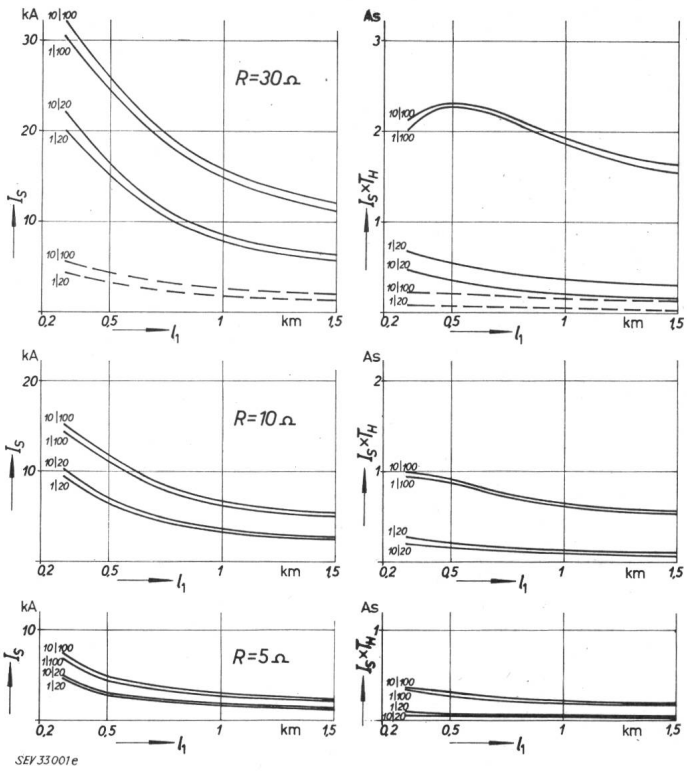


Fig. 6
Ableiterbeanspruchung für einen Mastabstand von 100 m bei einphasigem Rücküberschlag

——— Blitzstrom 100 kA, — — — Blitzstrom 30 kA
I_S Ableiterstromscheitelwert; T_H Halbwertdauer (gemäss Fig. 5); l_1 Erdseillänge

Höchstzulässige Ableiterströme I_A = 10...20 kA bei 10|20 µs Stoss

Höchstzulässige Ableiterbelastung $Q \approx 1{,}2$ As bei 600 A/2000 µs Stoss

Nach Angaben der Herstellerfirmen liegt die zulässige Q-Belastung bei kurzen Stromstössen eher höher als bei den langen.

Als wohl auffälligste Erscheinung bei der Durchsicht der Resultate erweist sich der grosse Einfluss des Erdungswiderstandes der Maste. Diese Abhängigkeit gestattet bei einigermassen geeignetem Boden die Erdung der Masten in unmittelbarer Nähe der Anlage so auszuführen, dass mit kurzem Nahzonenerdseil der Ableiter einen ausreichenden Schutz gegen Überbelastung erhält.

Im Falle einer Eindrahtleitung, bzw. eines Rücküberschlages nur auf einen Leiter der Drehstromleitung können für die notwendigen Erdseillängen folgende Regeln aufgestellt werden:

1. Blitzstrom mit den vier vorausgesetzten Formen und 30 kA Scheitelwert: Auch bei der Masterdung von 30 Ω besteht keine Gefahr für die Ableiter. Ein Erdseil über die erste Spannweite genügt.

2. Blitzstrom von 10|100 µs Dauer bei 100 kA Scheitelwert:

a) *Masterdungen von 30 Ω:*

Das Erdseil muss wesentlich länger als 1,5 km sein, um den Ableiter zu schützen.

b) *Masterdungen von 10 Ω:*

Unter Annahme der zulässigen Ableiterstromstärke von 10 kA Scheitelwert und einer Belastung von 1,2 As lassen sich die in Tabelle II zusammengestellten notwendigen Erdseillängen aus den Kurven 6...8 herauslesen.

