

Zeitschrift:	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber:	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band:	51 (1960)
Heft:	11
Artikel:	Notwendigkeit und Schutzwert metallischer Mäntel von Sekundärkabeln in Höchstspannungsanlagen und in Hochgebirgsstollen, als Beispiel der Schutzwirkung allgemeiner Faradaykäfige
Autor:	Berger, K.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-917035

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.02.2026

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

GEMEINSAMES PUBLIKATIONSORGAN

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

Notwendigkeit und Schutzwert metallischer Mäntel von Sekundärkabeln in Höchstspannungsanlagen und in Hochgebirgsstollen, als Beispiel der Schutzwirkung allgemeiner Faradaykäfige

Von K. Berger, Zürich

621.316.93 : 621.315.221.5/.7 : 621.3.027.822

Im Anschluss an ein Referat vor der Mitgliederversammlung der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) vom 19. November 1959 berichtet der Autor über Überspannungerscheinungen an Mess-, Steuer- und Telefonkabeln in Freiluftanlagen für 220 kV und in Hochgebirgsstollen von Wasserkraftwerken. Die Ursache dieser Erscheinungen und der damit verbundenen Störungen lässt sich auf Grund des Induktionsgesetzes finden; sie wurde durch Versuche bestätigt. Es zeigt sich dabei die grosse Bedeutung, die metallischen Manteln auf Kabeln für Niederspannung und Schwachstrom zu kommt, um Durchschläge als Folge hoher und steiler Überspannungen, die bei Schaltvorgängen in Hochspannungsanlagen oder infolge Blitzschlags im Hochgebirge entstehen, zu vermeiden. Auf die Frage der Bemessung des Mantelquerschnitts wird hingewiesen und gezeigt, dass es sich bei der Schutzwirkung der metallischen Kabelmantel lediglich um einen Spezialfall des Schutzes durch einen Faradaykäfig beliebiger Form handelt, wie er z. B. in der Blitzmeßstation und der Sende anlage auf dem Monte San Salvatore realisiert ist.

En complément du rapport qu'il a présenté à l'Assemblée de la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension (FKH), le 19 novembre 1959, l'auteur donne des renseignements sur des phénomènes de surtension survenus à des câbles de mesure, de commande, et téléphoniques dans des installations en plein air à 220 kV et dans des galeries en haute montagne d'usines hydro-électriques. La cause de ces phénomènes et des perturbations qui en résultent s'explique par la loi d'induction, ce qui a été confirmé par des essais. Ce faisant, on s'est rendu compte de la grande importance des gaines métalliques de câbles à basse tension et pour courant faible, qui permettent d'éviter des perforations à la suite de fortes surtensions à front raide, provoquées par des manœuvres de couplage dans des installations à haute tension ou par des coups de foudre en haute montagne. En ce qui concerne le dimensionnement de la section des gaines métalliques, l'auteur indique que l'effet protecteur de ces gaines est simplement un cas particulier de la protection par une cage de Faraday d'une forme quelconque, comme celles qui ont été aménagées, par exemple, dans la station de mesure de la foudre et dans le poste d'émission du Monte San Salvatore.

1. Sekundärkabel in Höchstspannungsanlagen

Von einem schweizerischen Elektrizitätswerk wurde im Frühling 1958 beobachtet, dass beim Öffnen und Schliessen von Trennern in einer soeben vollendeten 220-kV-Anlage Schäden an Messinstrumenten im Betriebsgebäude auftraten, die den Eindruck beträchtlicher Überspannungen erweckten. Die Untersuchung mit einem einfachen Kathodenstrahlzoszillographen (KO), zunächst durch das Werkpersonal, später durch die FKH, führte zum Nachweis von Überspannungsspitzen in der Grösse von einigen kV zwischen den Adern des Messgruppenkabels und dem Eisengestell im Dienstgebäude. Diese Überspannungen waren die Ursache der Instrumentenschäden.

Die Anordnung der Anlage ist aus den Fig. 1 und 2 ersichtlich. Fig. 1 zeigt das Prinzipschema eines Transformatorfeldes von 220 kV mit den Sammelschienen SS , dem Trenner Te , dem Schalter S , der Messgruppe M , dem Überspannungsableiter A und

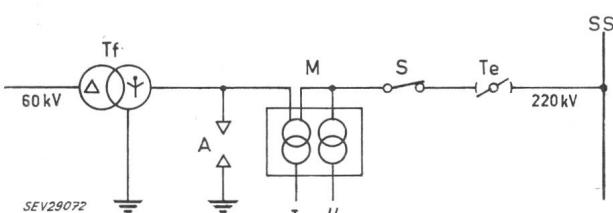


Fig. 1

Prinzipschema des Versuchsfeldes der ersten 220-kV-Anlage
 A Überspannungsableiter 220 kV; M Messgruppe für Strom I und Spannung U ; S Schalter; SS Sammelschiene 220 kV; Te Trenner mit Motorantrieb; Tf Leistungstransformator 60/220 kV

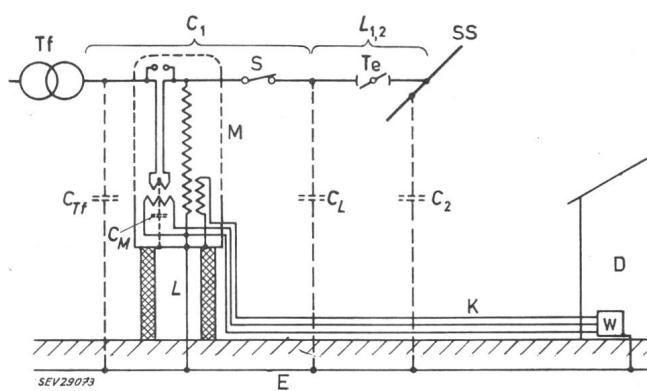


Fig. 2

Schema der Messgruppe M mit mantellosem Kabel K zum

Wattmeter W
 C_{T_f} Erdkapazität des Transfornators bis zur Messgruppe;
 C_M Erdkapazität der Messgruppe; C_L Erdkapazität des Feldes zwischen M und Te ; $C_1 = C_{T_f} + C_M + C_L$; C_2 Erdkapazität der Sammelschiene SS ; D Dienstgebäude; E vermaschtes Erdungsnetz; K mantelloses Messkabel; L Induktivität der Erdleitung der Messgruppe; $L_{1,2}$ Induktivität zwischen C_1 und C_2 ; M Messgruppe für Strom und Spannung; S Schalter; SS Sammelschiene 220 kV; Te Trenner mit Motorantrieb; Tf Leistungstransformator 60/220 kV

dem Transformator T_f . Fig. 2 zeigt den Anschluss der Messgruppe M mit dem Sekundärkabel K , das zum Wattmeter W im Dienstgebäude D führt. Die Kabellänge betrug ungefähr 60 m für das untersuchte Feld. Die Messgruppe M war auf ein ca. 2 m über dem Boden befindliches kurzes Gleisstück gestellt, das auf vier Betonstützen steht. Die Erdleitung L war an einer dieser vier Stützen zum Boden geführt und dort mit dem Erdungsnetz E der Anlage verbunden. Ein Punkt der Sekundärwicklungen der Messgruppe, nämlich ein Pol der Spannungswandlerwicklung und ein Pol der Stromwandlerwicklung war vorschriftsgemäß mit dem Eisengehäuse der Messgruppe und damit über die Erdleitung L mit der Anlageerdung E verbunden. Zur gleichen Erdung führte natürlich das erdseitige Ende der Hochspannungswicklung des Spannungswandlers.

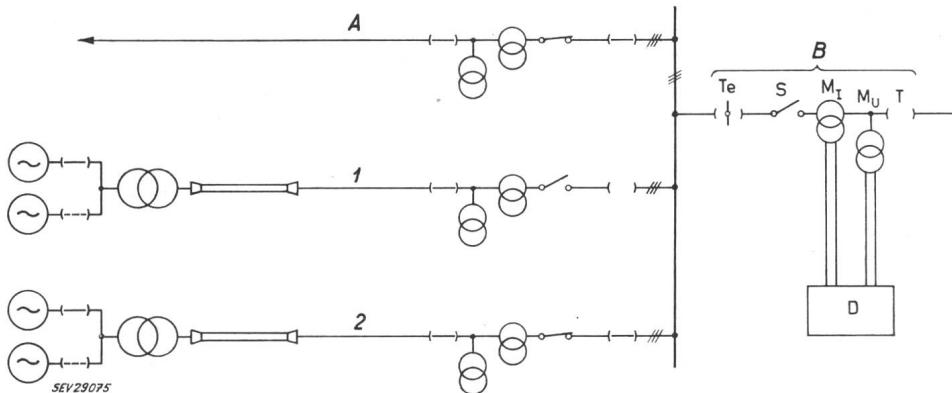


Fig. 4

Prinzipschema der zweiten untersuchten 220-kV-Anlage

1, 2 Generator-Transformatorenfelder; A abgehende 220-kV-Leitung; B Versuchsfeld; D Dienstgebäude; M_I , M_U Strom- und Spannungswandler; S Schalter; SS Sammelschiene 220 kV; T offener Leitungstrenner; Te Versuchstrenner

Am anderen Ende des Messkabels K waren die üblichen Volt-, Ampère- und Wattmeter angeschlossen. Dabei waren hier aus Gründen der Messgenauigkeit alle Drähte frei, d. h. nicht geerdet geführt.

Als Kabel K wurde in der Anlage zunächst ein Starkstrom-Thermoplastkabel ohne metallischen Mantel verlegt. Im gleichen Kabel befanden sich auch Adern für die Steuerung eines Schalters, sowie für verschiedene Rückmeldungen.

