Überspannungen bei Blitzschlägen an Kabeln mit ausgekreuzten Mänteln

Autor(en): **Stephanides, H.V. / Schmid, M.**

Objekttyp: **Article**

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

Band (Jahr): **63 (1972)**

Heft 3

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-915659

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

Überspannungen bei Blitzschlägen an Kabeln mit ausgekreuzten Mänteln

Von *H. V. Stephanides*, Oberentfelden, und *M. Schmid*, Cossonay-Gare

551.594.221:621.3.015.38

Untersuchung der möglichen Überspannungen an dreipoligen Kabelanlagen mit ausgekreuzten Mänteln (zwischen Leiter—Metallmantel, Metallmantel—Metallmantel und Metallmantel—Erde) im Falle von Blitzschlägen in die angeschlossene Freileitung. Berechnung der Überspannungen an den Auskreuzungsstellen und Vergleich mit Messungen an einem 237 m langen geometrischen Modell einer Kabelanlage. Mit der entwickelten Berechnungsmethode wurden die Überspannungen an den Auskreuzungsstellen für verschiedenartige Kabelanlagen berechnet. An ungeschützten Kreuzungsstellen treten bei Naheinschlägen unzulässig hohe Überspannungen auf. Es wird vorgeschlagen, diese Überspannungen durch Einbau von Überspannungsableitern zwischen den Metallmänteln an den Kreuzungsstellen auf ungefährliche Werte zu begrenzen.

Le travail présenté a pour but l'étude des surtensions pouvant se produire (entre conducteur et gaine métallique, entre gaines et entre gaine et terre) dans des installations triphasées de câbles unipolaires à gaines permutées, dans le cas de coups de foudre frappant la ligne aérienne raccordée aux câbles. Les surtensions aux points de permutation sont calculées et comparées à des mesures effectuées sur une maquette de câbles longs de 237 m. Ces surtensions ont été déterminées pour différents types d'installations au moyen de la méthode de calcul décrite dans le présent article. Il ressort de cette étude que des surtensions inadmissibles apparaissent aux points de permutation non protégés, en cas de coups de foudre tombant à proximité du début de la partie en câbles. Il est proposé de limiter ces surtensions à une valeur inoffensive, par l'installation aux points de permutation, de parafoudres entre les gaines métalliques.

1. Einleitung

In den Metallmänteln von Kabelanlagen mit Einleiterkabeln werden Ströme induziert, sofern die Metallmäntel an beiden Kabelenden geerdet sind. Diese Mantelströme erzeugen hohe zusätzliche Verluste, durch welche die Belastbarkeit der Kabel beträchtlich vermindert wird.

Bei grossen Kabellängen ist eine beidseitige Erdung der Metallmäntel aus sicherheitstechnischen Gründen kaum zu umgehen. Um trotzdem grosse Mantelströme zu vermeiden, wird oft ein periodisches Auskreuzen der Metallmäntel gegenüber den Kabelleitern vorgenommen [1] [1]).

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den als Folge von Blitzeinschlägen in der Kabelanlage selbst auftretenden Überspannungen, insbesondere an den Auskreuzungsstellen. Es ist dabei vorausgesetzt, dass die Kabel bereits optimal mittels Überspannungsableitern geschützt sind. Als Folge der Änderung der Wellenwiderstände an den Auskreuzungsstellen treten bei Blitzeinschlägen in die Freileitung an diesen Auskreuzungsstellen Überspannungen sowohl zwischen Leiter und Metallmantel als auch zwischen Metallmantel und Erde auf [2; 4]. Im folgenden wird ein Verfahren angegeben, das die Berechnung dieser Überspannungen erlaubt.

Die Berechnungsmethode wurde durch Messungen an einer 237 m langen Kabelmodellanlage überprüft. Als Folgerung sind Massnahmen angegeben, insbesondere im Hinblick auf Schutz und Ausführung der Auskreuzungsstellen.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2. Einfluss der Einschlagpunkte und der Blitzströme

Betrachtet sei eine dreipolige Kabelanlage mit ausgekreuzten Kabelmänteln (Fig. 1 oder Fig. 2) und mit Überspannungsableitern an beiden Kabelenden, welche einseitig an eine Freileitung mit einem Erdseil angeschlossen ist. Der Vorgang in dieser Anlage bei einem Blitzschlag ist bestimmt durch den Spannungsverlauf am Kabeleingang. Die Auswirkungen des Blitzschlages seien daher anhand von diesem Spannungsverlauf beurteilt, unter Berücksichtigung der Art des Blitzschlages, der Vorgänge in der Freileitung und der Rückwirkung der Kabel.

In der Anlage ergeben sich infolge des Zusammenwirkens aller Faktoren einerseits Wanderwellen mit steilen Fronten, anderseits aber auch langsamere Zustandsänderungen, bei denen Anlageteile als konzentrierte Elemente betrachtet werden dürfen. Im wesentlichen hat man dabei die drei folgenden typischen Fälle:

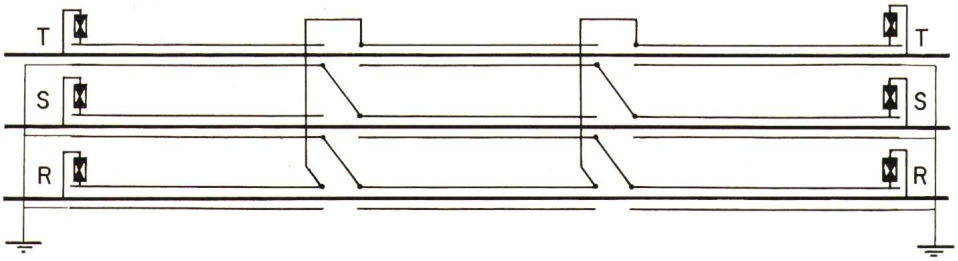

Fig. 1
Kabelanlage mit ausgekreuzten Mänteln und mit Überspannungsableitern zwischen Leitern und Erde
Prinzipschema

2.1 Naheinschlag des Blitzes
(< 200 m Abstand vom Kabeleingang)

Der in das Kabel fliessende Blitzstrom verursacht einen Spannungsabfall an dessen Wellenwiderstand. Während der doppelten Wellenlaufzeit in einem Teilstück der Kabelanlage

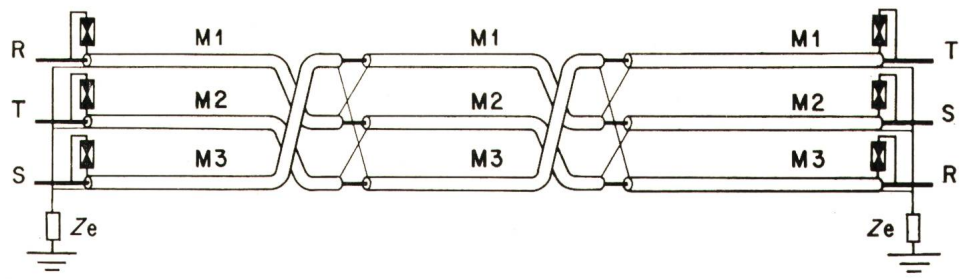

Fig. 2
Kabelanlage mit ausgekreuzten Mänteln und verdrillten Leitern mit Überspannungsableitern zwischen Leitern und Erde
R, S, T Phasen der betriebsfrequenten Wechselspannung
M1, M3 Mäntel der aussen liegenden Kabel
M2 Mantel des mittleren Kabels
Z_e Erdungsimpedanz an den Enden der Kabelanlage

ist dieser Spannungsabfall identisch mit der Spannung am Kabeleingang. Sofern die Anstiegsdauer der Spannung kürzer ist als die doppelte Wellenlaufzeit in einem der Kabelteilstücke, sind die Überspannungen in der ganzen Kabelanlage von der Steilheit des Blitzstromes unabhängig.

2.2 Blitzschläge in mittleren Abständen (200...2000 m vom Kabeleingang)

Es gilt die Ersatzschaltung in Fig. 3. Die Scheitelspannung der am Kabelende eintreffenden Wellen wird durch Erdüberschläge an Leitungsmasten erheblich gesenkt. Der Spannungsverlauf am Kabeleingang wird dagegen auch durch die Wellenfronten beeinflusst. Die Überspannungen an der Kabelanlage hängen somit ebenfalls von der Lage des Einschlagpunktes und von den Daten der Freileitung ab.

2.3 Blitzschläge in grossen Abständen (> 2000 m vom Kabeleingang)

Die Scheitelspannungen an der Kabelanlage werden durch die Wellenfronten praktisch nicht mehr beeinflusst (Abflachung durch die Wellendämpfung). Im wesentlichen wird daher nur eine mittelfrequente Schwingung zwischen der Induktivität der Freileitung und der Kabelkapazität angeregt [5].

3. Das Verhalten einer Kabelanlage mit ausgekreuzten Metallmänteln

Da die Überspannungen in der Kabelanlage durch den Spannungsverlauf am Kabeleingang bestimmt sind, dient in den folgenden Ausführungen die Scheitelspannung am Kabeleingang als normierte Einheit.

Durch die Auffassung der Kabelanlage als Kombination von Mehrpolen gemäss der Fig. 4 und unter Anwendung einer neuen Mehrpoltheorie [2]) konnte dabei der Überblick über das Verhalten der Kabelanlage verbessert und die Berechnung der Spannung vereinfacht werden. Die Untersuchung der Vorgänge in der Kabelanlage wurde so aufgelöst in drei Teile:

a) Wellenausbreitung im Kabel innerhalb der Metallmäntel;
b) Wellenausbreitung ausserhalb der Metallmäntel;
c) Wellenbrechung und Wellenreflexion an den Auskreuzungen und Kabelenden.