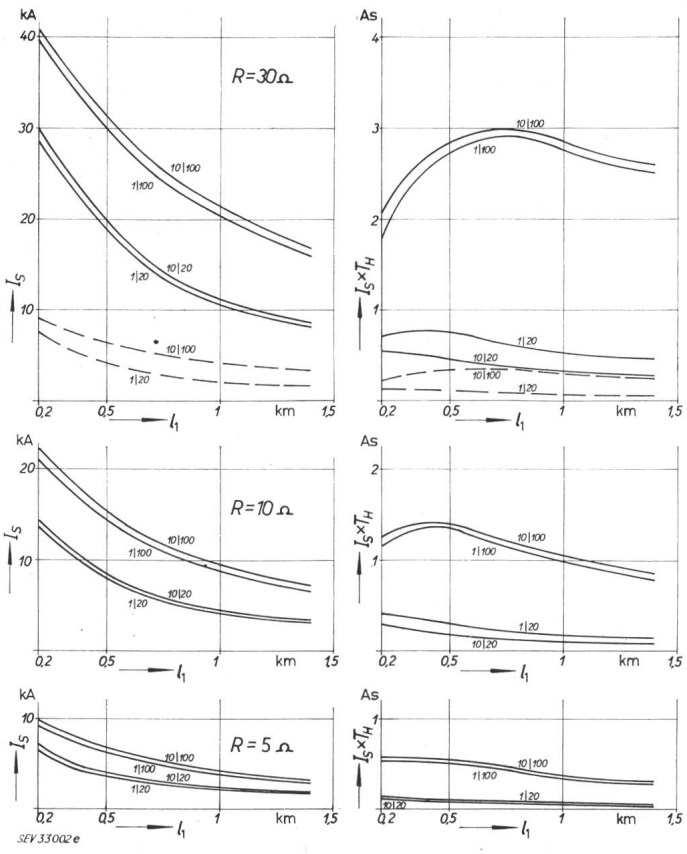


Fig. 7
Wie Fig. 6, aber für einen Mastabstand von 200 m
Bezeichnungen siehe Fig. 6

c) *Masterdungen von 5 Ω:*

Ein Nahzonenerdseil über die erste Spannweite vor der Anlage genügt, um den Ableiter vor Überlastung zu schützen.

Notwendige Erdseillängen

Tabelle II

Mastabstand l_2 m	Ableiterstrom (Scheitelwert I_A kA	Belastung Q AS	Erdseillänge l_1 km
100	10	0,82	0,62
200	10	1,1	0,94
	10,8	1,2	0,76
300	10	1,22	1,08
	9,8	1,2	1,14

Voraussetzungen:
Einphasiger Rücküberschlag.
Blitz: Scheitelwert des Stromes 100 kA, Blitzform 10|100 µs,
Zulässige Belastung des Ableiters 10 kA/1,2 As,
Masterdungswiderstand 10 Ω

5. Rücküberschlag auf weitere Phasenleiter der Drehstromleitung

Bis jetzt galt die Annahme nur eines vom Blitz betroffenen Phasenleiters, was auch einer Eindrahtleitung mit Erdrückleitung entspricht. Für die Drehstromleitung soll nun die Wahrscheinlichkeit eines Rücküberschlages auf weitere Phasenleiter infolge des Spannungsabfalles an Mast und Erdung untersucht werden.

Für den Entscheid, ob eine weitere Phase überschlägt, muss erstens die Spannung U_M am Mast und zweitens die kapazitive Spannungsanhebung der ungestörten Phasen durch das Erdseil und die bereits überschlagene Phase bekannt sein. Die auftretenden Spannungen lassen sich am Modell leicht messen. Die kapazitive Ankopplung muss jedoch rechnerisch aus den Teilkapazitäten bestimmt werden.

a) Spannungen an der Einschlagstelle

α) Frontdauer des Blitzstromes 10 µs

Die Blitzstromformen mit 10 µs Frontdauer erzeugen auf den Masten einer Freileitung mit einer kurzgeschlossenen Phase einen der Form des Stromes ähnlichen Verlauf der Mastspannung (Fig. 9, 10).

Die gemessenen Resultate für den 10|100-µs-Blitz sind in Fig. 11 und Fig. 12 zusammengestellt. (Der 10|20-µs-Blitz bewirkt bis auf wenige Prozente genau dieselbe Mastspannung.)

Es zeigt sich, dass die Mastspannung mit zunehmender Erdseillänge rasch ansteigt, um aber bereits über 0,4...0,6 km einen konstanten Wert anzunehmen. Die Kurven in Fig. 11 und 12, die für einen kurzgeschlossenen Phasenleiter gelten, erfahren bei Kurzschluss eines weitern Leiters eine Senkung um 2% mit einem Masterdungswiderstand von 10 Ω, und ca. 4,5% bei 30 Ω.