Als Variante wurde dieses mantellose Kabel K bei den Versuchen provisorisch ersetzt durch ein Bleimantelkabel. Der Bleimantel wurde dabei in üblicher Weise an beiden Enden geerdet, d. h. einerseits mit dem Eisengehäuse der Messgruppe, anderseits mit der Eisenkonstruktion im Dienstgebäude verbunden (Fig. 3).

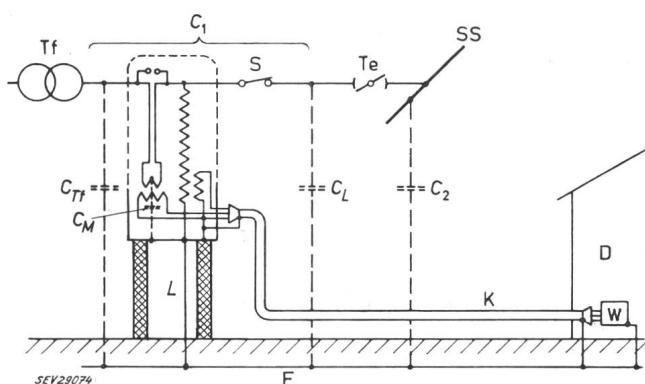


Fig. 3

Schema der Messgruppe M mit Metallmantelkabel K zum Wattmeter W
Bezeichnungen siehe Fig. 2

Überspannungserscheinungen in dieser Anlage wurden nun beobachtet, wenn bei geschlossenem Schalter S der Trenner Te betätigt wurde. Dabei befand sich der Transformator T_f unter Spannung; die Sammelschiene SS dagegen war spannungslos und hatte auch keinerlei Verbindung zu anderen Feldern. Die Betätigung des Trenners Te geschah durch einen ferngesteuerten Motorantrieb. Bei der langsamen Drehung des Trennerarms entstehen beim Schliessen die ersten Überschläge, wenn die Öffnungsdistanz kleiner wird als dem Scheitelwert der Phasenspannung entspricht. Bei abnehmender Schlagweite sinkt die Grösse der Zündspannung entsprechend der Schlagweite in jeder Halbperiode. Beim Öffnen des Trenners wächst umgekehrt die Grösse der Zündspannung mit der Öffnungsdistanz. Auch können jetzt Rückzündungen mit er-

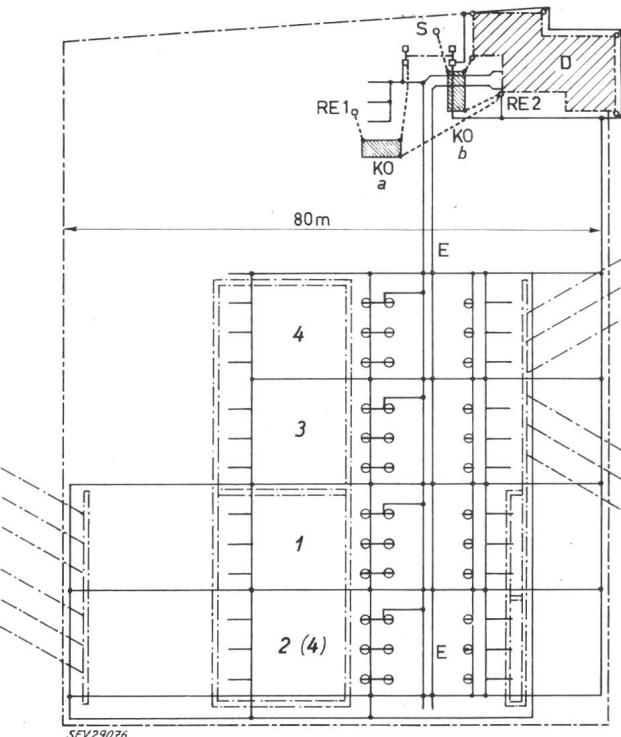


Fig. 5

Disposition des KO-Messwagens in der zweiten untersuchten 220-kV-Anlage

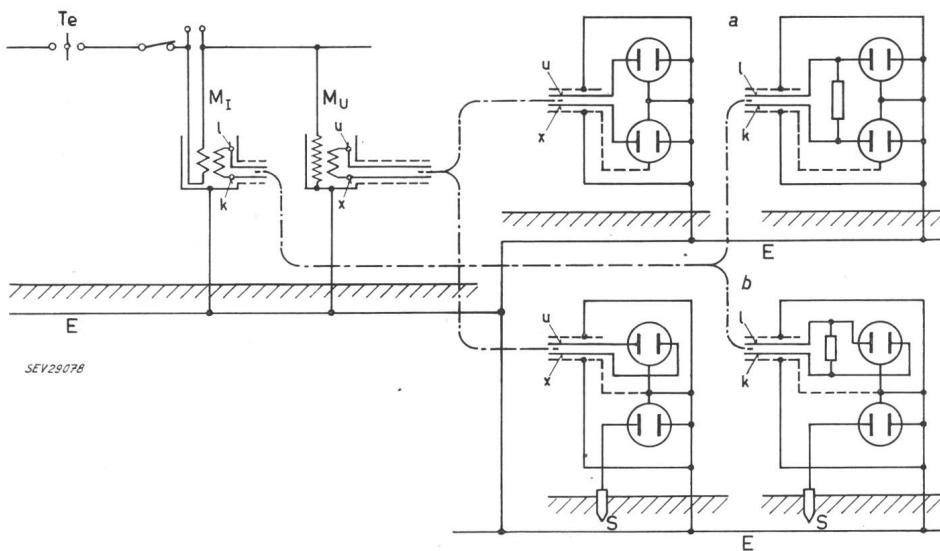
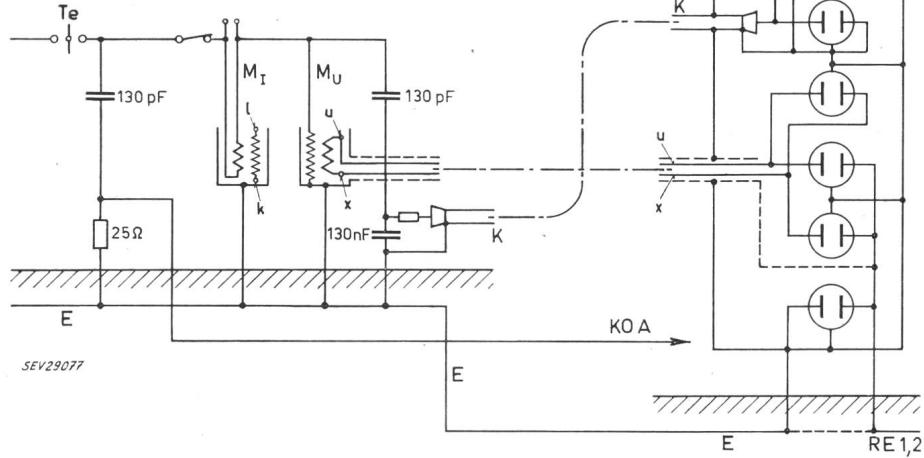
1, 2 Generator-Transformatorenfelder; 3 Leitungsfeld A der Fig. 4; 4 Versuchsfeld B der Fig. 4; E Erdungssystem; D Dienstgebäude; KO Messwagen mit 6 Kathodenstrahlzosillographen, a 1. Wagenstellung, b 2. Wagenstellung; RE 1, RE 2 Referenzerdungen für Wagenstellung a; S Sonde für Wagenstellung b

höhter Spannung auftreten, weil die Sammelschiene geladen zurückbleibt und damit die Zündung in der folgenden Halbwelle der Wechselspannung erleichtert. Während dieses üblichen knatternden Funkenspiels am Trenner wurden nun im Dienstgebäude mit dem KO kurzdauernde Spannungsspitzen von 1...3 kV zwischen den Sekundärdrähten und dem Eisengerüst des Gebäudes festgestellt, wenn das Kabel K keinen Metallmantel besass (Fig. 2). Diese Überspannungen verschwanden praktisch vollständig, wenn ein Kabel K mit beidseitig geerdetem Metallmantel benutzt wurde (Fig. 3).

Die FKH hatte Gelegenheit, in einer anderen 220-kV-Anlage den gleichen Vorgang zu beobachten und dabei verschiedene Ausführungen metallischer Kabelmantel zu vergleichen. Diese

Fig. 6
Schema für
Überspannungsmessung bei
Wagenstellung a
 (siehe Fig. 5)

E Erdungsnetz der Anlage;
 K Messkabel; k, l Unterspannungsklemmen des Stromwandlers;
 u, x Unterspannungsklemmen des Spannungswandlers;
 KO Kathodenstrahlloszillograph;
 KO A Auslöseleitung zum KO;
 M_1 Stromwandler; M_U Spannungswandler; $RE 1, RE 2$, Referenzerdungen; SO Schleifenoszillograph; Te Trenner



zweite Anlage war bei den Versuchen nach dem Schema von Fig. 4 geschaltet. Sie bestand aus einer Sammelschiene mit zwei Generator-Transformator-Feldern I und 2 und einem Leitungsfeld A , die im normalen Betrieb standen. An diese Schiene wurde ein zweites Versuchsfeld B , bestehend aus Trenner T_e , Schalter S und Messwandlern M_I und M_U (ohne abgehende Leitung), mit dem Trenner T_e zu- und abgeschaltet, wobei der Schalter S stets geschlossen und der Leistungstrenner T stets offen blieb. Die Anordnung des KO-Messwagens in der

Schaltanlage vor dem Dienstgebäude *D* ist aus Fig. 5 ersichtlich.