Die Eigenheiten der Wellenausbreitung sind dabei bekannt [9...13; 16; 17; 18]. Der Einfluss der Auskreuzungen wurde dagegen bisher nur näherungsweise berücksichtigt [14; 15]. Für ihre Berechnung seien deshalb genauere Formeln abgeleitet.

3.1 Erklärung der Vorgänge in einem Einleiterkabel

Betrachtet sei zunächst ein Ende eines Einleiterkabels gemäss Fig. 5. An einem ideal geerdeten Metallmantel, also bei verschwindender Erdungsimpedanz [3]) $Z_e = 0$, wird durch das umgebende Magnetfeld ein Strom induziert, der entgegengesetzt gleich ist dem Strom i_1 im Kabelleiter. Bei $Z_e \neq 0$ wird dagegen die Ausbildung dieses Mantelstromes behindert. In dem aus Metallmantel und Erdrückleitung bestehenden Stromkreis wird dadurch ein Strom i_2 hervorgerufen. Mit i_1 verknüpft ist dieser nur durch die Randbedingungen.

3.2 Erklärung der resultierenden Vorgänge in einer dreipoligen Kabelanlage

In einer dreipoligen Kagelanlage sind die Vorgänge innerhalb der Kabel gleich wie bei Einleiterkabeln. Ausserhalb der Metallmäntel überlagern sich dagegen die elektromagnetischen Felder ähnlich wie bei einer Drehstromleitung [11]. Es bilden sich dabei drei voneinander unabhängige Teilwellen mit verschieden verteilten Strömen und mit verschiedenen Ausbreitungsgeschwindigkeiten.

Bei zwei Teilwellen fliesst der grösste Teil der Hin- und Rückströme in den Kabeln [3]. Man bezeichnet sie meist als Mit- und Gegenkomponenten. Von der dritten Teilwelle fliesst der Rückstrom zum grössten Teil in der Erdrückleitung. Man bezeichnet sie als Nullkomponente [4]). Diese verhält sich gleich wie der Rückstrom eines Einleiterkabels (Fig. 5 und Tab. I).

Die Bedingungen sind dabei ähnlich wie an einer Freileitung (die Wellenwiderstände sind etwa halb so gross, die Ausbreitungsgeschwindigkeiten kleiner, die Frequenzabhängigkeiten stärker). Bekannte Berechnungsverfahren lassen sich daher anwenden [7; 8].

Sind die Kabel im Erdboden vergraben, so verursachen dielektrische Verluste und Wirbelströme eine besonders starke Dämpfung. Die Fronten der Wellen im Erdreich werden dadurch soweit abgeflacht, dass mit konzentrierten Erdungsimpedanzen gerechnet werden kann.

Alle Wellen werden mehrfach gebrochen und reflektiert, wobei immer neue Wellen hinzutreten. Das Eintreffen dieser

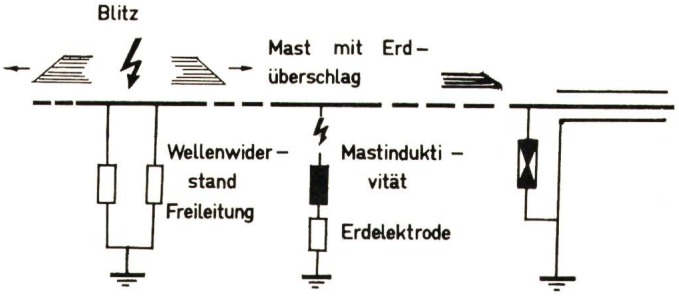

Fig. 3
Ersatzschaltung bei einem Blitzschlag in die Freileitung in mittlerem Abstand vom Kabelverschluss

[2]) Die Theorie wurde vom erstgenannten Autor entwickelt und soll demnächst auszugsweise publiziert werden.

[3]) Der Erdungswiderstand R_e ist der Ohmsche Anteil der Erdungsimpedanz Z_e. Er lässt sich einfach messen und ist ein brauchbares Mass für die Güte der Erdung, falls alle Erdleitungen sehr kurz sind.

[4]) Die Verteilung der Hin- und Rückströme hängt zusätzlich ab von der Geschwindigkeit der Zustandsänderungen. Die Stromverteilung an den als Mit-, Gegen- und Nullkomponenten bezeichneten Wellenkomponenten weicht deshalb etwas ab von der Verteilung an den gleich bezeichneten symmetrischen Komponenten.

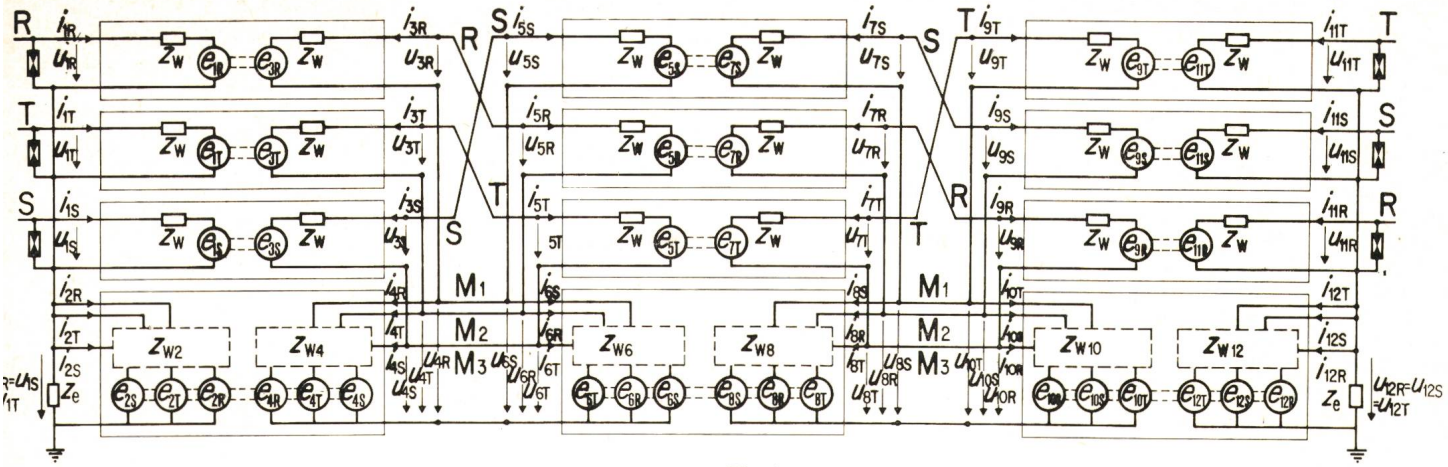

Fig. 4

Mehrpolschema der Kabelanlage gemäss Fig. 2 mit zweimaliger Verdrillung der Kabel und Auskreuzung der Kabelmäntel

R, S, T Phasen der betriebsfrequenten Wechselspannung
M1, M3 Mäntel der aussen liegenden Kabel
M2 Mantel des mittleren Kabels
Z_w Wellenwiderstand eines Kabels
Z_{wn} ($n = 2,4,6,8,10,12$) Wellenwiderstandsmatrix für den Raum ausserhalb der Kabelanlage bei den Enden der Teilstücke der Kabelanlage
u_{nR} Spannung am Kabel mit dem Leiter der Phase *R* der Klemmgruppe *n*
i_{nR} Strom am Klemmenpaar *n* der Phase *R*
e_{nR} EMK am Klemmenpaar *n* der Phase *R*

Wellen an den Kabelenden wird berücksichtigt durch die Annahme der elektromotorischen Kräfte (EMK) im Schema von Fig. 4. Die Spannungen, die Ströme und die EMK sind in diesem Schema die Komponenten von Dreiervektoren (Phasen R, S, T).

3.3 Vierpolgleichungen der Kreise innerhalb der Kabelmäntel

Den Kreisen innerhalb der Metallmäntel der Einleiterkabel in der Fig. 4 entsprechen an jedem Teilstück der Kabelanlage 3 Vierpole. Die Klemmenspannungen und die Klemmenströme sind an ihnen gleich den Randwerten der Spannungen Leiter-Metallmantel und der Ströme an den Enden der Kabelstücke. Die Klemmenspannung ist gleich der Summe des Spannungsabfalls des Klemmenstromes am Wellenwiderstand Z_w des Kabels, erhöht um den doppelten Randwert der im Kabel zum Klemmenpaar laufenden Wellen. Dieser Randwert wird aufgefasst als EMK. Er ist während der Wellenlaufzeit vorbestimmt. Seine Werte sind in den Wellen im Kabel gespeichert. Sie lassen sich mit bekannten Wanderwellenmethoden [16; 17] berechnen. Am Vierpol mit den Klemmenpaaren 1R, 3R ist:

$$u_{1R} = Z_w\, i_{1R} + e_{1R}$$

$$u_{3R} = Z_w\, i_{3R} + e_{3R}$$

Das Mehrpolschema der Kabelanlage in Fig. 4 enthält 9 derartige Vierpole. Ihre Vierpolgleichungen lassen sich zusammenfassen zu den Vektorgleichungen:

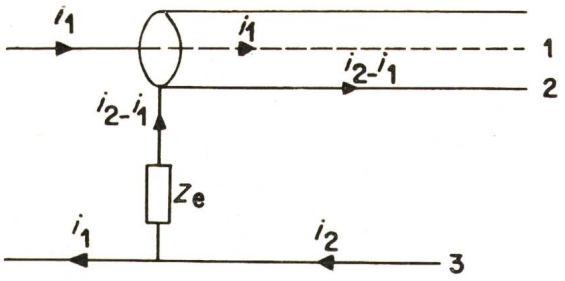

Fig. 5

Stromverteilung bei einem Kabelende mit Erdung des Kabelmantels über eine Impedanz Z_e

1 Kabelleiter; *2* Metallmantel; *3* Erdrückleitung

Induktivitäten, Ohmsche Erdwiderstände und mittlere Abstände der Rückströme bei einem Kabel mit einem Mantel von 0,03 m Aussenradius bei verschiedenen Frequenzen und Leitfähigkeiten der Erde

Tabelle I

Spez. Widerstand des Erdreichs Ω m	Frequenz kHz	Mittl. Abstand des Rückstromes vom Kabel r_m m	Richtwert der Induktivität L μH/m	Richtwert des Ohmschen Widerstandes R Ω/m
100	10000	0,62	0,60	52
	1000	1,95	0,84	5,3
	100	5,6	1,04	0,65
	10	16	1,26	0,08
	1	46	1,47	0,0093
1000	10000	1,95	0,84	53
	1000	5,6	1,04	6,5
	100	16	1,26	0,80
	10	46	1,47	0,093
	1	136	1,7	0,011

Bei der Abschätzung der Induktivität L wurde angenommen, dass der ganze Rückstrom im Abstand r_m vom Kabel fliesst, bei Abschätzung des Widerstandes R, dass sich der Strom gleichmässig über eine Kreisfläche mit dem Radius 1,25 r_m verteilt.

Der Radius r_m wurde so gewählt, dass die Augenblickswerte der berechneten induzierten Spannungen und Ohmschen Spannungsabfälle entgegengestzt gleich sind.

$$\boldsymbol{u}_n = Z_w\, \boldsymbol{i}_n + \boldsymbol{e}_n; \qquad n = 1, 3, 5, 7, 9, 11 \tag{1}$$

3.4 Die Mehrpolgleichungen der Vorgänge ausserhalb der Metallmäntel

Ausserhalb der Metallmäntel sind die Vorgänge wechselseitig verknüpft. Die Vektorgleichung hat hier die allgemeine Form:

$$\boldsymbol{u}_n = \boldsymbol{Z}_{wn} \cdot \boldsymbol{i}_n + \boldsymbol{e}_n; \qquad n = 2, 4, 6, 8, 10, 12 \tag{2}$$

Die $\boldsymbol{Z}_{wn}$ sind in Gl. (2) Matrizen. Ihre Elemente lassen sich mit bekannten Formeln berechnen. In ihnen ist die wechselseitige Verkopplung zwischen den Spannungen und Strömen an den Metallmänteln berücksichtigt. Alle EMK jedes Achtpols sind darin verknüpft durch die Wellen im Erdboden und in der Luft ausserhalb der Kabel. In Fig. 4 ist dies mit strichlierten Linien angedeutet.

3.5 Die Randbedingungen an den Auskreuzungen

Den Verdrillungen und Auskreuzungen in der Fig. 2 entsprechen die Querverbindungen im Schema der Fig. 4. Dem entspricht eine zyklische Vertauschung der Komponenten gemäss den Ansätzen:

$$\boldsymbol{a}_{\mathrm{n}}^{(1)} = \begin{bmatrix} a_{\mathrm{nT}} \\ a_{\mathrm{nR}} \\ a_{\mathrm{nS}} \end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{a}_{\mathrm{n}}^{(2)} = \begin{bmatrix} a_{\mathrm{nS}} \\ a_{\mathrm{nT}} \\ a_{\mathrm{nR}} \end{bmatrix} \qquad \begin{matrix} a = u \\ \text{oder} \\ a = i \end{matrix} \tag{3}$$

An der ersten Auskreuzung gelten damit die sechs Stromkreisbedingungen:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{u}_3 + \boldsymbol{u}_4 &= \boldsymbol{u}_5 + \boldsymbol{u}_6 \\ \boldsymbol{u}_4 &= \boldsymbol{u}_6^{(2)} \end{aligned} \tag{4}$$

und die sechs Knotenpunktbedingungen:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{i}_3 + \boldsymbol{i}_5 &= 0 \\ \boldsymbol{i}_3 - \boldsymbol{i}_4 + \boldsymbol{i}_5^{(2)} - \boldsymbol{i}_6^{(2)} &= 0 \end{aligned} \tag{5}$$

Die Vertauschung der Vektorenkomponenten wird berücksichtigt durch Vertauschen der Zeilen [Indices $^{(10)}$ bzw. $^{(20)}$] und der Spalten [$^{(01)}$ bzw. $^{(02)}$].

Man erhält so die Gleichungen

$$\begin{aligned} 2\,Z_{\mathrm{w}} \cdot \boldsymbol{i}_5 + (\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}6} - \boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}6}^{(20)})\,\boldsymbol{i}_6 &= \boldsymbol{e}_3 - \boldsymbol{e}_5 + \boldsymbol{e}_6^{(2)} - \boldsymbol{e}_6 \\ (\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}4} - \boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}4}^{(01)})\,\boldsymbol{i}_5 + (\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}4}^{(01)} + \boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}6}^{(20)})\,\boldsymbol{i}_6 &= \boldsymbol{e}_4 - \boldsymbol{e}_6^{(2)} \end{aligned} \tag{6}$$

Für die weitere Berechnung seien die Spannungen und die Ströme in 3 linear unabhängige Anteile zerlegt, die durch die EMK ($\boldsymbol{e}_3 - \boldsymbol{e}_5$), $\boldsymbol{e}_4$ und $\boldsymbol{e}_6$ hervorgerufen sind. Man berechnet diese durch Eliminieren eines Stromvektors. Die Gleichungen werden dazu mit inversen Matrizen multipliziert.

Mit der Annahme $\boldsymbol{e}_4 = \boldsymbol{e}_6 = 0$ und mit der Einheitsmatrix $\boldsymbol{E}$ ist

$$\begin{aligned} \boldsymbol{i}_5 &= [2\,Z_{\mathrm{w}} \cdot \boldsymbol{E} - (\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}6} - \boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}6}^{(20)}) \cdot (\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}6}^{(20)} + \boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}4}^{(01)})^{-1} \cdot \\ &\qquad \cdot (\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}4} - \boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}4}^{(01)})]^{-1} \cdot (\boldsymbol{e}_3 - \boldsymbol{e}_5) \\ \boldsymbol{i}_6 &= -(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}6}^{(20)} + \boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}4}^{(01)})^{-1} \cdot (\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}4} - \boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}4}^{(01)}) \cdot \boldsymbol{i}_5 \end{aligned} \tag{7}$$

unter der Annahme $\boldsymbol{e}_3 = \boldsymbol{e}_5 = \boldsymbol{e}_6 = 0$ wird

Daten der betrachteten 130-kV-Kabelanlage und der bei den Versuchen verwendeten Modell-Kabelanlage

Tabelle II

	130-kV-Kabelanlage	Modell-Kabelanlage
Kabellängen: Total	2370 m	237 m
1. Teilstück	790 m	79 m
2. Teilstück	820 m	82 m
3. Teilstück	760 m	76 m
Leiterradius r_{c}	11,5 mm	0,69 mm
Bleimantel Innenradius r_{i}	24,5 mm	1,50 mm
Bleimantel Aussenradius	27,1 mm	2,50 mm
PVC-Mantel Aussenradius	30,8 mm	3,50 mm
Achsabstand der Kabel d	≈150,0 mm	7,00 mm
Gemessene Wellen-Ausbreitungsgeschwindigkeit bei:		
Frequenzen 20 kHz	172 m/µs	161 m/µs
100...1000 kHz	171 m/µs	159 m/µs
Konstante für Zeittransformation		9,3
Wellenwiderstand bei 100...1000 kHz	26...31 Ω	29...26 Ω

Vergleich der gemessenen mit den berechneten Überspannungen am Modell der Kabelanlage bei Naheinschlag

Tabelle III

1. Auskreuzung				2. Auskreuzung	
	gemessen	berechnet	gemessen		gemessen
Spannung gemäss der Fig. 4	1. Spannungsstufe	0,93facher Wert der Brechungs und Reflexionsfaktoren	Scheitelspannung	Spannung gemäss der Fig. 4	Scheitelspannung
$u_{3\mathrm{T}}$	**1,22**	**1,24**	1,32	$u_{7\mathrm{T}}$	1,27
$u_{5\mathrm{T}}$	**0,64**	**0,62**	1,39	$u_{9\mathrm{T}}$	1,26
$u_{3\mathrm{S}}$	**0,18**	**0,19**	0,18	$u_{7\mathrm{S}}$	0,06
$u_{5\mathrm{S}}$	**0,18**	**0,19**	0,32	$u_{9\mathrm{S}}$	0,30
$u_{3\mathrm{R}}$	**0,10**	**0,11**	0,10	$u_{7\mathrm{R}}$	0,14
$u_{5\mathrm{R}}$	**0,12**	**0,11**	0,13	$u_{9\mathrm{R}}$	0,17
$u_{4\mathrm{T}}$	**0,31**	**0,36**	0,31	$u_{8\mathrm{T}}$	0,11
$u_{4\mathrm{S}}$	**0,27**	**0,26**	0,27	$u_{8\mathrm{S}}$	0,17
$u_{4\mathrm{R}}$	**0,10**	**0,14**	0,10	$u_{8\mathrm{R}}$	0,19

$$\begin{aligned} \boldsymbol{i}_6 &= \Big[(\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}4}^{(01)} + \boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}6}^{(20)}) - \frac{1}{2\,Z_{\mathrm{w}}} \cdot (\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}4} - \boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}4}^{(01)}) \cdot \\ &\qquad \cdot (\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}6} - \boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}6}^{(20)})\Big]^{-1} \cdot \boldsymbol{e}_4 \\ \boldsymbol{i}_5 &= \frac{1}{2\,Z_{\mathrm{w}}} \cdot (\boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}6} - \boldsymbol{Z}_{\mathrm{w}6}^{(20)}) \cdot \boldsymbol{i}_6 \end{aligned} \tag{8}$$