β) Frontdauer des Blitzstromes 1 µs

Den ganz andern Verlauf bei dieser kurzen Frontdauer zeigt Fig. 13. Der steile Stromanstieg führt zu einem noch steileren Anstieg der Mastspannung. Die dabei auftretenden, von der Erdseillänge und Mastdistanz unabhängigen Scheitelwerte sind in Tabelle III für den 1|100-µs-Blitz zusammengestellt (der 1|20-µs-Blitz bewirkt praktisch dieselbe Spannung).

Mastspannungen U_M [MV] infolge eines 1|100-µs-Blitzes

Tabelle III

Masterdungswiderstand R Ω	U_M bei einem Blitzstrom von 100 kA	30 kA
30	3,62	1,10
10	3,23	

Bei Rücküberschlag auf zwei Phasenleiter sinken diese Spannungen um ca. 8%. Der Scheitelwert liegt wesentlich höher als der Wert, der sich aus der Multiplikation des Masterdungswiderstandes mit dem zeitlich entsprechenden Blitz-

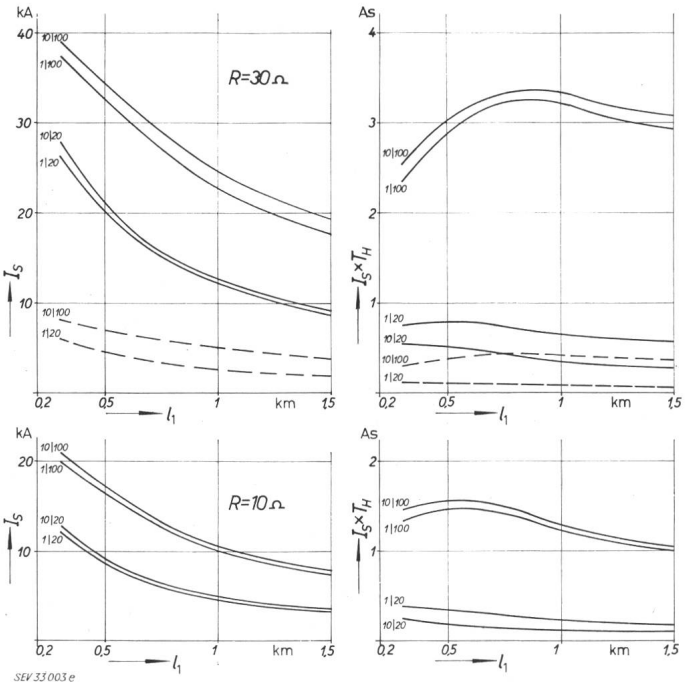


Fig. 8
Wie Fig. 6, aber für einen Mastabstand von 300 m
Bezeichnungen siehe Fig. 6

stromscheitelwert ergibt. Die Mastinduktivität spielt hier bereits eine wesentliche Rolle.

Das Abklingen der Spannung erfolgt entsprechend den Mastabständen verschieden schnell, d. h. je grösser der Abstand, um so langsamer ist der Spannungsabfall. In den gemessenen Fällen beträgt die Spannung nach 2 µs, unabhängig von den Mastabständen, etwa 10% mehr als die Spannungswerte der entsprechenden Stösse mit 10 µs Frontdauer (Fig. 11 und 12).