In diesem Fall wurden die Spannungen im und vor dem Betriebsgebäude zwischen den Messadern und der «Erde» in den Anordnungen a und b gemessen (Fig. 6 und 7). In Fig. 6 wurde als «Erde» der an die Anlageerdung vor dem Betriebsgebäude geerdete KO-Messwagen oder eine Referenzerdung *RE 1* oder *RE 2* benutzt, in Fig. 7 eine beim Messwagen in den Boden getriebene Sondererdung *S*, bestehend aus drei dünnen Stäben, oder dann das Eisengerüst im Dienstgebäude. Bei diesen Ver-

suchen konnten Kabel ohne und mit Metallmantel, und zwar sehr verschiedene Ausführungen von Metallmänteln, als Sekundär-Messkabel der Messgruppe wahlweise zur Messung angeschlossen werden.

Fig. 7
**Schema für
Überspannungsmessung bei
Wagenstellung b
(siehe Fig. 5)
S Sondererdung**
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 6

Die Resultate der Überspannungsmessungen zwischen Adern und «Erde» am Ende der Messkabel sind in Tabelle I zusammengestellt. Es ist daraus ersichtlich, dass die Überspannungen am grössten sind, wenn keine Metallmäntel und auch keine beidseitig geerdeten Kabeladern vorhanden sind. Die Erdung der freien, nicht benützten Kabeladern an beiden Enden bringt bereits eine deutliche Verminderung der Höhe von Überspannungen. Bei Bleimänteln und annähernd auch bei einem Mantel aus Eisenbandarmierung verschwinden die Überspan-

Zusammenstellung der untersuchten Kabel und der grössten zwischen Kabeladern und Erde vor dem Dienstgebäude gemessenen Spannungen

Tabelle I

Kabel	Spannungs- (U) oder Strom- (I) Wandler (Fig. 6 und 7)	Feld Nr. (Fig. 5)	Mess- anordnung	Grösste Spannungsspitzen zwischen Kabelader und Erde	
				Ader u bzw. l V	Ader x bzw. k V
Tdc $4 \times 16 \text{ mm}^2$, 115 m (ohne Metallmantel)	U	4	a	4400	3800
	U	4	b	2200	2600
	I	4	b	1750	2100
	U	2	b	3000	3000
	U	4	b	2900	3400
Kabel in einer Schleife verlegt, die eine grosse Fläche umfasst.	I	4	b	1400	1750
Kabel an den Verteilkasten angeschlossen					
Tdc $4 \times 16 \text{ mm}^2$, 115 m (ohne Metallmantel), die freien Adern auf beiden Seiten an Erde gelegt	U	2	b	900	670
Tdc $4 \times 6 \text{ mm}^2$, 50 m (ohne Metallmantel)	U	4	b	1550	2900
	I	4	b	1400	2900
Tdc $4 \times 6 \text{ mm}^2$, 29 m (ohne Metallmantel)	U	4	b	2200	3200
Tdc $4 \times 6 \text{ mm}^2$, 29 m, die zwei freien Adern auf beiden Seiten an Erde gelegt	U	4	b	1050	1100
Tdc $4 \times 16 \text{ mm}^2$, 127 m, mit Metallmantel (armiert)	U	4	a	630	≤ 300
	U	4	b	670	170
	U	2	b	640	110
	I	4	b	360	270
Gummi-Bleikabel $4 \times 6 \text{ mm}^2$, 72 m	U	4	a	760	≈ 200
	U	4	b	700	30
	I	4	b	550	210
Gummi-Bleikabel $4 \times 2,5 \text{ mm}^2$, 29 m	U	4	b	1100	460
Gummi-Bleikabel $4 \times 16 \text{ mm}^2$, 206 m (armiert)	U	4	a	530	≈ 0
	U	4	b	480	0
	U	2	b	590	10

nungen praktisch ganz. Die hier nicht reproduzierten Kathodenstrahl-Oszillogramme zeigen sehr kurze Überspannungsspitzen, die im Moment der Funkenzündungen am Trenner entstehen und dann in gedämpfte Schwingungen übergehen.

Die Entstehung der festgestellten Überspannungen kann sowohl aus der quasistationären Betrachtung auf Grund des Induktionsgesetzes als auch aus der Betrachtung des Wanderwellenvorganges verstanden werden. Beide Methoden haben ihre Begründung, weil die Wellenlaufzeiten über die Leiterlängen in der Anlage nicht stark verschieden sind von den quasistationären Eigenzeiten \sqrt{LC} oder den Periodendauern $2\pi\sqrt{LC}$ der Schwingungen, die beim Betätigen des Trenners angestossen werden. Um die wesentliche Erscheinung herauszuschälen, sind vereinfachende Annahmen nötig, die nachher durch Korrekturen zu berücksichtigen sind.

Zunächst soll der Wellenvorgang beim Schliessen des Trenners Te betrachtet werden. Fig. 8 zeigt das vereinfachte Prinzipschema der vom Vorgang erfassten Leitungen. Beim Schliessen des Trenners Te wird die auf seiner linken Seite vorhandene momentane Ladespannung u_0 (zum Beispiel der Scheitwert der Betriebsspannung, $250\sqrt{2}/\sqrt{3} \approx 200 \text{ kV}$) auf die Hälfte abgebaut, indem nach rechts eine Ladewelle ($u_0/2$), nach links eine Entladewelle ($-u_0/2$) anläuft. Mit $u_0 = 200 \text{ kV}$ bedeutet dies eine 100-kV -Welle u_v , die gegen die Messgruppe M läuft. Im Anschlusspunkt P der Messgruppe teilt

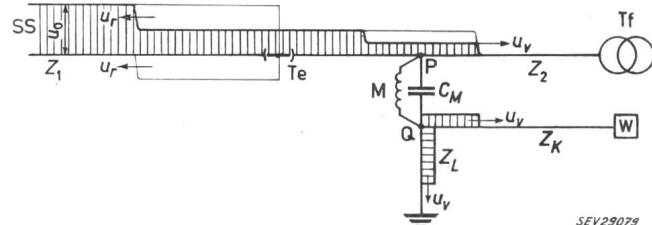


Fig. 8
Darstellung der Wellenbrechung an der Messgruppe M (Punkte F und Q) für unendlich grosse Messkapazität C_M
M Messgruppe für Strom und Spannung; SS Sammelschiene 220 kV; Te Trenner mit Motorantrieb; T_f Leistungstransformator 60/220 kV; u_0 Ladespannung beim Schliessen des Trenners Te ; u_v vorlaufende Ladewelle; u_r rückläufige Ladewelle; W Wattmeter im Dienstgebäude; Z_1 Wellenwiderstand der Freileitung; Z_2 Wellenwiderstand der Zuleitung zu T_f ; Z_K Wellenwiderstand des Kabels; Z_L Wellenwiderstand der Erdleitung

sich die Welle in drei Teile: Der erste läuft weiter zum Transformator T_f , der zweite fliesst über die anfangs noch ungeladene Kapazität C_M nach der Erdleitung L , der dritte Teil ebenfalls über C_M nach dem Messkabel K . Im Knotenpunkt P , Q der vier Leiter (C_M als Kurzschluss) entsteht durch Brechung und Reflexion im 1. Moment eine Spannung

$$u_{PQ} = \frac{2}{n} u_v = \frac{1}{2} u_v = 50 \text{ kV}$$

sofern jeder Leiter den Wellenwiderstand Z aufweist ($Z \approx 500 \Omega$). Würde der Wellenwiderstand

des am Erdboden im Betonkanal liegenden Kabels K gegen Erde mit $Z_K = 100 \Omega$ eingesetzt, so würde dieses Kabel fünf Parallelleitungen zu 500Ω entsprechen und die Spannung im Verbindungspunkt würde

$$u_{PQ} = \frac{2}{8} u_v \approx 25 \text{ kV}$$

Mit 500Ω Wellenwiderstand jedes Leiters fliessst auf jedem ein Strom

$$\frac{u_v}{Z} = \frac{50000}{500} = 100 \text{ A}$$

Total fliessen somit 300 A vom Knoten weg; der selbe Strom wird aus der Zuleitung geliefert, weil dort die Wellenspannung im 1. Moment von 100 kV auf 50 kV gesenkt wird.

Unter der Annahme, dass die Erdleitung L sehr kurz sei gegen T_f und K , d. h. wenn Punkt Q direkt geerdet ist, würde sich C_M mit der Zeitkonstante

$$T = \frac{Z}{2} C_M$$

auf 100 kV laden. Die Aufladung geschieht mit anfänglich 200 A . Bei einer Kapazität C_M von z. B. 500 pF wird die Spannung 50 kV mit der Zeitkonstante

$$T = \frac{50000 \cdot 500 \cdot 10^{-12}}{200} = \frac{1}{8} \mu\text{s}$$

erreicht, die Spannung 100 kV mit $\frac{1}{4} \mu\text{s}$.

Die auf den Leitungen L und K vom Punkt Q ausgehenden Wellen haben daher diese sehr kurze Dauer, die einem Laufweg von $37,5 \text{ m}$ bzw. 75 m entspricht. Im allgemeinen wird die Leitung L bis zu den ersten Knotenpunkten des Erdungsnetzes kürzer sein als $37,5 \text{ m}$. Wenn als wirksame Länge einer unverzweigten Leitung L die $2\dots3$ fache Strecke bis zum ersten Knotenpunkt des Erdungsnetzes gerechnet wird, so ergeben sich dafür z. B. $(2\dots3) \cdot 7 \text{ m} \approx 15\dots20 \text{ m}$. Der Strom in der Erdleitung L wird somit in Stufen von ca. $0,1 \mu\text{s}$ Dauer ($2 \cdot 15 = 30 \text{ m}$ Laufweg) anwachsen und sehr rasch den vorher genannten Wert des Falls mit Leitungslänge $L = 0$ erreichen. Nach $0,1\dots0,2 \mu\text{s}$ wird C_M geladen sein, womit die Überspannungswelle nach dem Kabel K aufhört.