Eine ähnliche Form der Gleichung ergibt sich bei der Annahme von:

$$\boldsymbol{e}_3 = \boldsymbol{e}_4 = \boldsymbol{e}_5 = 0$$

Die anderen Stromvektoren berechnet man mit Hilfe der Gl. (5), die Spannung mit Hilfe der Gl. (1) und (2). Gemäss diesen Gleichungen sind alle Anteile der Ströme den EMK proportional. Die Proportionalitätsfaktoren entsprechen dabei den Reflexions- und Brechungsfaktoren an den Auskreuzungen. Für deren Berechnung wurde ein Digitalprogramm erstellt (Fortran IV).

3.6 Das Verhalten der ganzen Kabelanlage

Die Kabelanlage umfasst die ganze Schaltung gemäss der Fig. 4, also die beiden Kabelenden und die beiden Auskreuzungen. Die Gleichungen der zweiten Auskreuzung erhält man durch Vertauschung der Indizes (3→7, 4→8, 5→9, 6→10). Ausserhalb der Metallmäntel wird an den Kabelenden nur die Nullkomponente der Welle hervorgerufen. Die Ströme in der Erdungsimpedanz Z_{e} sind dabei gleich der Summe der Mantelströme (Fig. 5) $(i_{2\mathrm{R}} - i_{1\mathrm{R}}) + (i_{2\mathrm{S}} - i_{1\mathrm{S}}) + (i_{2\mathrm{T}} - i_{1\mathrm{T}})$ und der durch die Überspannungsableiter abgeführten Ströme.

Die Vorgänge in den Mehrpolen sind miteinander nur verkoppelt durch die Schaltverbindungen. Sie können unabhängig voneinander berechnet werden für angenommene, konstante, sprungartig einsetzende Klemmenströme. Man erhält so Sprungantwortkurven $e^{(\varepsilon)}$, deren Verlauf innerhalb der Metallmäntel nur von den Kabeldaten, ausserhalb der Metallmäntel von der Art der Verlegung der Kabel abhängt. Die zusätzlichen durch die EMK hervorgerufenen Stromkomponenten i (für die EMK $e_{3\mathrm{T}}$ sind dies beispielsweise die Ströme $i_{3\mathrm{R}}$, $i_{3\mathrm{S}}$) sind ihnen proportional. Sie können mittels den Formeln in Abschnitt 3.3 berechnet werden.

Bei der Berechnung des eigentlichen Vorganges werden die von aussen zu den Kabeln fliessenden Klemmenströme $i^{(\mathrm{a})}$ (Klemmenpaare 1, 2, 11, 12), die Sprungantwortkurven $e^{(\varepsilon)}$ und die EMK e zerlegt in Reihen von Einheitssprüngen

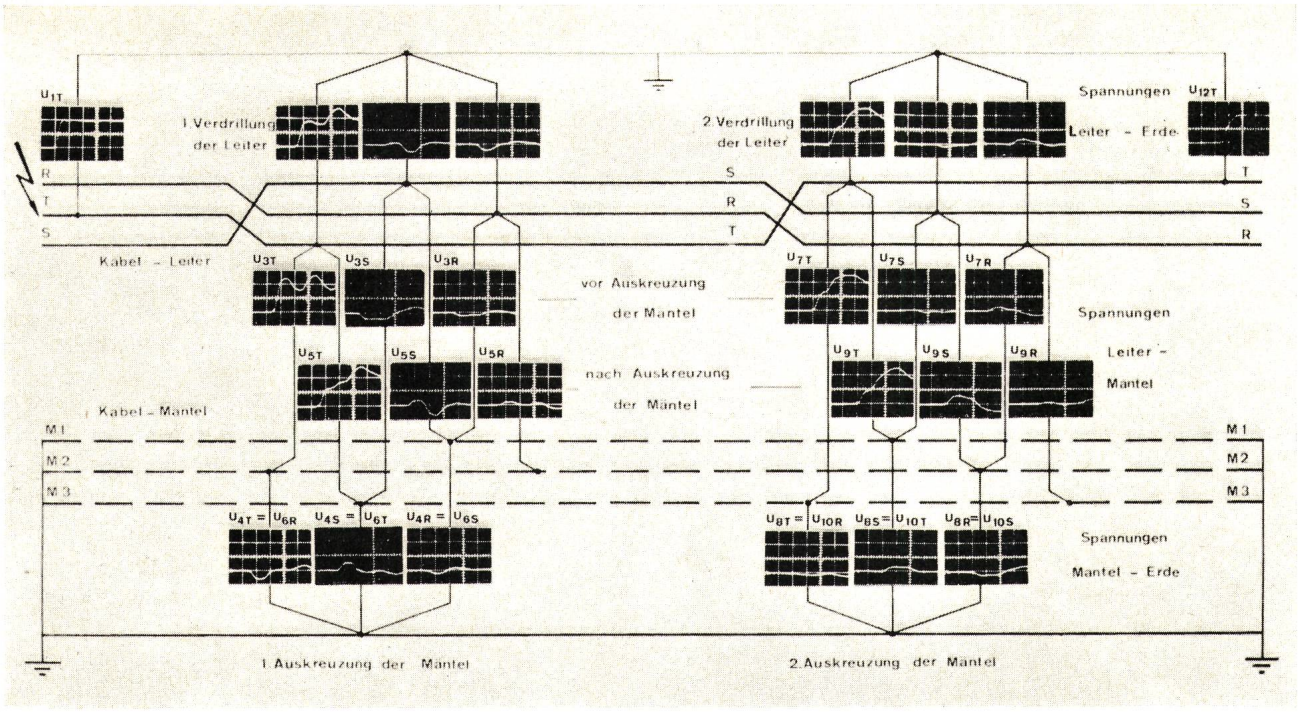

Fig. 6
Blitzschlag in den Leiter T im ersten Spannfeld der Freileitung
Spannungsverlauf am Eingang der Kabelanlage und an den Auskreuzungen bei den Versuchen an der Modellanlage in der Schaltung gemäss der Fig. 2, bei einer Anstiegsdauer der Spannung am Eingang von ≈ 30 % der doppelten Wellenlaufzeit in einem Teilstück der Anlage
Zeitmaßstab: 9,3 µs/Teilung
Spannungsmaßstab: 0,5 p.u./Teilung
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 4

$\varepsilon(t-k \cdot \Delta t)$ mit im Abstand Δt aufeinanderfolgenden Einsatzzeiten.

Man erhält so die Reihen

$$a = \sum_{k=0,1,2\ldots} a_k \cdot \varepsilon(t - k \cdot \Delta t) \tag{9}$$

$$a = i^{(a)} \quad \text{oder} \quad e^{(\varepsilon)} \quad \text{oder } e$$

Sind die Koeffizienten $i_k^{(a)}$ und $e_k^{(\varepsilon)}$ der Einheitsprünge in diesen Reihen bestimmt, so kann auch der Verlauf der EMK e berechnet werden. Die Koeffizienten e_k werden dazu unmittelbar aus den Koeffizienten $i_k^{(a)}$ und $e_k^{(\varepsilon)}$ bestimmt mit Hilfe der Formel

$$e_k = \sum_{m=0}^{k} i_m^{(a)} \cdot e_{k-m}^{(\varepsilon)} \tag{10}$$

4. Messung und Berechnung der Überspannungen am Modell einer Kabelanlage

Die Untersuchung erfolgte an einem geometrischen Modell [15; 18] mit Kabeln gemäss der Tabelle II, verlegt auf dem Betondach eines Fabrikgebäudes. Die Erdanschlüsse der Metallmäntel, der Spannungsquelle und des Freileitungsmodells waren verbunden durch einen geerdeten Leiter, der in grossem Abstand vom Kabel verlegt war, mit verschwindenden Erdübergangsimpedanzen $Z_e = 0$ in der Fig. 2.

Die Blitzschläge wurden simuliert mit Hilfe eines Keilwellengenerators [19]. Dieser liefert einen idealisierten Blitzstrom mit konstanter Anstiegssteilheit und mit exponentiell abfallendem Rücken. Bei einzelnen Versuchen wurde auch eine lange, an die Kabelanlage anschliessende Freileitung einpolig nachgebildet mit 112 Elementen eines Netzmodells [19]. (Einem Element entspricht dabei eine Leitungslänge von 75 m.) Es wurde angenommen, dass der mittlere Leiter mit der Phase T vom Blitz getroffen wird. Wie Vorversuche zeigten, ergeben sich dabei die höchsten Überspannungen.