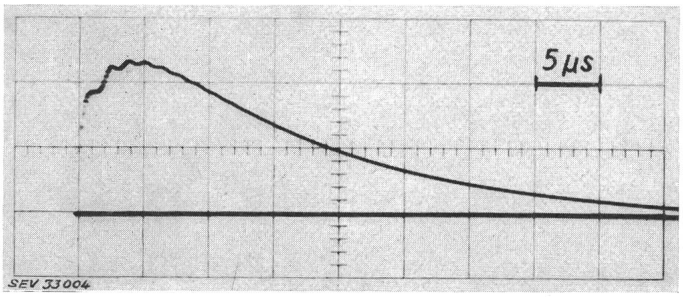


Fig. 9
Mastspannung U_M infolge eines 10 | 100-µs-, 100-kA-Blitzes

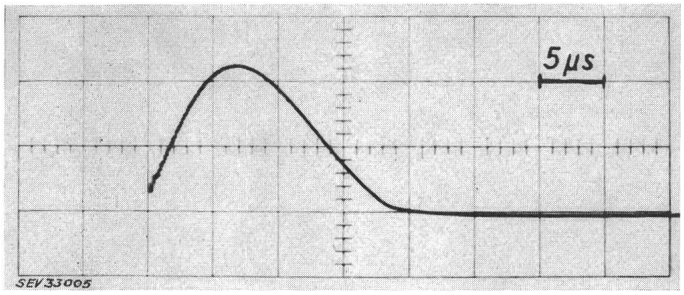


Fig. 10
Mastspannung U_M infolge eines 10 | 120-µs-, 100-kA-Blitzes

b) Spannungsanhebung der ungestörten Phasen

Ohne Berücksichtigung der jeweiligen Phasenlage der 50-kV-Betriebsspannung der einzelnen Leiter lässt sich die massgebende Spannungsdifferenz ΔU zwischen Mast (Erdseil + kurzgeschlossener Phase) und den andern Phasen aus den Teilkapazitäten berechnen. Diese Differenz, in Prozenten der Mastspannung angegeben, gestattet sofort, von einer angenommenen Überschlagspannung eine noch zulässige, nicht zum Kurzschluss führende Mastspannung zu bestimmen. Da die Kopplung je nach der örtlichen Lage des zuerst kurzgeschlossenen Phasenseils verschieden ist, wird ein Bereich gegeben, in dem ein Überschlag auftreten kann, aber nicht muss.

Die Spannungsdifferenz ΔU zwischen Mast (Erdseil + rücküberschlagenem Phasenseil) und den andern noch nicht vom Rücküberschlag betroffenen Leitern beträgt in Prozenten der Mastspannung U_M:

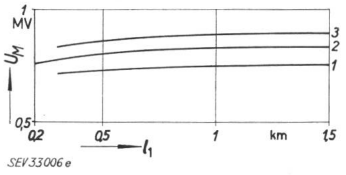
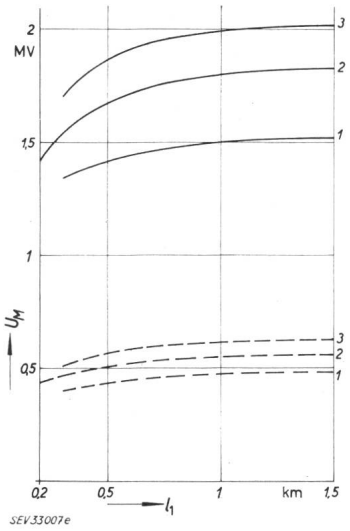


Fig. 11
Mastspannung U_M infolge eines 10 | 100-µs-Blitzes in Funktion der Erdseillänge l_1 bei Rücküberschlag auf einen Phasenleiter
Blitzstrom 100 kA; Masterdungswiderstand 10 Ω
Mastabstand: *1* = 100 m; *2* = 200 m; *3* = 300 m

Fig. 12
Mastspannung U_M infolge eines 10 | 100-µs-Blitzes in Funktion der Erdseillänge l_1 bei Rücküberschlag auf einen Phasenleiter
——— Blitzstrom 100 kA
– – – – Blitzstrom 30 kA
Masterdungswiderstand 30 Ω;
Mastabstand: *1* = 100 m;
2 = 200 m; *3* = 300 m



Erdseil + 1 rücküberschlagene Phase:

$$\frac{\Delta U}{U_M} = 52...66\%$$

Erdseil + 2 rücküberschlagene Phasen:

$$\frac{\Delta U}{U_M} = 50...54\%$$

c) Ableiterbelastung bei Rücküberschlag aller 3 Phasen der Drehstromleitung an der Einschlagsstelle

Die normierte 1|50 µs Stosshaltespannung für das 50-kV-Material beträgt 250 kV. Dieser Wert soll hier gerade als Überschlagspannung dienen, wobei für ein Ansprechen in der Front ungefähr die doppelte Spannung angenommen wird.