Fig. 9 zeigt zunächst den nach der Methode *Bergeron* ermittelten Spannungsverlauf der Punkte P und Q gegen Erde für das in der Figur skizzierte Schema mit 15 m wirksamer Erdleitungslänge. Dabei ist die Messgruppen-Kapazität C_M als ∞ gross angenommen worden, ebenso die Kabellänge K und die Leitungslänge bis zum Transformator T_f . Deren Wellenwiderstände lassen sich als Widerstand $R = Z/2 = 250 \Omega$ zusammenfassen. Es heisst dies, dass Fig. 9 nur gültig ist bis zur Aufladung der Kapazität C_M nach ca. $0,1\dots0,2 \mu\text{s}$ und bis zum Eintreffen der reflektierten Wellen aus dem Kabel K (bei 100 m Kabellänge ca. $\frac{2}{3} \mu\text{s}$) und aus der Leitung zum Transformator (mit 30 m Länge ca. $0,2 \mu\text{s}$). Unter diesen Voraussetzungen dringt nach Fig. 9 eine ausserordentlich steile und hohe Welle von 50 kV Höhe (mit $Z_1 = Z_2 = Z_K = Z_L = 500 \Omega$) bzw. 25 kV (mit

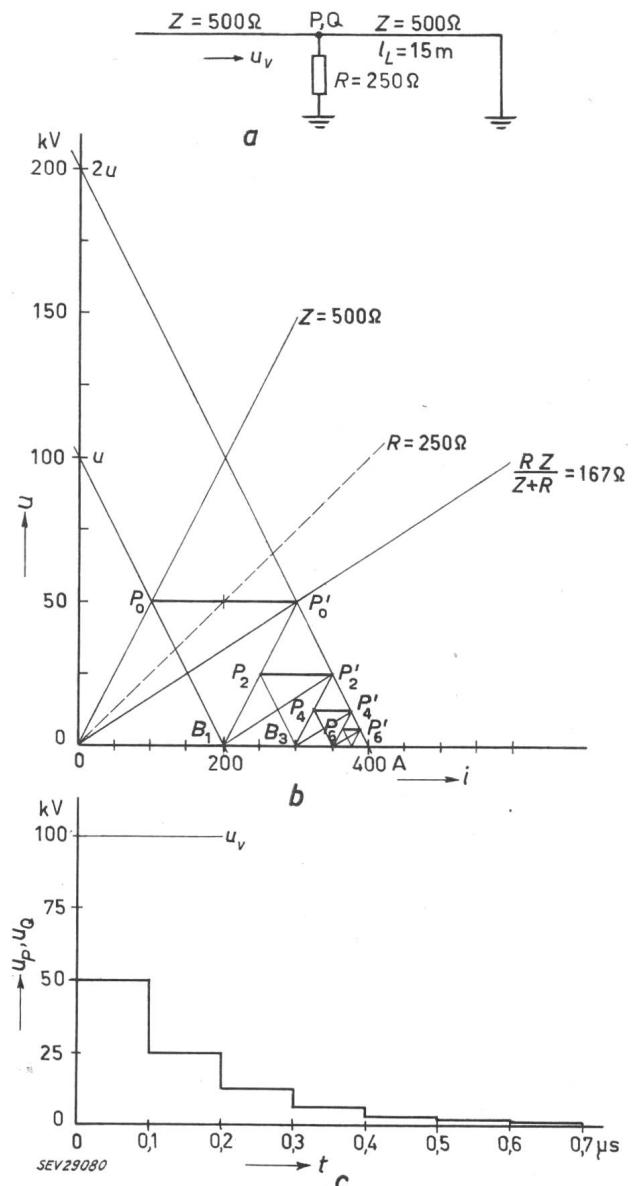


Fig. 9
Bergeron-Diagramm für die Spannung an der Messgruppe M
(Punkte P und Q)
für unendlich grosse Messgruppenkapazität C_M
(siehe Fig. 8)

a Schaltschema; b Bergeron-Diagramm; c Spannungen über der Zeit t ; l_L wirksame Erdleitungslänge

$$Z_1 = Z_2 = Z_K = Z_L = 500 \Omega; \quad R = \frac{Z}{2} = 250 \Omega$$

$Z_1 = Z_2 = 5 Z_K = Z_L$ und nur $0,1\dots0,2 \mu\text{s}$ Dauer in das Kabel K ein.

Fig. 10 zeigt den ebenfalls nach *Bergeron* konstruierten Spannungsverlauf in den Punkten P und Q , d. h. an den Hochspannungs- und Erdklemmen der Messgruppe, sofern $C_M = 500 \text{ pF}$ und $Z_1 = Z_2 = Z_K = Z_L = 500 \Omega$ angenommen wird.

Die Spannung in Punkt P steigt rasch auf den Wellenwert an; die Spannung in Q klingt nach der doppelten Laufzeit auf der Erdleitung, d. h. nach $0,1 \mu\text{s}$ wieder rasch ab und erreicht infolge des Wellenspiels auf L auch negative Werte. Mit Berücksichtigung der begrenzten Kabellänge K von z. B. 105 m erfolgt nach $0,35 \mu\text{s}$ ein Spannungssprung von 100 kV infolge der Ankunft und Reflexion der Welle am Kabelende C . Der Stoss dauert auch hier nur ca. $0,1 \mu\text{s}$ und geht über in negative Werte, d. h. in eine Schwingung.

Die Fig. 10a und 10b unterscheiden sich durch die Wahl des Grundzeit-Elementes Δt , das für die Linearisierung der Kondensatoraufladung nach Bergeron benötigt wird. Beide Figuren sind Näherungen für verlustlose Leitungen.

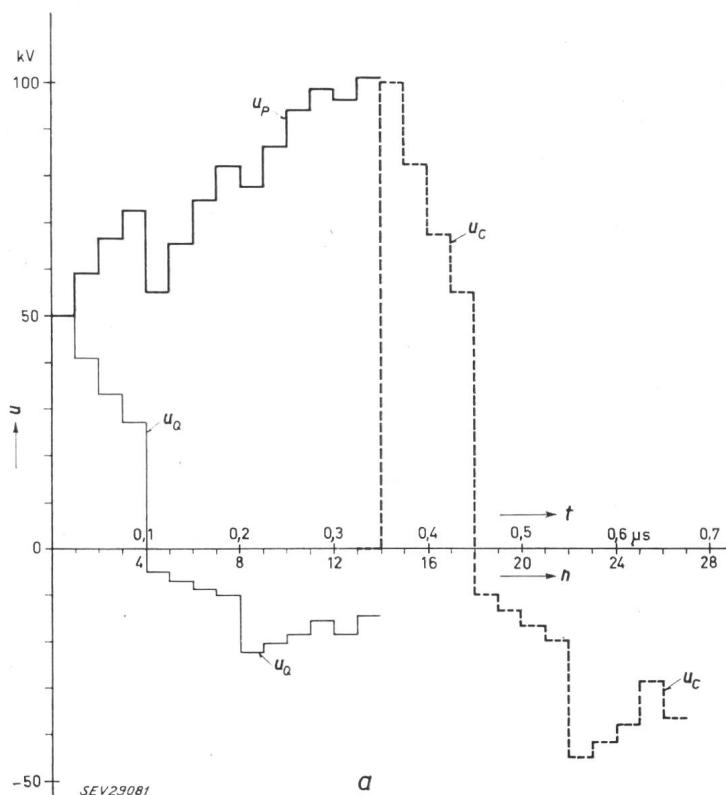


Fig. 10a

Spannungsverlauf an der Messgruppe C_M (Punkte P und Q) sowie am Kabelende C , konstruiert nach Bergeron für den Fall
 a Zeitelement $\Delta t = 25$ ns = $0,025$ μ s; b Zeitelement $\Delta t = 50$ ns = $0,05$ μ s; t Zeit; u Spannung; n Anzahl Zeitelemente Δt
 $C_M = 500$ pF; $l_L = 15$ m, $l_K = 105$ m; $Z_1 = Z_2 = Z_K = Z_L = 500$ Ω

Nun tritt beim Durchlaufen des Kabels sicher eine beträchtliche Dämpfung der Wellenhöhe auf. Eine weitere wesentliche Reduktion der Spannung ist auch deshalb zu erwarten, weil unser Wellenschema stark idealisiert ist, indem die wirklichen

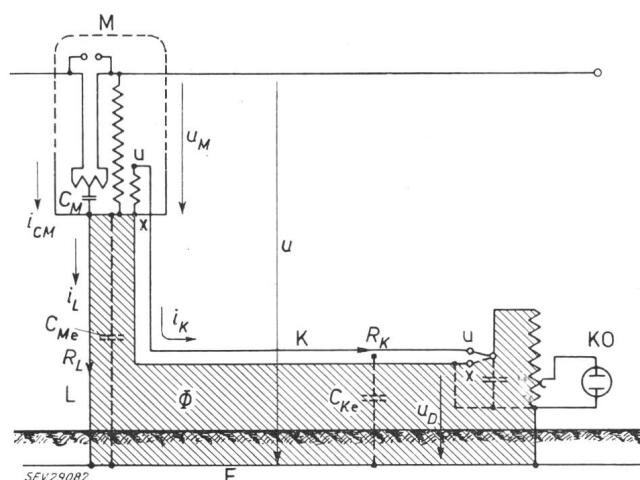


Fig. 11
 Quasistationäres Schema des Messkreises $M-K-KO-E-L$ im Hochspannungskreis der Fig. 2 und 3

C_{Ke} Erdkapazität des Kabelmantels; C_M Kapazität der Messgruppe; C_{Me} Erdkapazität des Gehäuses der Messgruppe; E vermaschtes Erdungsnetz; K Messkabel; L Erdleitung der Messgruppe; M Messgruppe für Strom I und Spannung U
 Weitere Bezeichnungen siehe im Text