4.1 Messung der Überspannungen bei Naheinschlägen

Der Einfluss der Strom-Spannungscharakteristik der Überspannungsableiter wurde vernachlässigt durch die Annahme einer konstanten Ansprech- und Restspannung. Das Ansprechen des Überspannungsableiters beim Kabeleingang an der betroffenen Phase erfolgte innerhalb von etwa 3 µs. Dies

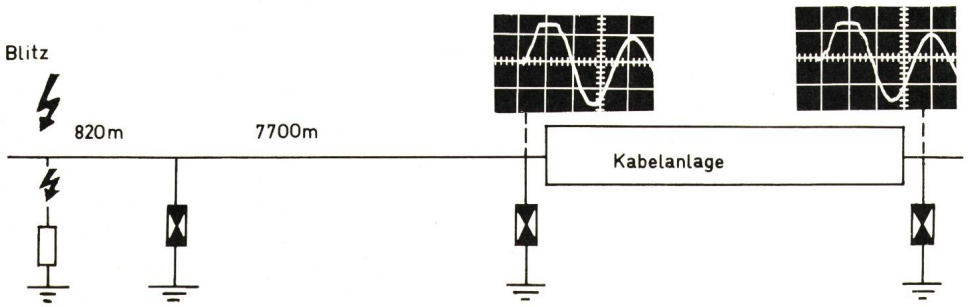

Fig. 7
Blitzschlag in 8,5 km Abstand vom Endverschluss der Kabelanlage in den Leiter T der Freileitung: Spannungen an der Kabelanlage
Zeitablenkung 186 µs/Teilung

sind 32 % der doppelten Wellenlaufzeit im ersten Teilstück des Kabels. Gemessen wurden die im Vierpolschema in Fig. 4 eingezeichneten Klemmenspannungen. Ihr Verlauf ist wiedergegeben in Fig. 6. Alle Kurven beginnen mit einem Spannungssprung, auf den nach je $\approx$ 10 µs (also nach der doppelten Laufzeit in einem Teilstück des Kabels) weitere Sprünge folgen. Die Amplituden der ersten Sprünge sind jeweils gleich den Amplituden der ersten eintreffenden Wellen, multipliziert mit einem Umrechnungsfaktor. Zusammen mit den Scheitelwerten der Spannung sind sie in der Tabelle III angegeben.

Anhand der Oszillogramme erkennt man das folgende typische Verhalten:

a) Die höchste Spannung Metallmantel—Erde ist die Spannung u_{4T} an der ersten Auskreuzung. Sie hat eine Amplitude von 0,31 p. u. und tritt auf bei der Reflexion der ersten an der Auskreuzung eintreffenden Welle.

b) Die höchste Spannung zwischen zwei Metallmänteln an der Auskreuzung ist fast doppelt so gross wie die höchste Spannung Metallmantel—Erde.

c) Die Spannungen Leiter-Metallmantel sind am grössten bei der ersten Auskreuzung. Die Spannung u_{3T} vor der Auskreuzung erreicht den Scheitelwert 1,32 p. u., die Spannung u_{5T} hinter der Auskreuzung den Scheitelwert 1,39 p. u. Beide Werte werden erreicht nach 25...30 µs, also nach der 5...6fachen Laufzeit in einem Kabelstück.

4.2 Überspannungen bei einem Blitzschlag in grossem Abstand vom Kabeleingang (8,5 km)

Fig. 7 zeigt die Ersatzschaltung und die Oszillogramme der Spannungen Leiter–Metallmantel am betroffenen Leiter T an den beiden Enden der Kabelanlage. Es sind dies die einzigen nennenswerten Überspannungen. Sie stammen von der Schwingung eines Kreises, der aus der Kabelkapazität und der Freileitungsinduktivität besteht.

Bei einem Blitzstrom von weniger als 32 kA ist die Amplitude der Schwingung kleiner als die Ansprechspannung der Ableiter. Bei grösseren Blitzströmen begrenzen die Ableiter die Spannung Leiter—Metallmantel. Diese bleibt aber immer $<$ 1,12 p. u.

4.3 Vergleich zwischen Berechnungen und Messungen an der Modellanlage

Die Brechungsfaktoren an der Modellanlage wurden berechnet mit dem im Abschnitt 3.5 erwähnten Digitalprogramm. Für die Dielektrizitatskonstante ε_e im Raum ausserhalb des Metallmantels wurde $\varepsilon_e = 3$[5]) angenommen (Berücksichtigung der relativ grossen Dicke der Mantelisolationen).

Die Wellendämpfung[6]) bei einmaligem Durchlaufen eines Kabelstückes wurde berücksichtigt durch Multiplikation mit dem Faktor 0,93. Die so berechneten Werte und die Sprünge am Anfang der Spannungskurven (Fig. 9) müssen gleich sein. In Tabelle III sind sie einander gegenübergestellt (Spalten mit fett gedruckten Werten). Sie stimmen gut überein.

5. Allgemeine Berechnungen

Für andere Kabelanlagen lassen sich die Überspannungen abschätzen, anhand der digital berechneten Werte der Reflexions- und Brechungsfaktoren. Wie Tabelle III erkennen lässt, sind nämlich die Überspannungen Metallmantel—Metallmantel und Metallmantel—Erde identisch mit den 0,93fachen Werten der zugehörigen Brechungs- und Reflexionsfaktoren (die Scheitelspannung wird also erreicht bei der Brechung der ersten Welle). Die Spannungen Leiter—Metallmantel erreichen dagegen ungefähr den 1,05fachen Wert des Reflexionsfaktors.

Die Überspannungen hängen ab vom Wellenwiderstand Z_w der Kabel, vom Kabelabstand d, vom äusseren Kabelradius r_a und von der Dielektrizitätskonstante ε_e in der Umgebung der Kabel. Der Abstand r_m der Rückströme hat praktisch wenig Einfluss. Die Beanspruchung der Mantelisolation hängt zusätzlich noch ab von den Ausgleichsvorgängen innerhalb der Erde. Diese seien berücksichtigt durch die Annahme einer erhöhten Dielektrizitätskonstante ε_e und durch die Berücksichtigung der Spannungsabfälle an den Spannungstrichtern der Erdelektroden an den beiden Enden der Kabelanlage, anhand der Betrachtungen im Abschnitt 6.

Die wichtigsten Ergebnisse der Berechnungen sind zusammengestellt in den Kurven der Fig. 9...12. Diese Kurven gelten für eine Anordnung der Kabel in einer Ebene gemäss der Fig. 8. Werden die Kabel anders angeordnet, beispielsweise mit gleichen Achsabständen zwischen allen Kabeln (Dreieck), so werden die Überspannungen nur unwesentlich kleiner.

6. Elektrische Beanspruchung der Mantelisolationen

Die Klemmenspannungen Metallmantel—Erde sind bezogen auf das Erdreich in sehr grosser Entfernung von der Kabelanlage. Sie sind verschieden von der Spannung an der Mantelisolation, nachdem auch innerhalb der Erde Spannungsabfälle auftreten.

Die Spannung an der Mantelisolation sei deshalb zusätzlich abgeschätzt, aufgrund einer Analyse der Vorgänge bei der Ausbreitung der Wellen ausserhalb des Metallmantels. Sie ist im wesentlichen bestimmt durch den Verlauf der Klemmenspannungen und der Klemmenströme Metallmantel—Erde und lassen sich also in ausreichender Näherung aus ihnen berechnen. Man beachte dabei, dass die Spannung im elektromagnetischen Feld in der Umgebung der Kabel vom Verlauf der Messleitungen abhängt. Dies gilt bereits bei quasistationären Bedingungen. Bei der Ausbreitung von steilen elektromagnetischen Wellen verstärken sich die Abhängigkeiten.

Diese Schwierigkeiten seien umgangen durch Auffassung der Spannungen Metallmantel—Erde und der Spannungen innerhalb des Erdreichs als Werte des skalaren elektrodynamischen Potentials [20], unter Annahme des Potentials Null in sehr grosser Entfernung von der Kabelanlage (2000 m). Un-

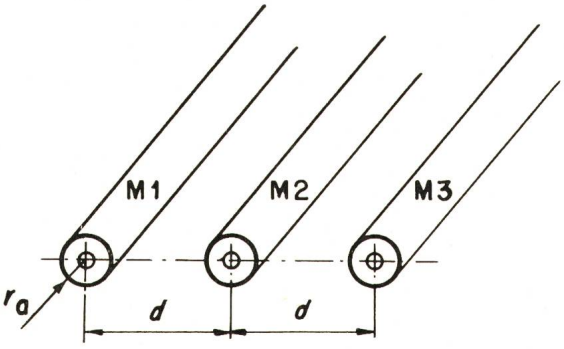

Fig. 8
Kabelanordnung mit allen drei Kabeln in einer Ebene

[5]) Das Dielektrikum ausserhalb der Metallmäntel besteht bei der Modell-Kabelanlage gemäss Tabelle II aus den Kunststoffmänteln, der umgebenden Luft und dem Beton des Daches. Seine resultierende Dielektrizitätskonstante ε_e ist relativ gross, nachdem sich die Kunststoffmäntel praktisch berühren.

[6]) Bei der Ausbreitung einer Welle führen Wirbelströme und dielektrische Verluste zu einer Abflachung der Wellenfront, Ohmsche Spannungsabfälle zu einer Absenkung der Amplitude.