Mit dieser Voraussetzung, der gemessenen Mastspannung gemäss a) und der berechneten Spannungs-Anhebung der ungestörten Phase, zeigt es sich, dass für die 50-kV-Anlage bei allen 4 Blitzformen ein dreiphasiger Rücküberschlag bei $R = 30\,\Omega$, $I_B = 100$ oder 30 kA, und bei $R = 10\,\Omega$, $I_B = 100$ kA auftritt.

Der Fall des dreiphasigen Rücküberschlages wurde daher auf dem Modell nachgebildet und gemessen. Die Belastungen pro Ableiter sind in Fig. 14...16 angegeben.

d) Zusammenfassung der Resultate des 5. Abschnittes (50-kV-Anlage)

1. Die Blitzströme von 100 kA Scheitelwert aller behandelten vier Stromformen führen im 50-kV-Netz bei Masterdungswiderständen von 30 und 10 Ω zum Rücküberschlag aller drei Phasen an der Einschlagsstelle.

2. Steile Stromanstiege mit Fronten in der Grössenordnung einer µs bewirken auch bei niedrigen Blitzstromscheiteln (30 kA) einen Rücküberschlag auf die drei Phasenleiter.

3. Die für die Ableiterbeanspruchung gefährliche Frontsteilheit liegt bei 10 µs Anstiegszeit und mehr. Sie bewirkt keine grossen anfänglichen Überspannungsspitzen, so dass die Mastspannung bei Strömen unter 100 kA nicht genügend ansteigt, um durch Rücküberschlag auf weitere Phasen den Ableiter der 1. Phase zu entlasten.

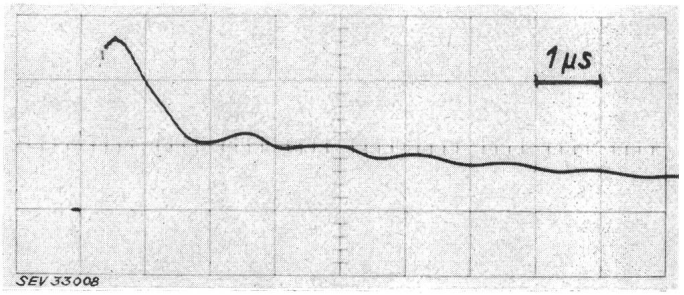


Fig. 13
Mastspannung U_M infolge eines 1 | 100-µs-, 100-kA-Blitzes

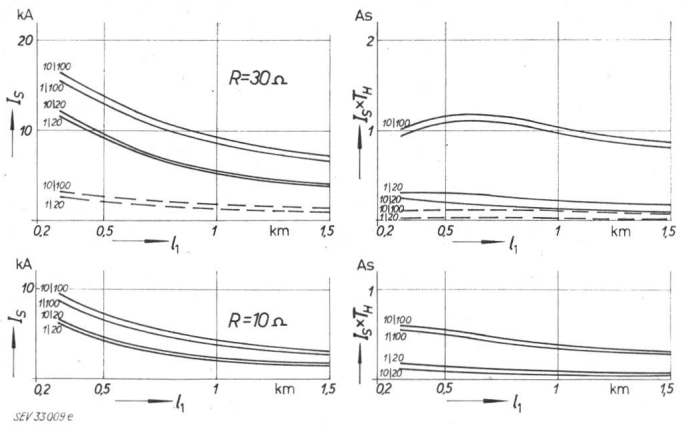


Fig. 14
Ableiterbeanspruchung für einen Mastabstand von 100 m bei dreiphasigem Rücküberschlag
——— Blitzstrom 100 kA, – – – – Blitzstrom 30 kA

4. Die Reduktion der Ableiterbelastung bei dreiphasigem Rücküberschlag gegenüber dem einphasigen liegt in der Grösse von 50%, sowohl für den Scheitelwert des Stromes, wie für dessen Integral über die Zeit.

5. Die zum Schutze des Ableiters notwendigen Erdseillängen lassen sich beim dreiphasigen Rücküberschlag wie folgt angeben:

α) Blitzstrom mit den vier vorausgesetzten Formen und 30 kA Scheitelwert:
Bei Masterdung von $\leqq$ 30 Ω besteht keine Gefahr für den Ableiter. Ein Erdseil über die erste Spannweite genügt.