Leitungen (sowohl die Erdleitung wie das Kabel) keine homogenen Leitungen sind und weil besonders die Messgruppe M und ihr Eisengerüst eine merkliche Erdkapazität C_{Me} besitzt (Fig. 11). Beträgt diese z. B. gleich viel wie C_M , so entsteht im Punkt

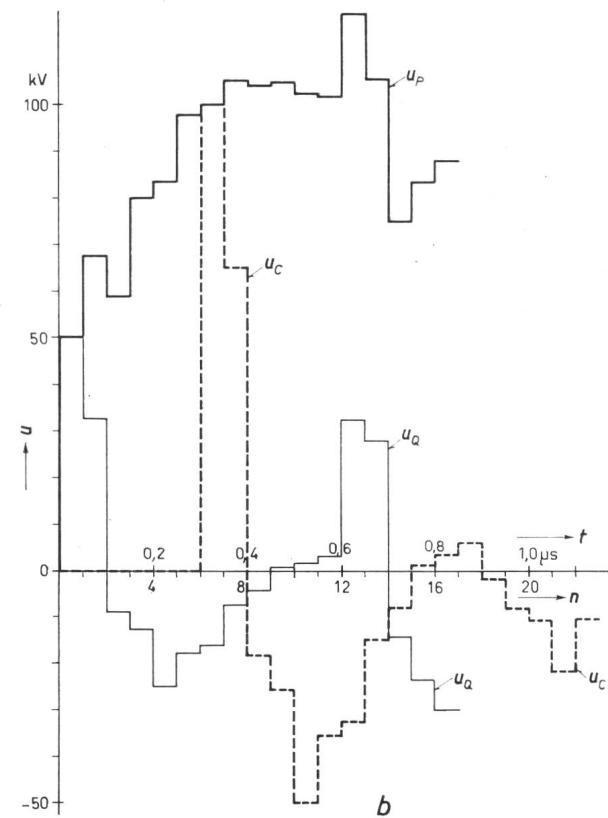


Fig. 10b

Q (Fig. 8) eine kapazitive Spannungsteilung, welche die erste Spannungsspitze dort auf die Hälfte reduziert, d. h. von 25...50 kV auf 12,5...25 kV. Ferner ist bei der Abschätzung der grössten Spannung in Q zu berücksichtigen, dass infolge der von C_M begrenzten Impulsdauer von ca. $0,1$ μ s die Frontdauer der Welle nicht als klein gegen diese Dauer angesehen werden kann. Sie ist im Gegenteil von ungefähr gleicher Zeitdauer. Dies heisst, dass die erste Spannungsspitze etwa die Hälfte der gerechneten Spitzenwerte erreichen kann, das ist ca. 6...12 kV. Die gemessenen Spannungen von ca. 3...4 kV sind somit unter Berücksichtigung der für diese ausserordentlich kurzen Impulse sehr grossen Kabeldämpfung verständlich.

Die Betrachtung zeigt, dass die zeitliche Begrenzung der Spannungsspitze infolge der Aufladung der Messgruppen-Kapazität C_M einen wesentlichen Faktor zur Begrenzung der Spannungshöhe im Punkt Q bildet. Mit einer grösseren Kapazität C_M , wie sie z. B. bei kapazitiven Wandlern und Koppelungs-Kondensatoren vorhanden ist, ist mit noch höheren Spannungen am Kabelende zu rechnen.

Die quasistationäre Betrachtung des Schaltvorganges gründet sich auf die Anwendung des Induktionsgesetzes auf den Stromkreis der Fig. 11. Für die offene Schleife zwischen Erdleitung L und Kabel K ergibt sich:

$$\Sigma i_L R_L - u_D - \Sigma i_K R_K = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Darin bedeuten:

R_L Widerstand der Erdleitung L

R_K Widerstand des Kabels K

u_D Spannung zwischen dem offenen Kabelende und dem Eisengerüst des Dienstgebäudes D

i_L Strom in der Erdleitung L

i_K Strom im Kabel K

Φ magnetischer Fluss in der Schleife zwischen L , E und K

Wenn in erster Näherung von den Ohmschen Spannungsabfällen abgesehen wird ($R_L = R_K = 0$), was praktisch zulässig sein dürfte, so ergibt sich als wesentliche Grösse der Fluss Φ . Dieser wird von den Strömen i_L und i_K erzeugt; deren Summe ist der Verschiebungsstrom i_M in der Messgruppen-Kapazität. i_K ist infolge des offenen Kabels lediglich ein Ladestrom der Erdkapazität des Kabels K .

Für den Verschiebungsstrom in der Wandlerkapazität C_M gilt das Ohmsche Gesetz der Kapazität:

$$i_M = C_M \frac{du_M}{dt} \quad (2)$$

Der Strom i_L verursacht auf der Erdleitung einen induktiven Spannungsabfall, der sich errechnet aus dem Ohmschen Gesetz für die Induktivität L zu:

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (3)$$

Der Strom i_L fliest zunächst durch die vertikale Erdleitung L und gelangt dann zum Erdungsnetz E der Anlage, wo er sich mehrfach verzweigt. Somit ist für u_L genauer die Summe der Spannungsabfälle von der Messgruppe bis zum Dienstgebäude zu bilden:

$$u_L = \sum u_{L\gamma} = \sum \frac{di_{L\gamma}}{dt} L_\gamma = L_{res} \frac{di_L}{dt}$$

In diesem Fall stellt L_{res} eine Ersatzinduktivität dar, welche mit i_L den gleichen Fluss Φ liefert wie die Summe der Teilströme $i_{L\gamma}$ im Erdungsnetz zwischen Messgruppe und Dienstgebäude.

Es soll nun in erster Näherung der Ladestrom i_K des offenen Kabels vernachlässigt werden, d. h.:

$$i_K = 0 \quad (4)$$

Dann wird der Fluss Φ ausschliesslich von i_L erzeugt, und es lässt sich setzen:

$$\Phi = L_{res} i_L \quad (i_K = 0)$$

Damit reduziert sich Gl. (1) auf die einfache Form:

$$u_D = \frac{d\Phi}{dt} = L_{res} \frac{di_L}{dt} \quad (5)$$

Durch Einsetzen von i_L aus Gl. (2) folgt schliesslich:

$$u_D = L_{res} C_M \frac{d^2 u_M}{dt^2} \quad (6)$$

Ausser den Anlagekonstanten L_{res} und C_M ist somit die Spannung u_D bestimmt durch die Ableitung der Spannungsänderung an der Messgruppe. Dieser Wert muss genauer betrachtet werden. Beim Fun-

kenüberschlag am Trenner Te fällt dort die Spannung innert sehr kurzer Zeit auf den kleinen Wert der Lichtbogenspannung zusammen. Dadurch wird ein Ausgleichsvorgang zwischen den beidseitigen Kapazitäten C_1 und C_2 (Fig. 2 und 3) eingeleitet. Der anfängliche Wellenvorgang, der bereits betrachtet wurde, geht über in eine quasistationäre Schwingung zwischen diesen Kapazitäten, indem vor der Zuleitung die eine (zum Beispiel die Sammelschiene) unter Spannung, die andere (Leitungsfeld) spannungslos war. Diese Schwingung hat eine Periodendauer T_\sim oder die Eigenzeit T :

$$T_\sim = 2 \pi \sqrt{L_{12} C_{12}}$$

$$T = \sqrt{L_{12} C_{12}}$$

L_{12} Induktivität des Kreises zwischen beiden Kapazitäten C_1 und C_2

C_{12} Resultierende Seriekapazität aus C_1 und C_2 , $C_{12} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$

1. Beispiel:

$$\begin{aligned} C_1 &\approx C_M + C_{Tf} \approx 800 \text{ pF} \\ C_2 &\approx C_{SS} \approx 1200 \text{ pF} \end{aligned} \quad \left. \right\} C_{12} = \frac{800 \cdot 1200}{2000} 10^{-12} = 480 \text{ pF}$$

$$L_{12} \approx 75 \mu\text{H}$$

Somit ist

$$T = \sqrt{\frac{800 \cdot 1200}{2000} 10^{-12} \cdot 75 \cdot 10^{-6}} \approx 10^{-8} \sqrt{360} \approx 0,19 \mu\text{s}$$

$$T_\sim = 2 \pi \cdot 0,19 \approx 1,2 \mu\text{s}$$

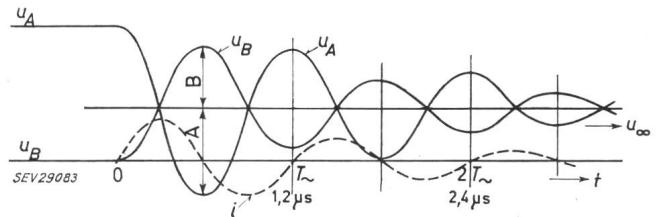


Fig. 12

Verlauf der Ausgleichsspannungen beidseitig des Trenners Te (Kurven u_A und u_B) im 2. Beispiel (Schema Fig. 2 und 3)

i Ausgleichsstrom in der Erdleitung L ; t Zeit; T_\sim Periodendauer der Ausgleichsschwingung; u_A Spannung an C_1 (Fig. 2 und 3) mit Amplitude A ; u_B Spannung an C_2 (Fig. 2 und 3) mit Amplitude B

Die Amplituden A an C_1 und B an C_2 verhalten sich wie die reziproken Kapazitäten $1/C_1$ und $1/C_2$. Fig. 12 zeigt den Verlauf dieser Schwingungen. Mit bekannten Werten der Kapazitäten und Induktivitäten lassen sich nach den Gleichungen (2), (3) und (5) die Ausgleichsströme i_L und die Spannung u_D abschätzen.