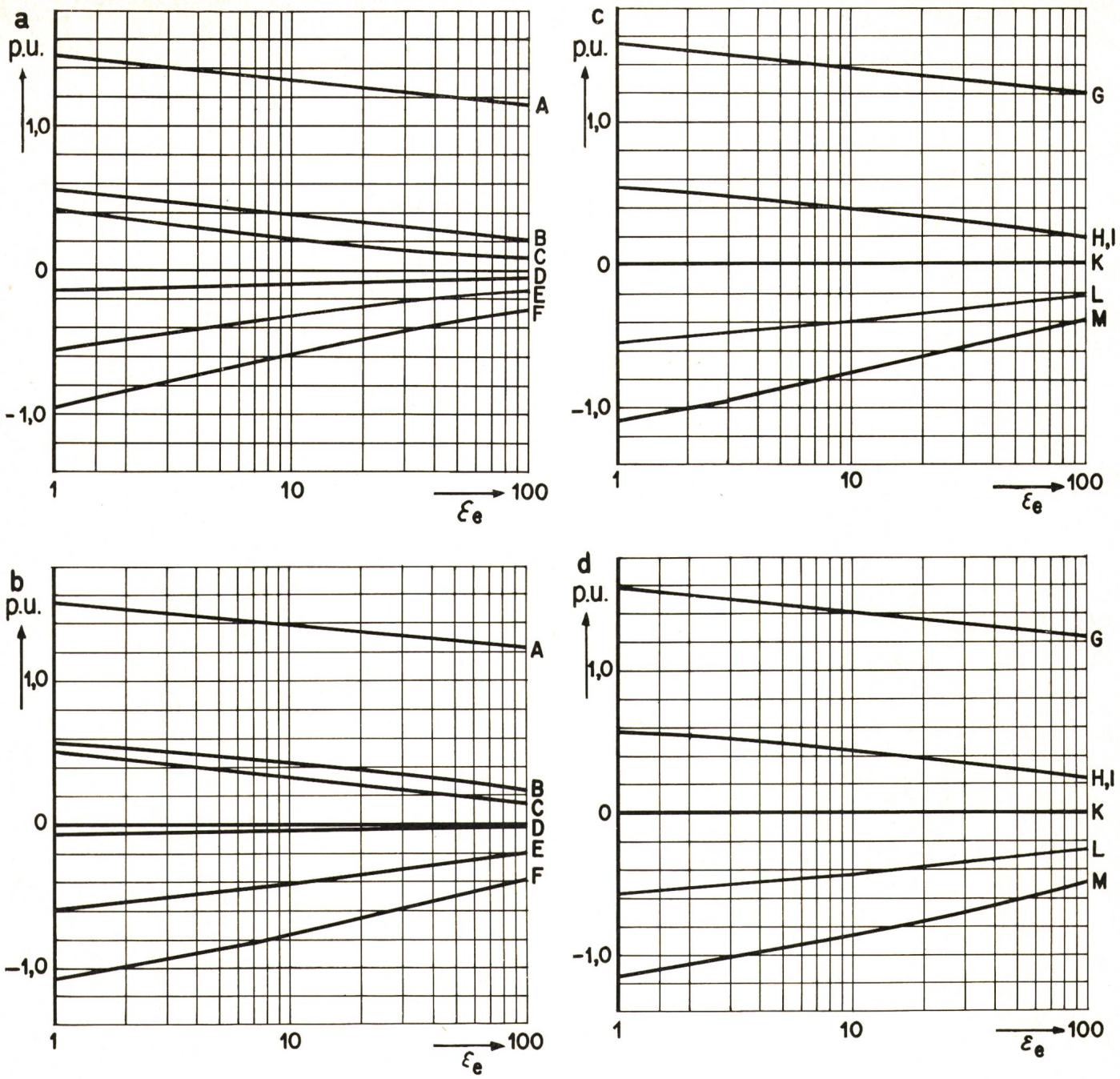

Fig. 9

Reflexions- und Brechungsfaktoren bei einer Überspannung am Leiter T (Verlegung gemäss Fig. 9) in Abhängigkeit von der Dielektrizitätskonstante ε_e ausserhalb der Kabel

a 1. Auskreuzung, $Z_w = 21{,}5\ \Omega$, $\frac{d}{r_a} = 3{,}65$

b 1. Auskreuzung, $Z_w = 21{,}5\ \Omega$, $\frac{d}{r_a} = 7{,}3$

A = U_{3T}
B = $U_{4S} - U_{4R}$
C = $U_{4R} - U_{4T}$
D = $(U_4)^\circ$ = Nullkomponente
E = U_{4T}
F = $U_{4T} - U_{4S}$

c 2. Auskreuzung, $Z_w = 21{,}5\ \Omega$, $\frac{d}{r_a} = 3{,}65$

d 2. Auskreuzung, $Z_w = 21{,}5\ \Omega$, $\frac{d}{r_a} = 7{,}3$

G = U_{7T}
H = $U_{8S} - U_{8R}$
I = $U_{8R} - U_{8T}$
K = $(U_8)^\circ$ = Nullkomponente
L = U_{8T}
M = $U_{8T} - U_{8S}$

berücksichtigt bleiben dabei nur Anteile des Feldes, die von Änderungen der Ströme im Kabel hervorgerufen sind[7]), (diese haben die Richtung der Kabelachse, beanspruchen also die Mantelisolation nicht).

Mit derart definierten Spannungen kann sauber gerechnet werden, wobei auch die Vereinfachungen der Wanderwellenrechnung [16] näherungsweise zulässig sind. Die Beanspruchungen der Mantelisolationen lassen sich mit ihnen ermitteln. Man geht dazu aus von den Vorgängen innerhalb des Erd-

[7]) Die Spannungen Metallmantel–Erde lassen sich mit brauchbarer Genauigkeit messen mit Meßsonden, die in einer Ebene senkrecht zur Kabelachse in einer ausreichenden Entfernung in das Erdreich gesteckt werden. Verfälscht wird die Messung dabei nur durch Spannungen, die von Strömen quer zur Kabelachse induziert werden sowie durch Spannungsabfälle von kapazitiven Ladeströmen an den Messleitungen.

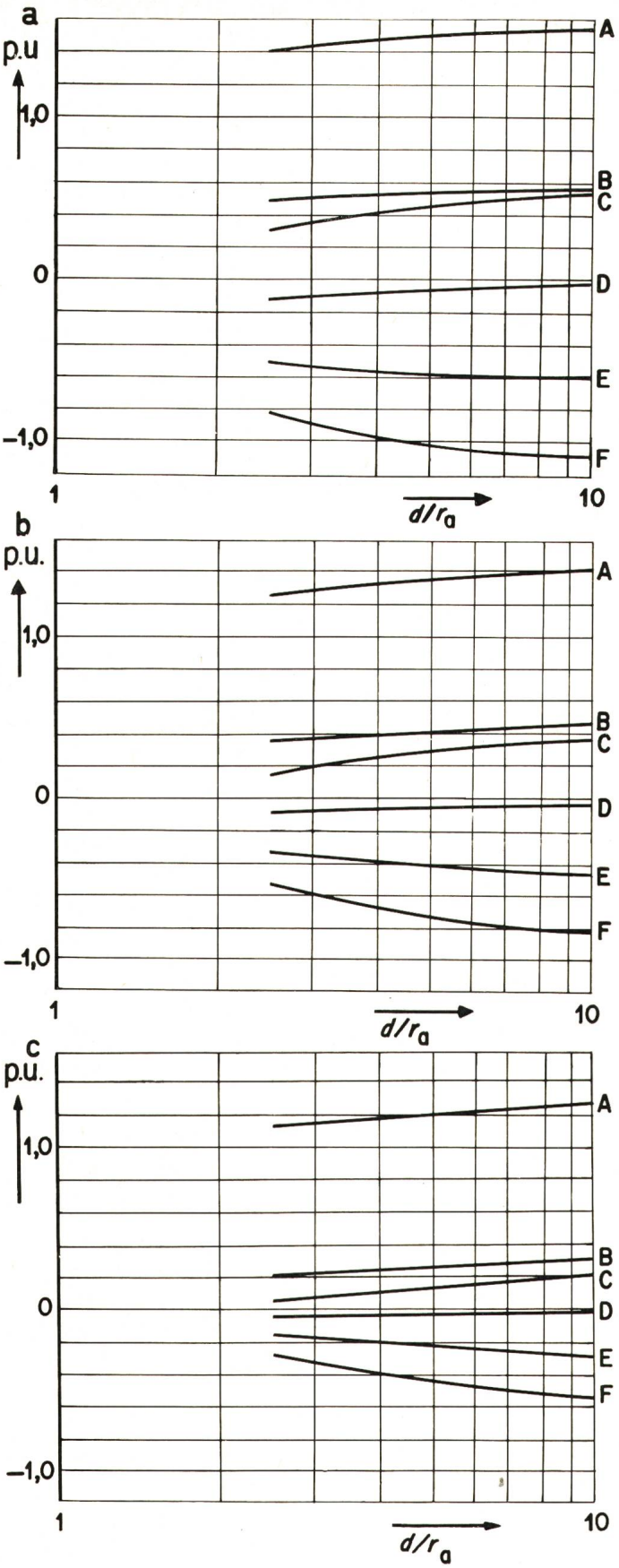

Fig. 10

Reflexions- und Brechungsfaktoren an der 1. Auskreuzung (Verlegung nach Fig. 8) in Abhängigkeit vom Kabelabstand d, bezogen auf den Aussenradius des Metallmantels r_a

a $Z_w = 21{,}5$, $\varepsilon_e = 1{,}2$
b $Z_w = 21{,}5$, $\varepsilon_e = 8{,}0$
c $Z_w = 21{,}5$, $\varepsilon_e = 50$