β) Blitzstrom von 10|100 µs Dauer mit 100 kA Scheitelwert:
Unter Annahme der zulässigen Ableiterstromstärke von 10 kA Scheitelwert und einer Belastung von 1,2 As lassen sich die notwendigen Erdseillängen aus den Kurven von Fig. 14...16 bzw. aus den in Tabelle IV zusammengestellten Angaben herauslesen.

Notwendige Erdseillängen

Tabelle IV

Mastabstand l_2 m	Ableiterstromscheitelwert $\hat{I}_A$ kA	Belastung Q As	Erdseillänge l_1 km
bei Masterdungen von 30 Ω			
100	10	1,1	0,9
200	10	1,35	1,34
	—	1,2	> 1,5
300	10	—	> 1,5
	—	1,2	> 1,5
bei Masterdungen von 10 Ω			
100	—	—	< 0,3
200	10	0,8	0,4
300	10	0,89	0,5
bei Masterdungen von 5 Ω			
Ein Nahzonenerdseil über die erste Spannweite vor der Anlage genügt, um den Ableiter vor Überlastung zu schützen.			
Voraussetzungen: Dreiphasiger Rücküberschlag. Blitz: Scheitelwert des Stromes 100 kA, Blitzform 10|100 µs, Zulässige Belastung des Ableiters 10 kA/1,2 As			

6. Der Masterdungswiderstand erweist sich von ausschlaggebender Bedeutung. Ein Nahzonenerdseil über der ersten Spannweite vor der Anlage kann den Ableiter vor Überlastung schützen, sofern der erste Mast eine Erdung von $\leqq$ 5 Ω besitzt. Dabei müssen aber die folgenden Anforderungen berücksichtigt werden:

α) Der Blitz darf in der geschützten Spannweite nicht in eine Phase einschlagen, was durch Höherverlegen des Erdseiles oder durch Verwendung von zwei Erdseilen erreicht werden kann.

β) Der Masterdungswiderstand muss auch bei einem Stoßstrom 5 Ω betragen; ein einziges Bodenseil zwischen Mast und Anlageerdung genügt wegen der Induktivität nicht. Mit entsprechendem Aufwand an Erdungsbändern sollte es möglich sein, diesen Wert zu erreichen.

γ) Die geschützte erste Spannweite darf nicht zu kurz gewählt werden. Trifft ein Blitz die mit Holzstangen ausgeführte, ungeschützte Freileitung, so muss die Spannungswelle, die gegen die Anlage läuft, so steil sein, dass sie einen Überschlag auf das Erdseil beim ersten Mast vor der Anlage bewirken kann, noch bevor die am ansprechenden Ableiter reflektierte Welle die Spannung senkt.

Ausgehend von einer maximalen Überschlagsspannung ΔU lässt sich bei gegebenem Wellenwiderstand Z der Leitung und der ersten vom Erdseil geschützten Spannweite l_2 die notwendige Steilheit des Blitzstromes berechnen:

$$\Delta U = \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\, 2\,\tau\, Z \qquad \tau = \frac{l_2}{c}$$

c Lichtgeschwindigkeit

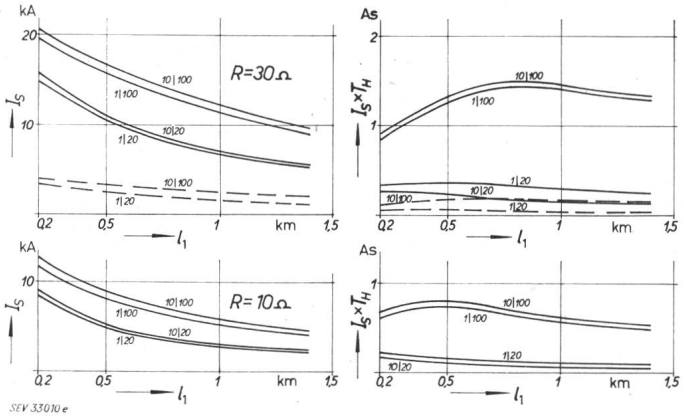


Fig. 15
Wie Fig. 14, aber für einen Mastabstand von 200 m

Im Falle der gewählten 50-kV-Leitung mit:

$\Delta U \approx$ 500 kV für ein Ansprechen in der Front,
Z = 226 Ω beim Kurzschluss aller drei Phasen,

erfordert die Spannweite l_2 = 100 m ein

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} \approx 3\ \mathrm{kA/\mu s}$$

Da die meisten Blitzstromstösse ihr Maximum innerhalb 10 µs erreichen, dürfte bei dem für die Ableiter gefährlichen Scheitelwert von 30...100 kA die geforderte Steilheit auftreten. Es ist jedoch sicherer, die Spannweite l_2 grösser zu wählen oder eventuell zwei Spannweiten mit einem Erdseil zu schützen.