2. Beispiel:

$$\begin{aligned} C_M &= 500 \text{ pF} & C_1 &= C_M + C_{Tf} = 800 \text{ pF} \\ L_{res} &\approx 15 \mu\text{H} & C_2 &= 1200 \text{ pF} \end{aligned} \quad \left. \right\} C_{12} = 480 \text{ pF}$$

Der Anfangswert der Spannung u_M sei der Scheitelwert der Betriebspphasenspannung = 200 kV. Dann ist die mittlere Spannungsänderung:

$$\frac{\Delta u_M}{\Delta t} = \frac{\hat{u}}{\frac{1}{2} T_\sim} \approx \frac{200 \text{ kV}}{0,6 \mu\text{s}} = 33 \cdot 10^{10} \text{ V/s}$$

und der Stromscheitelwert:

$$i_{c max} = C_{12} \frac{du}{dt_{max}} = C_{12} \frac{\hat{u}}{T} = 480 \text{ pF} \frac{200 \text{ kV}}{0,19 \mu\text{s}} \approx 500 \text{ A}$$

$$i_{cM} = \frac{500}{800} i_{c max} \approx 300 \text{ A} = i_L$$

Somit ist die Spannungsamplitude:

$$u_{D \max} = \hat{u}_L = L_{\text{res}} \left(\frac{di_L}{dt} \right)_{\max} = 15 \cdot 10^{-6} \frac{300}{0,19 \mu\text{s}} \approx 24 \text{ kV}$$

Gemäss Voraussetzungen gilt dieser Wert unter Vernachlässigung des Ladestromes im Kabel K , ferner unter Vernachlässigung jeder Erdkapazität C_{Me} der Messgruppe. Deren Einfluss soll nun abgeschätzt werden.

Mit

$$C_{Me} \approx 500 \text{ pF} \quad (\text{Fig. 11})$$

und einer Kabel-Erdkapazität von

$$\frac{C_M}{C_M + C_{Me} + C_{Ke}} = \frac{500}{500 + 500 + 2000} = \frac{1}{6}$$

Dies entspricht einer Spannungsreduktion von $24/6 \approx 4 \text{ kV}$ Amplitude u_D , was mit der Messung gut zusammenstimmt.

Die Fig. 2 und 3 lassen auch folgende Deutung zu: Die Betätigung des Trenners Te löst einen Stossvorgang aus, durch den die Messgruppe aus der geladenen Sammelschienen-Kapazität unter Spannung gesetzt oder von Spannung entlastet wird. Dabei überträgt sich der Stoss an der Messgruppe im ersten Moment (d. h. bis zur Aufladung von C_M) auf die «Belastung» des Stosskreises, nämlich das Kabel K und die Erdleitung L , mit der unvermeidlichen Erdkapazität C_{Me} . Die ausführliche rechnerische Behandlung des Schemas der Fig. 2 und 3 bietet keine Schwierigkeiten.

Aus Gl. (6) lässt sich ein Schluss ziehen über die Abhängigkeit der grössten Überspannungen von der Betriebsspannung U_n . Es ist bekannt, dass durch geometrische Vergrösserung auf das n -fache sowohl die Induktivität L eines Leiters mit gleichbleibendem Querschnitt wie auch die Kapazität C eines Kondensators proportional wachsen. Nun ändert auch der dritte Faktor der Gl. (6) proportional der Spannung, weil die Zeit des Spannungszusammenbruchs im Funken praktisch nur wenig von der Spannungshöhe abhängt. Somit wird:

$$u_{D2} = \left(\frac{U_{n2}}{U_{n1}} \right)^3 u_{D1} \quad (8)$$

Das heisst, die grösste Überspannung wächst mit der dritten Potenz der Betriebsspannung U_n . Für eine 220-kV-Anlage entstehen $(1,5)^3 = 3,8$ mal grösere Überspannungen als in einer 150-kV-Anlage, in einer 380-kV-Anlage ca. 5mal grösere als in 220 kV. Es ist somit bewiesen, dass den festgestellten Überspannungen im allgemeinen nur Bedeutung in Anlagen mit mindestens ca. 200 kV Betriebsspannung zukommt, und dass z. B. in 400-kV-Anlagen gemäss dem Schema der Fig. 2 Überspannungen von 10...20 kV an Messinstrumenten zu erwarten sind.

Nachdem bisher das Kabel ohne Metallmantel betrachtet wurde, soll jetzt die Wirkung eines Metallmantels geklärt werden.

Wird nach Fig. 3 das Messkabel K in ein Metallrohr gelegt, das einerseits an der Messgruppe M , anderseits an den Eisengerüsten im Dienstgebäude, d. h. bei den Messinstrumenten geerdet ist, so fliesst im Moment der Überschläge am Trenner Te ein Ausgleichstrom nicht nur über die Erdleitung L , sondern auch über dieses Metallrohr bzw. den Kabelmantel.

Die Grösse des Mantelstroms folgt theoretisch wieder aus dem Induktionsgesetz, das, auf die nunmehr geschlossene Schleife der Erdleitung L und des Kabelmantels KM angewendet, folgendes ergibt:

$$i_L R_L - i_{KM} R_{KM} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Φ Fluss in der Schleife $L - KM$

Unter Vernachlässigung der Ohmschen Abfälle ($R_L = R_{KM} = 0$) ergibt sich sofort die Tatsache, dass der Fluss Φ zeitlich konstant bleibt. Damit ist die Stromverteilung über L und KM bestimmt. Gleiche Längen und Dimensionen von L und KM vorausgesetzt, wird je die Hälfte des Ausgleichstroms über die Erdleitung L , die andere Hälfte über den Kabelmantel KM fliessen. Je kürzer die Erdleitung gegenüber dem Kabel ist, um so mehr Strom geht auf die Erdleitung über.

Wie gross ist nun die Spannung der Kabeladern gegenüber dem Eisengerüst im Dienstgebäude, d.h. jetzt auch gegenüber dem dort geerdeten Kabelmantel?

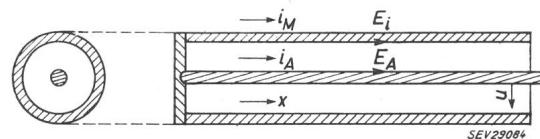


Fig. 13

Schnitt eines Kabels mit Metallmantel

E_A Feldstärke an der Außenhaut der Kabelader; E_i Feldstärke an der Innenhaut des Mantels; i_A Aderstrom; i_M Mantelstrom; u Spannung an der Kabelisolation; x Länge des Kabels, Kurzschluss bei $x = 0$

Die Anwendung des Induktionsgesetzes auf das Innere des Kabels liefert sofort die Antwort (Fig. 13). Am einen Ende des Kabels seien die Adern mit dem Mantel kurzgeschlossen, am anderen vom Mantel isoliert. Damit wird der Strom in der Kabelader $i_A = 0$, die Aderspannung am offenen Kabelende u .

$$\int_{x=0}^l E_i dx - u - \int_0^l E_A dx = \frac{d\Phi}{dt}$$

Φ Fluss zwischen Kabelader und Mantel

E_A Feldstärke an der Außenhaut der Kabelader

E_i Feldstärke an der Innenhaut des Mantels

l Länge des Kabels

Da der Strom der Kabelader gleich 0 ist und anderseits ein Wechselstrom im Mantel sich so verteilt, dass (bei widerstandslosem Mantel) im Innern kein Feld entsteht oder sich stets zwei Mantellinien finden lassen, die mit der Ader eine Fläche ohne Fluss Φ umschließen, so kann dort stets $\Phi = 0$ gesetzt werden¹⁾. Da anderseits für jeden praktischen Manteldurchmesser der Querschnitt als kurzgeschlossen gelten darf, so resultiert allgemein

$$u_i - u - 0 = 0$$

$$u = \int_0^l E_i dx$$

¹⁾ Benda, E. R.: Untersuchungen über Schienenströme und die Schutzwirkung von Kabelmanteln gegen Starkstromstörungen. Wiss. Veröff. Siemens-Konzern Bd. 9(1930), Nr. 1, S. 338...356.

Es heisst dies, dass die an der Kabelader auftretende Spannung u gleich gross ist wie der rein Ohmsche Spannungsabfall an der Innenhaut des Mantels. Bei gleichmässiger Stromverteilung im Mantel ist diese Spannung gleich dem üblichen Gleichstrom-Spannungsabfall ($i_M R_M$).

3. Beispiel:

Mantel aus $6 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$

$$\text{Kabellänge } 100 \text{ m, } R_M = \frac{100}{50 \cdot 6} = \frac{1}{3} \Omega$$

Der Mantelstrom sei gleich der Hälfte des im 2. Beispiel gerechneten Wertes von 300 A , d. h. 150 A .

$$\text{Somit ist der Spannungsabfall } i_M R_M = 150 \cdot \frac{1}{3} = 50 \text{ V}$$

Dieser gleichstrommässige Spannungswert ist nun anderseits der an der Innenhaut des Mantels grösstmögliche. Betrachtet man nämlich einen Hochfrequenzstrom anstelle des Gleichstromes oder 50-Hz-Wechselstromes, so dringt dieser Hochfrequenzstrom bekanntlich nicht gleichmässig in einen dicken Leiter ein (Hauteffekt, Skineffekt), sondern nur in einer sog. «Eindringtiefe»; in Kupfer ist die Stromdichte z. B. bei 1 MHz in $0,307 \text{ mm}$ Dicke bereits auf 1% ihres Oberflächenwertes abgesunken (nach Kupfmüller). In diesem Fall ist an der Innenhaut eines $0,5 \text{ mm}$ starken Cu-Mantels nur noch ungefähr 1% der mittleren Stromdichte und dementsprechend nur ein Bruchteil des gleichstrommässig gerechneten Spannungsabfalls vorhanden.