A = U_{3T}
B = $U_{4S} - U_{4R}$
C = $U_{4R} - U_{4T}$
D = $(U_4)^\circ$ = Nullkomponente
E = U_{4T}
F = $U_{4T} - U_{4S}$

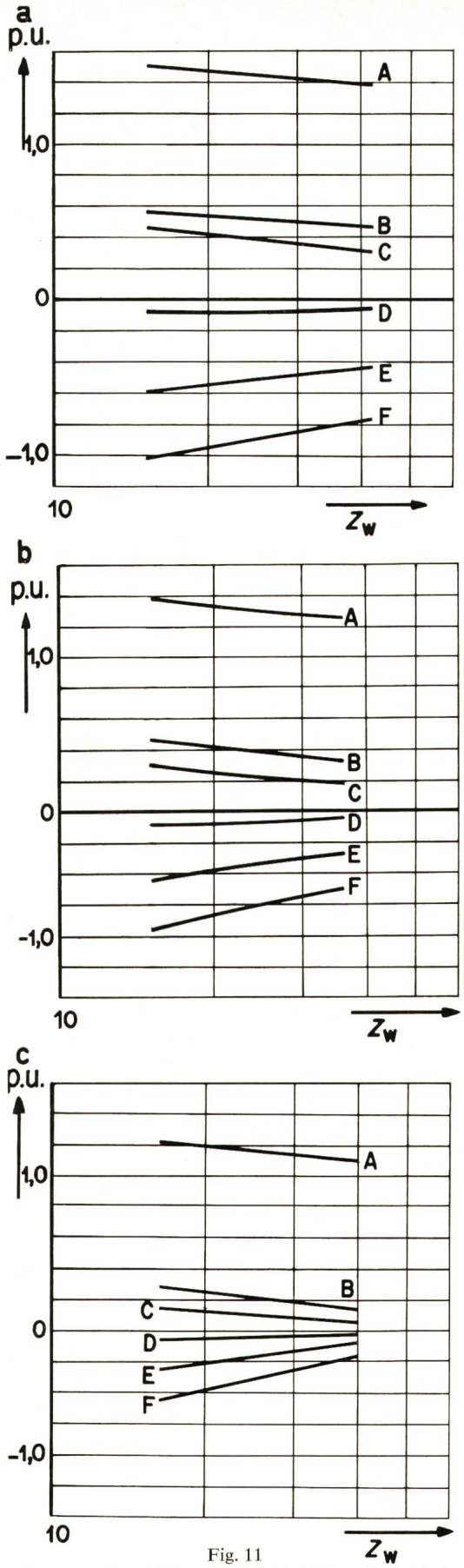

Fig. 11

Reflexions- und Brechungsfaktoren an der 1. Auskreuzung (Verlegung nach Fig. 8) in Abhängigkeit vom Wellenwiderstand des Kabels Z_w

a $\frac{d}{r_a} = 3{,}65$, $\varepsilon_e = 1{,}2$
b $\frac{d}{r_a} = 3{,}65$, $\varepsilon_e = 8{,}0$
c $\frac{d}{r_a} = 3{,}65$, $\varepsilon_e = 50$

A = U_{3T}
B = $U_{4S} - U_{4R}$
C = $U_{4R} - U_{4T}$
D = $(U_4)^\circ$ = Nullkomponente
E = U_{4T}
F = $U_{4T} - U_{4S}$

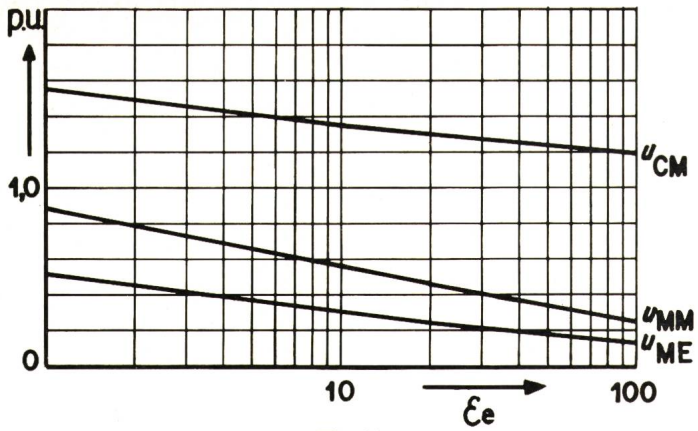

Fig. 12
Maximale Überspannungen an der Kabelanlage gemäss Fig. 2
(Verlegung nach Fig. 8)
Abhängig von der Dielektriziätskonstante ausserhalb der Kabel

ε_e bei $Z_W = 21{,}5\ \Omega$ und $\frac{d}{r_a} = 3{,}65$

u_{CM} Spannung Leiter—Mantel
u_{MM} Spannung Mantel—Mantel
u_{ME} Spannung Mantel—Erde

reichs. Zu beachten sind darin zwei Vorgänge, eine Welle in der Richtung der Kabelachse und Ausgleichsströme in der Richtung senkrecht zur Kabelachse.

Hervorgerufen werden diese Vorgänge durch zwei verschiedene Ursachen:

a) *Wellenreflexionen an den Auskreuzungen*

Die ursprüngliche Welle wird hervorgerufen durch einen Spannungssprung. Die Spannung zwischen den Metallmänteln der Kabel verteilt sich in ihr über die Kunststoffmäntel der Kabel und über die Luft- und Erdstrecken zwischen den Kabeln. Die Spannungsverteilung ist dabei zunächst bestimmt durch die geometrische Anordnung und durch die Dielektrizitätskonstanten. Die Mantelisolation ist dabei nur mit einem kleinen Teil der Klemmenspannung beansprucht.

Praktisch wird diese Verteilung jedoch durch folgende Einflüsse gestört:

aa) Durch Stromleitung im Erdreich quer zur Kabelachse kann sich die Spannungsverteilung so verlagern, dass die Mantelisolation mit der Klemmenspannung beansprucht wird (bei den üblichen spez. Widerständen des Erdbodens von 100...1000 Ωm erfolgt der Ausgleich mit einer Zeitkonstante von ≈ 0,1 µs).

ab) Der Raum zwischen den Mantelisolationen ist von Anfang an überbrückt durch metallische Armaturen.

ac) Luftstrecken werden überlastet und durch Teilentladungen überbrückt.

b) *Spannungsabfälle an Erdelektroden*

Als Folge von solchen Spannungsabfällen an den Enden der Kabelanlage entstehen Nullkomponenten von Wellen Metallmantel—Erde und Rückströme in der Erde. Die zugehörigen Spannungsbeanspruchungen der Mantelisolationen überlagern sich den unter a) beschriebenen Vorgängen.

Die Rückströme in diesen Wellen fliessen nun hauptsächlich im Erdreich. Sie werden durch die Ohmschen Spannungsabfälle vom Kabel weggedrängt und fliessen zum grössten Teil in mehr als 10 m Abstand von den Kabeln. Die für die Ausbildung der Rückströme massgebliche Induktivität ist somit ziemlich gross (siehe Tab. I). Der Erdrückstrom kann folglich nur verhältnismässig langsam zunehmen. Die Ströme quer zur Kabelachse, durch welche sich die Spannungen von der Erde zu den Mantelisolationen hin überlagern (ähnlich wie unter a) können daher nur langsam zunehmen, sie müssen dicke Erdschichten durchfliessen und können dabei starke Ohmsche Spannungsabfälle verursachen. Die Zeitkonstante, mit welcher die Mantelisolationen aufgeladen werden, kann demnach verhältnismässig gross werden (etwa 1...10 µs).

7. Der Schutz von Kabelanlagen gegen Blitzüberspannungen

Für die Begrenzung der Überspannungen Leiter—Metallmäntel benötigt man Überspannungsableiter zwischen Leiter und Metallmänteln an den Enden der Kabelanlage gemäss Fig. 2, mit möglichst kurzen Verbindungen zu den Endverschlüssen, gemeinsam geerdet mit den Kabelmänteln (der Einbau derselben wurde vorausgesetzt). Zusätzlich erforderlich ist eine Begrenzung der Spannungen an den Mantelisolationen. Ein Anteil dieser Spannungen stammt von der Wellenbrechung an den Auskreuzungen. Man begrenzt ihn auf einen unschädlichen Restwert durch den Einbau von Überspannungsableitern in △-Schaltung an den Auskreuzungsstellen. Damit diese nach dem Abklingen des Einschwingvorgangs sicher löschen, müssen sie Nennspannungen von 1,5...9,0 kV haben (abhängig vom eingeschwungenen Kurzschlußstrom und von der Länge der Teilstücke der Kabelanlage). Ihr Nennableitstrom sollte mindestens 10 kA betragen, nachdem sie von den Mantelströmen durchflossen werden, welche ziemlich gross sein können und oft lange andauern (doppelte Laufzeit in der Kabelanlage).