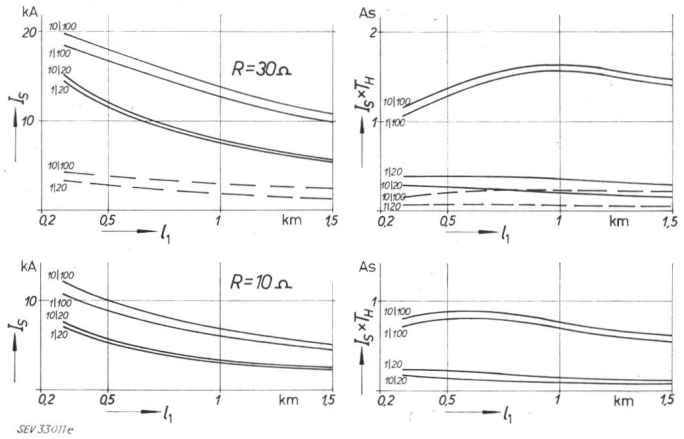


Fig. 16
Wie Fig. 14, aber für einen Mastabstand von 300 m

6. Ableiterschutz durch ein Nahzonenerdseil in Netzen mit Betriebsspannungen > 50 kV

Die Frage nach der Belastung der Ableiter stellt sich auch für die Netze mit höherer Betriebsspannung als für die bisher betrachtete 50-kV-Anlage. Es soll nun untersucht werden, wie weit sich die gemessenen Resultate auf andere Netze übertragen lassen.

Mit der höheren Betriebsspannung steigen auch alle Masse der Freileitung, d. h. die Maste werden höher, die Seile dicker. Multipliziert man alle Abmessungen mit demselben Faktor, so ändert weder die Induktivität, noch die Kapazität pro km, da in allen Berechnungsformeln immer das Verhältnis eines Abstandes zum Leiterradius vorkommt. Unter der Annahme einer streng proportionalen Vergrösserung (wobei diese Voraussetzung noch einer genauen Prüfung bedarf), bleibt also das bestehende Modell mit Induktivität pro km auch für höhere Spannungen dasselbe.

Auf Grund einer Spannung-Strom-Maßstabänderung, die den neuen Ableiter mit der höheren Betriebsspannung berücksichtigt, kann aus den Messungen für die 50-kV-Anlage die Ableiterbelastung bei höherer Spannung berechnet werden. Diese Umrechnung ist in Fig. 17 und 18 für den folgenden Fall durchgeführt:

Betriebsspannung: 220 kV
Ableiterrestspannung: 680 kV bei 10 kA, dynamischer Widerstand $\Delta u/\Delta i$ in diesem Punkt: 7 Ω
Scheitelwert des Blitzes: 136 kA; dieser Wert entspricht 30 kA im 50-kV-Netz und resultiert aus der Umrechnung des 50-kV-Ableiters in jenen von 220 kV
Einphasiger Rücküberschlag

Wird die Annahme der proportionalen Vergrösserung aller Masse genauer untersucht, so zeigt sich, dass dies recht gut für die Lage der Leiter stimmt, nicht aber für die Leiterdurchmesser, da bei der 220-kV-Leitung bereits ein Bündelleiter mit 2 Seilen an Stelle des einzelnen Seiles treten kann. Diese über die proportionale Vergrösserung der Seilanordnung hinausgehende Zunahme des Seildurchmessers bedeutet einen Fehler in den Fig. 17 und 18, der in erster Näherung durch Reduktion des Blitzstromes um 10% auf 122 kA Scheitelwert kompensiert werden kann, um wieder dieselbe Ableiterbelastung zu erhalten. Ebenso nimmt der Durchmesser des Erdseils nicht entsprechend zu, da man bei 220-kV-Anlagen noch sehr oft nur ein 70 mm²-Stahlseil antrifft. Diese ungenügende Anpassung erhöht die Erdseilinduktivität um 10% gegenüber dem verwendeten Wert. Die daraus resultierende grössere Ableiterbelastung könnte jedoch vermieden werden durch Verwendung eines Phasenleiters von 300 mm² AlMgSi-Seil (Aldrey) an Stelle des 70 mm²-Stahlseiles.