Das Beispiel zeigt ausserordentlich schön, was unter einem Faradaykäfig zu verstehen ist: Die Abschirmung äusserer elektrischer Felder (elektrische und magnetische, die ja dynamisch nicht getrennt werden können) durch eine geschlossene Mantelhaut genügender Leitfähigkeit bzw. Dicke. Äussere Ströme noch höherer Frequenzen, wie sie auf den Erdungsleitern entstehen, können im Kabelinnern überhaupt nicht mehr nachgewiesen werden.

Der zulässige Mantelwiderstand errechnet sich somit bei niederfrequenten Ausgleichsströmen auf dem Mantel aus der zulässigen Spannung u an der Kabelisolation, dividiert durch den Gleichstromwiderstand des Mantels. Bei dieser Bemessung des Mantels besteht bei höheren Frequenzen immer Gewähr für gute Abschirmung; diese ist um so besser, je höher die Frequenz ist.

Das 3. Beispiel zeigt als weitere Folgerung des Induktionsgesetzes, wie ein Punkt einer Hochspannungsanlage, z. B. Punkt Q der Fig. 8, der sich auf hoher «Spannung gegen Erde» befindet (10 oder 20 kV in den gerechneten Fällen), mit elektrischen Leitern erreicht werden kann, ohne dass diese hohe Spannung in Erscheinung tritt. Man braucht den Leiter nur nach Fig. 3 in ein Metallrohr zu verlegen, das am zugänglichen (gefährlosen) Ende mit der Erdung bzw. dem geerdeten Metallgehäuse oder Eisengerüst, am «gefährlichen» Ende (an der Messgruppe) mit dem «Hochspannungspunkt» verbunden ist. Dann fliesst auf diesem Mantel stets ein Strom derart, dass im Innern nur das elektrische Feld des Ohmschen Abfalls im Metallrohr in Erscheinung tritt, während mit einem ausserhalb verlegten Voltmeterdraht der gleiche Punkt Q eine Spannung von vielen kV aufweisen würde. Wie man daraus erkennt, hat es bekanntlich keinen Sinn, von der «Spannung» eines Punktes im Wechselfeld zu

reden, ohne den Weg anzugeben, auf dem diese Spannung gemessen wird. Anders ausgedrückt: Es existiert kein eindeutiges «Potential» im Wechselfeld. Dieser Begriff existiert nur bei Gleichstrom oder allenfalls bei sehr kleinen Frequenzen, bei denen die induzierten Spannungen $d\Phi/dt$ bedeutungslos sind.

Man könnte daran denken, die Adern des Kabels K dadurch dem Magnetfeld Φ zu entziehen, dass man nicht benutzte Kabeladern als Erdleiter benützt. Tab. I zeigt, dass dadurch tatsächlich eine teilweise Schutzwirkung, d. h. Abschirmung der übrigen Kabeladern entsteht. Die restliche Überspannung ist dadurch verursacht, dass sich um diese geerdeten «Schutzleiter» ein Magnetfeld bildet, das die benutzten Kabeladern doch noch teilweise induziert. Volle Abschirmung und Schutzwirkung kann nur durch einen geschlossenen Metallmantel erhalten werden und nur dadurch, dass dieser Mantel an beiden Enden an die dortigen Erdpunkte geschlossen wird, damit ein Ausgleichstrom fliessen kann. Mit nur einseitiger Erdung ist nur ein statischer Schirm vorhanden, der zur Abschirmung von magnetisch induzierten Spannungen nichts nützt.

Es mag noch erwähnt werden, dass es in der Nachrichtentechnik üblich ist, das Verhältnis der beiden oben beschriebenen Spannungen, nämlich jener, die aussen und innen am Kabelmantel auftreten, als «Schirmfaktor» S zu bezeichnen. Es geht aus obigen Darlegungen hervor, dass dieser Faktor nur dann genau definiert ist, wenn der äussere Weg der Spannungsmessung festliegt.

Der Faktor ist bei niederen Frequenzen

$$S = \frac{Z}{R_g} = \frac{R_g^2 + (\omega L)^2}{R_g}$$

R_g Gleichstrom-Widerstand
 Z Impedanz bei der Kreisfrequenz ω

Bei hohen Frequenzen ist er wegen des Hauteffektes beträchtlich grösser.

1.1 Zusammenfassung und Folgerungen

In Höchstspannungsanlagen mit $U_n = 220 \text{ kV}$ und mehr empfiehlt es sich, Sekundärkabel mit beidseitig geerdetem Metallmantel zu verwenden, insbesondere dann,

1. wenn die an die Sekundärkabel angeschlossenen Hochspannungsapparate längere unvermaschte Erdleitungen aufweisen, z. B. auf Gerüsten erhöht stehende Messwandler, Kopplungs-Kondensatoren, Antriebe usw.,
2. wenn die Hochspannungsapparate auf kleinen Einzelgerüsten mit wenig Erdkapazität stehen, z. B. auf hohen Betonsockeln oder auf hoch gelegenen kurzen Gleisstücken mit Betonstützen, die nur teilweise mit Erdleitungen versehen sind,
3. wenn die Sekundärkabel an Hochspannungsapparate mit grossen Kapazitäten angeschlossen sind, z. B. an Kopplungskondensatoren, kapazitive Spannungswandler, Wandler mit kapazitiver Steuerung usw.

Als Querschnitt des Kabelmantels genügt in den meisten Fällen ein Mindestwert von einigen $\text{mm}^2 \text{ Cu}$. Dabei ist bei der Verwendung von Metallbändern als Mantel darauf zu achten, dass ein geschlossener rohr-

förmiger Mantel entsteht, der den Stromfluss in axialer Längsrichtung ermöglicht.

2. Sekundärkabel in Hochgebirgsstollen

Von einem schweizerischen Kraftwerk wurde die Beobachtung gemacht, dass einzelne Adern eines mehrere km langen, in einem Wasserstollen im Hochgebirge vom Stausee bis zum Wasserschloss verlegten Sekundärkabels für Fernsteuerung, Fernmessung und Telephon bereits nach einer Gewitterperiode stark reduzierten Isolationswiderstand aufwiesen. Diese Erscheinung verstärkte sich in drohendem Mass nach einer weiten Gewitterperiode. Das Kabel war im Wasserstollen in einer ausgesparten, mit Betonplatten abgeschlossenen Betonrinne verlegt. Es war daher rings vom Wasser des Stollens umschlossen. Andere Kabel oder metallische Leiter befanden sich nicht im Stollen.

Das beschädigte Kabel musste nach wenigen Betriebsjahren ausgebaut und ersetzt werden. Dabei konnte der Schaden in der Kabelfabrik genauer untersucht werden. Der Befund wird in einem Aufsatz von *E. Foretay* beschrieben werden, so dass hier das Ergebnis nur kurz erwähnt sei:

Das betreffende Kabel besass keinen Metallmantel, dagegen eine doppelte Thermoplast-Isolation aus 2,9 mm Polythen und 2,4 mm PVC. Die Stoß-Durchschlagspannung dieses Mantels wurde zu ca. 500 kV gemessen. Der Schaden am Kabel bestand in einer grossen Zahl (über 100) feiner Löcher im Isoliermantel, z. T. mit mehrere cm langem Riss der äusseren PVC-Schicht. Überdies waren unter den Löchern im Mantel an einzelnen Cu-Adern des Kabels feine Brandperlen sichtbar, die auf Stromeintritt hinwiesen. Diese Kabelschäden erstreckten sich mehr oder weniger auf die ganze Kabellänge, wobei eine Häufung im unteren, gegen das Wasserschloss zu gerichteten Drittel zu bemerken war.

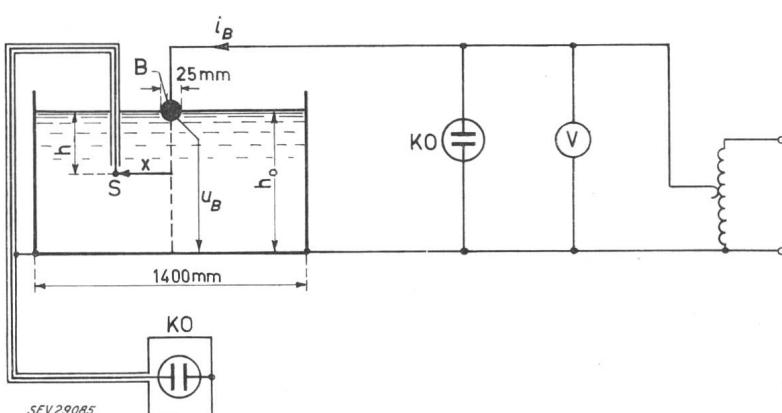
Als Stromquelle für die vielen Mantel-Durchschläge kommt in Folge der grossen Entfernung des Stollens von Hochspannungsleitungen nur der Blitz in Frage. Nun beträgt die Überdeckung des Stollens im Gebirge mindestens einige 100 m, im Maximum mehr als 1 km. Es fragt sich, ob dabei am isolierenden Kabelmantel Spannungen von mehr als ca. 500 kV entstehen können.