Ein zweiter unabhängiger Anteil der Beanspruchung der Mantelisolation stammt von Spannungsabfällen an den Erdungen der Kabelanlage. Man kann diese mit einer der beiden folgenden Massnahmen begrenzen:

a) *Niederohmige Erdungsimpedanzen* Z_e, (Fig. 2)

Man benötigt niederohmige Erdungen (<2 Ω) und induktivitätsarme Erdleitungen. Zusammen mit den Spannungsabfällen an den Erdungstrichtern an den Enden der Kabelanlage sinken damit auch alle zusätzlichen elektrischen Beanspruchungen der Mantelisolationen (siehe Abschnitt 6).

b) *Verlegung eines parallelen blanken Erdseils bei der Kabelanlage*

Ein solches Erdseil hat eine doppelte Wirkung. Einerseits bildet es eine Fortsetzung des Erdsystems, verringert also den Übergangswiderstand der Erdelektrode; andererseits begrenzt es die elektrischen Beanspruchungen an den Kunststoffmänteln auf einen Bruchteil des Wertes der Spannung Metallmantel—Erde. Die von aussen her in Querrichtung zur Kabelanlage fliessenden Ströme werden zum Teil durch dieses Erdseil abgeleitet.

Metallische Armaturen an den Kabeln sollten mit einem solchen Erdseil verbunden werden. Dies gilt speziell bei Verlegung der Kabelanlage in einem Kanal. Das Erdseil ist hier innerhalb des Kanals zu verlegen, mit Querverbindungen zu den metallischen Armierungen der Kanalwände.

Werden mehrere Kabelanlagen in Serie geschaltet, so wird dieses Erdseil meist nur bei der ersten freileitungsseitigen Anlage benötigt. An den übrigen Kabelanlagen sind die Spannungsdifferenzen zwischen den Metallmänteln und der Erde nur mehr klein.

Eine zusätzliche Begrenzung der Spannungen Metallmantel—Erde an den Auskreuzungsstellen lässt sich erzielen mit Überspannungsableiter in ⅄-Schaltung und mit einer zusätzlichen Erdung ihres Sternpunktes über eine Erdelektrode ($R_e < 30\,\Omega$). Solche Ableiter in Sternschaltung müssen eine erhöhte Nennspannung haben. Es liegt an ihnen eine zusätzliche Spannung, die dem Stosskurzschlußstrom proportional ist.

8. Hauptresultate

Es wurde eine Berechnungsmethode entwickelt, welche erlaubt, die Überspannungen an den Auskreuzungsstellen zu ermitteln. Die Berechnungsmethode wurde überprüft durch Messungen an einem geometrischen Modell einer bestimmten Kabelanlage (Maßstab 1:10). Rechnung und Messung stimmen gut überein (siehe Tabelle III).

Für die praktisch möglichen Kabelanlagen mit ungeschützten Auskreuzungen wurden die Überspannungen an den Auskreuzungsstellen berechnet. Ihre oberen und unteren Grenzwerte sind in Tabelle IV zusammengestellt.

Tabelle IV

Verlegungsart der Kabelanlage	Obere und untere Grenzwerte der Spannungen bei Naheinschlägen* an den ungeschützten Auskreuzungsstellen, angegeben in Vielfachen der am Kabeleingang auftretenden Scheitelspannung Leiter gegen Metallmantel		
	L – MM	MM – MM	MM – E
Direkt im Erdreich	1,2...1,4	0,3...0,5	0,2...0,3
In begehbarem Kanal	1,5...1,6	0,75...0,9	0,4...0,5

* Bei Blitzströmen > 15 kA mit einer Anstiegsdauer von < 10 µs [6].

Der in Tabelle IV angegebene Streubereich ist abhängig von den Parametern der Kabelanlage wie:

a) Wellenwiderstand der Kabel;
b) Verhältnis zwischen dem Achsabstand der Kabel und dem Aussenradius.

Werden die Mantelisolationen der Kabel durch Überspannungsableiter an den Auskreuzungen geschützt, so werden alle Überspannungen soweit abgesenkt, dass sie nur unwesentlich (um einen Betrag der Grössenordnung der Restspannung der Ableiter an den Auskreuzungen) grösser sind als an Kabeln ohne Auskreuzungen.

9. Schlussfolgerungen

a) Im Falle von Blitzeinschlägen in die Freileitung in unmittelbarer Nähe der Kabelenden können unzulässige hohe Spannungen an ungeschützten Auskreuzungsstellen der Metallmäntel auftreten (zwischen Leiter—Metallmantel sowie Metallmantel und Erde). Dies gilt auch für Kabelanlagen, welche an beiden Kabelenden mit Überspannungsableitern zwischen Leitern und Metallmänteln ausgerüstet sind.

b) Zur Begrenzung der Überspannungen an den Auskreuzungsstellen wird vorgeschlagen, an diesen Orten entsprechend dimensionierte Überspannungsableiter in △-Schaltung einzubauen.

c) Die in Tabelle III angegebenen Überspannungen an den Auskreuzungsstellen treten nur bei Naheinschlägen (< 200 m vom Kabelende) auf. Mit zunehmender Entfernung des Blitzeinschlages vom Kabeleingang werden sie kleiner. Bei Einschlägen in mehr als 3000 m Entfernung besteht keine Gefahr mehr für normal isolierte Auskreuzungsstellen.

Auch Schaltvorgänge und Überschläge an den Kabelendverschlüssen können zu ähnlichen Vorgängen und somit zu Defekten an ungeschützten Auskreuzungsstellen führen.

Die Autoren möchten dem Service Industrielle de Genève, den Firmen Câbleries et Tréfileries de Cossonay und Sprecher + Schuh AG, Aarau, für die Überlassung der notwendigen Unterlagen und Versuchseinrichtungen sowie *P. Bongard, E. Contalbrigo* und *A. Brülhart* für ihre Ratschläge und Hilfe bei den Messungen und der Programmierung der digitalen Berechnung, *R. Thaler* und *Th. Heinemann* für ihre Ratschläge und Hilfe bei der Abfassung des Textes den besten Dank aussprechen.

Literatur

[1] *H. Halperin* and *K. W. Miller:* Reduction of sheath losses in single-conductor cables. J. AIEE 48(1929)1, p. 20...25.
[2] *M. Fallou:* Application des composantes symétriques au calcul de la montée en tension des gaines métalliques des câbles unipolaires lors de courts-circuits entre phase et terre. Rev. Gén. Electr. 72(1963)6, p. 358...364.
[3] *M. Fallou:* Analyse des procédés permettant de supprimer les pertes dans les gaines métalliques de câbles unipolaires à courant alternatif. Rev. Gén. Electr. 74(1965)6, p. 481...499.
[4] *E. H. Ball, E. Occhini* and *G. Luoni:* Sheat overvoltages in high-voltage cables resulting from special sheat-bonding connections. Trans. IEEE PAS 84(1965)10, p. 974...988.
[5] *A. Roth:* Hochspannungstechnik. 4. Auflage. Wien, Springer-Verlag, 1959.
[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] *T. Udo:* The attenuation and distortion of short-tail traveling waves on overhead power transmission lines. Trans. IEEE PAS 84(1965)4, p. 310...314.
[8] *H. V. Stephanides* und *E. Eichenberger:* Überspannungen an Generatoren in Blockschaltung und Massnahmen zu ihrer Begrenzung. Bull. SEV 61(1970)1, S. 2...7.
[9] *J. Stavnes:* Atténuation des ondes transitoires dans les cables à haute tension. Rapport CIGRE Nr. 314 bis III, 1960.
[10] *F. Ollendorf:* Erdströme. 2. Auflage, Basel, Birkhäuser-Verlag, 1969.
[11] *D. E. Hedmann:* Propagation on overhead transmission lines. I.: Theory of modal analysis. Trans. IEEE PAS 84(1965)3, S. 200...205.
[12] *J. A. Robert* and *K. Tran-Dinh:* New digital simulation for ground-mode switching surge response of EHV transmission systems. Trans. IEEE PAS 88(1969)5, S. 597...603.
[13] *G. Gary* et *G. Gervais:* Calcul de la réponse transitoire d'une ligne triphasée à un échelon unité de tension. EDF Bull. Dir. Etudes et Recherches Série B -(1968)2, p. 53...82.
[14] *T. Imai* and *Y. Watanabe:* Calculation of traveling waves on single-conductor cable circuit with cross-bonding. Trans. IEEE PAS 87(1968)6, p. 1507...1514.
[15] *A. G. Heaton* and *A. M. H. Issa:* Transient response of crossbonded cable systems. Proc. IEE 117(1970)3, p. 578...586.
[16] *J. R. Carson:* The present status of wire transmission theory and some of its outstanding problems. Bell System Techn. J. 7(1928)2, p. 269...280.
[17] *H. Prinz, W. Zaengl* und *O. Völcker:* Das Bergeron-Verfahren zur Lösung von Wanderwellenaufgaben. Bull. SEV 53(1962)16, S. 725...739.
[18] *F. A. Fisher, J. G. Anderson* und *J. H. Hagenguth:* Determination of lightning response of transmission lines by means of geometrical models. Trans. AIEE PAS 79(1960)46, 1725...1734.
[19] *H. V. Stephanides:* Lösung von Überspannungsschutzproblemen durch Anlagemodelle. Bull. SEV 55(1964)6, S. 256...260.
[20] *R. Becker* und *F. Sauter:* Theorie der Elektrotechnik. Bd. 1: Einführung in Maxwellsche Theorie, Elektronentheorie, Relativitätstheorie. 19. Auflage. Stuttgart, Teubner-Verlag, 1969.

Adresse der Autoren:
H. V. Stephanides, Sprecher + Schuh AG, 5036 Oberentfelden, und
M. Schmid, Câbleries et Tréfileries de Cossonay, 1303 Cossonay-Gare.