Eine kurze Zusammenfassung der Resultate für das 220-kV-Netz zeigt folgendes:

Die Werte der Ableiterbelastung liegen trotz des grossen Blitzstromes wesentlich tiefer als im 50-kV-Netz. Nur der Masterdungswiderstand von 30 Ω bedeutet mit dem hohen Scheitelwert des Blitzstromes von 136 kA im Falle des einphasigen Rücküberschlages eine gefährliche Belastung für den Ableiter. Die Blitzströme mit kurzen Fronten von 1 µs werden auch hier eine Entlastung des Ableiters infolge Rücküberschlags auf weitere Phasen bewirken; der 10|100 µs Blitz führt jedoch erst bei $R \geq 30\ \Omega$ zu einem Überschlag auf eine weitere Phase und damit zur Aufteilung des Blitzstromes auf mehr als einen Ableiter. Ein bzw. zwei Erdseile auf eine Spannweite von mindestens 200 m mit einem Masterdungswiderstand von 5 Ω genügt auch hier, um eine Überlastung der Ableiter in der Anlage durch Blitzstrom in jedem Falle zu verhindern.

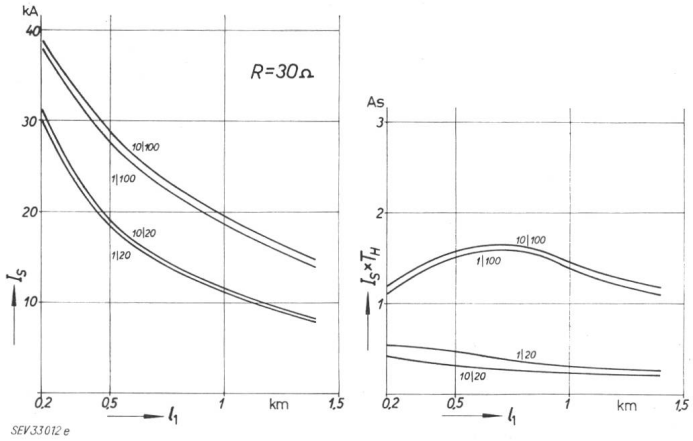


Fig. 17
Ableiterbeanspruchung für einen Mastabstand von 200 m bei einphasigem Rücküberschlag
136-kA-Blitzstrom im 220-kV-Netz

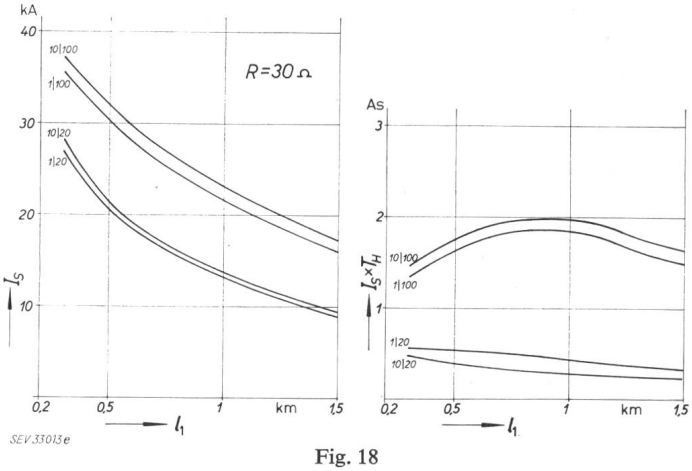


Fig. 18
Ableiterbeanspruchung für einen Mastabstand von 300 m bei einphasigem Rücküberschlag
136-kA-Blitzstrom im 220-kV-Netz

Literatur

[1] *K. Berger:* Die Beanspruchung von Überspannungsableitern durch nahe Blitzeinschläge. Bull. SEV 1942.

[2] *K. Küpfmüller:* Einführung in die theoretische Elektrotechnik. Springer Verlag, Berlin 1952.

Adresse des Autors:
Dr. sc. techn. *U. Burger,* Hochspannungslaboratorium der ETH, Gloriastrasse 35, Zürich 7/6.