Zur Abklärung dieser Frage wurden in einem elektrolytischen Trog im Hochspannungslaboratorium der ETH Modellversuche ausgeführt, deren Anordnung und Schema Fig. 14 zeigt. Einer kugelförmigen Elektrode, die zur Hälfte in ein Wasserbad eingetaucht war, wurden «Blitzströme» i_B aufgedrückt. Dieser «Blitzstrom» fliesst durch das Wasser-

Fig. 14

Modellmessung im elektrolytischen Trog; Blitzschlag in die Felsüberdeckung eines Hochgebirgsstollens

Maßstab: 1 mm im Modell entspricht 1 m
 B Blitzstrom-Elektrode; h Überdeckung des Messpunktes; h_0 Tiefe des Elektrolytes im Trog; i_B Blitzstrom; KO Kathodenstrahlzosillograph; S Sonde zur Spannungsmessung bei xh ; u_B Spannung der Elektrode B; V Voltmeter



bad, welches das homogene Gebirge darstellt, zur möglichst weit entfernten Tankwandung als «Erde». Statt des rasch veränderlichen Blitzstromes wurde ein niederfrequenter Wechselstrom (50 Hz) verwendet, dessen Zulässigkeit durch Rechnung der Eindringtiefe nachgewiesen wurde. Da im Hochgebirge mit spezifischen Widerständen des Gesteins von $(1 \dots 3) \cdot 10^4 \Omega \text{m}$ oder $1 \dots 3 \text{ M}\Omega \text{cm}$ zu rechnen ist, beträgt diese Eindringtiefe bei 10 kHz einige 100 m. In diesem elektrischen Strömungsfeld wurde nun das Verhalten von Kabeln mit und ohne Metallmantel untersucht.

Um die Beanspruchung des Isoliermantels eines Kabels ohne Metallmantel zu messen, wurde die Spannung im Gebirge an den Stollen, wo das Kabel liegt, mit Hilfe einer Sonde bestimmt. Als Sonde wurde das blanke Ende eines sonst isolierten Drahtes benutzt. Diesem Draht wurde z. B. eine solche Gegenspannung aufgedrückt, bis der Strom i zur Sonde verschwand (Kompensation). In diesem Fall ist die Gegenspannung gleich der am Ort des freien Drahtendes herrschenden Spannung im Feld des «Blitzstromes».

Der Durchmesser der Sonde und ihrer isolierten Zuführung spielt keine wesentliche Rolle, weil dadurch nur ein sehr kleines Stück aus dem Strömungsfeld ausgeschnitten wird. Er wurde so gewählt, dass er ungefähr dem Stollendurchmesser entspricht, wobei der geometrische Modellmaßstab 1 : 1000 oder 1 : 2000 betrug.

Durch Verschieben der Sonde längs des supposed mantellosen Kabels ergibt sich derart das an allen Punkten vorhandene «Potential» des Strömungsfeldes, denn um ein solches handelt es sich hier infolge der niederen Frequenz (50 Hz) und des hochohmigen Strömungsfeldes. Fig. 15 zeigt das Resultat der Potentialmessungen.

Als Ordinate ist das prozentuale Verhältnis des Strömungspotentials am Kabelmantel zum Potential des «Blitztrichters» an der Kugelelektrode dargestellt, und zwar für 100 m und 500 m Überdeckung h . Der Einfluss der Tankwände wird durch Messungen bei verschiedenen Tiefen h_0 erfasst. Bei 100 m Überdeckung wird die Asymptote für $h_0 = \infty$ erreicht, bei 500 m Überdeckung nur angenähert.

Man erkennt, dass auch bei Überdeckungen h von einigen 100 m in der Natur (einige 50 mm im Modell) noch Spannungen der Grössenordnung einiger MV vorhanden sind. Wenn somit im Kabel Leiter mit Spannung Null vorhanden sind, so wird

jeder praktisch realisierbare Isoliermantel im Hochgebirge beim Einschlag von stromstarken Blitzen in die Überdeckung durchgeschlagen.

In zweiter Linie wurde die Wirkung eines Metallmantels auf dem Stollenkabel untersucht. Dazu musste der aus dem Strömungsfeld von i_B auf den Mantel fließende Anteil des Blitzstromes bestimmt werden. Bei einem geometrischen Abbildungsmaßstab von 1 : 2000 entspricht einem metallischen Kabelmantel von 5 cm Durchmesser ein Draht von 0,025 mm Durchmesser. Um den auf einer bestimmten Strecke Δx auftretenden Strom Δi zu messen, muss der übrige Draht isoliert und mit einem direkt geerdeten Mantel versehen werden, um das Strömungsfeld im Stollen richtig abzubilden. Der Messdraht Δx wird niederohmig an den Tank verbunden und der Strom $\Delta i(x)$ gemessen. Nun lässt sich der berechnete Messdrahtdurchmesser infolge seiner Kleinheit kaum realisieren. Man begeht jedoch kei-

Es liegt somit nur ca. 1% der Spannung am Wasser im Stollen und rund 99% im Gebirge, sofern die Überdeckung durchgeschlagen.

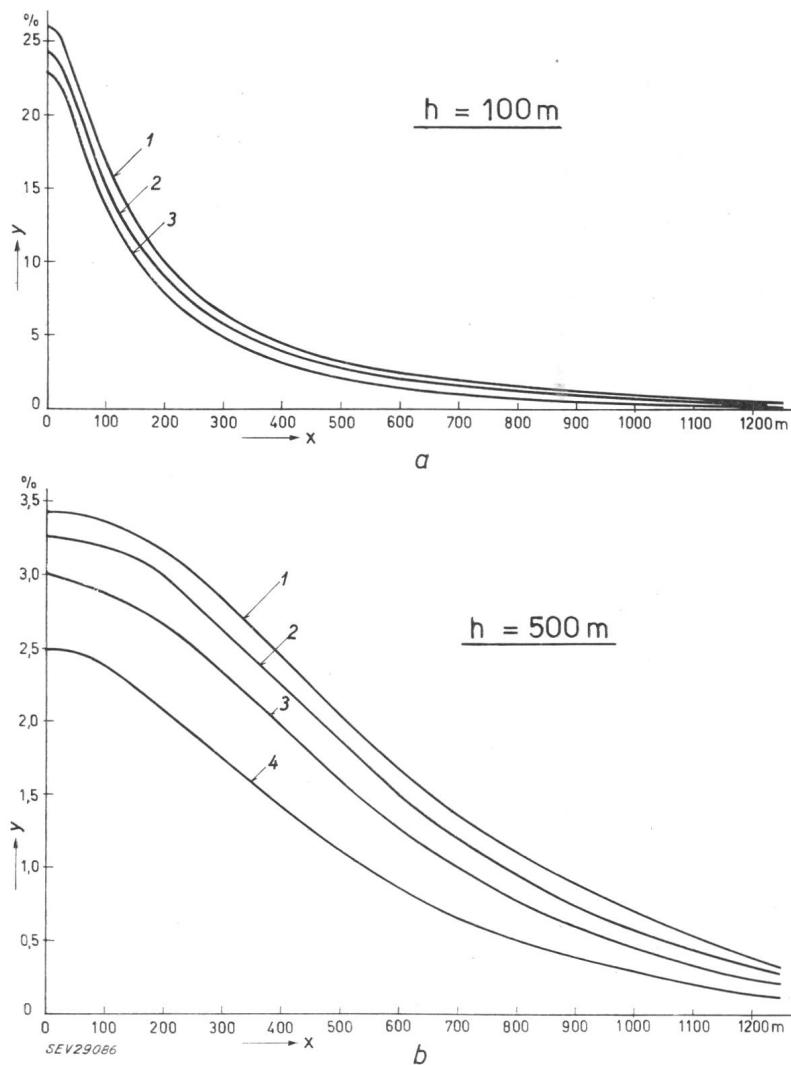


Fig. 15
Potentialverlauf in der Stollenaxe unter dem Blitz einschlag B

a Maßstab des Modells 1 : 1000
b Maßstab des Modells 1 : 2000

a $\left\{ \begin{array}{l} 1 h_0 = 850 \dots 1200 \text{ m} \\ 2 h_0 = 750 \text{ m} \\ 3 h_0 = 500 \text{ m} \end{array} \right.$ b $\left\{ \begin{array}{l} 1 h_0 = 1200 \text{ m} \\ 2 h_0 = 1000 \text{ m} \\ 3 h_0 = 850 \text{ m} \\ 4 h_0 = 700 \text{ m} \end{array} \right.$

h Überdeckung des Stollens; h_0 Tiefe der Fläche mit Spannung 0; x Abszisse, Nullpunkt unter B;
 $y = \frac{\Delta u}{u_B}$ Spannung Δu bei xh in Prozenten der Spannung beim Blitz einschlag u_B

nen grossen Fehler, wenn man anstelle des Durchmessers des metallischen Kabelmantels den Stollen durchmesser als geerdete Fläche abbildet, wie sich aus folgendem ergibt.

Der spezifische Gesteinswiderstand ϱ beträgt für kompakten Kalkstein, Gneis und Granit $(1 \dots 3) \cdot 10^4 \Omega \text{m}$, wie aus ausführlichen Untersuchungen im Wallis und Tessin hervorgeht. Der spezifische Wasserwiderstand dagegen ist im Gebirge rund hundertmal kleiner, nämlich ca. 200 Ωm .

Der Widerstand eines Zylinders der Länge 1, des spezifischen Widerstandes ϱ und der Radien r_a und r_i beträgt:

$$R = \frac{\varrho}{2\pi} \ln \frac{r_a}{r_i}$$

Das Verhältnis der Spannungen an einem äussern Zylinder im Gebirge um den Stollen, z. B. mit den Radien $r_a = 100 \text{ m}$ und Stollenradius $r_i = 1,5 \text{ m}$ zu einem innern Zylinder zwischen Stollenwandung und Kabelmantel, also mit $r_a = 1,5 \text{ m}$ und Kabelradius $r_i = 0,03 \text{ m}$ beträgt:

$$\frac{\varrho_a \ln \frac{100}{1,5}}{\varrho_i \ln \frac{1,5}{0,03}} = \frac{100 \cdot 2,3 \cdot 1,824}{2,3 \cdot 1,7} \approx 107$$

Überdeckung 100 m beträgt. Bei grösseren Überdeckungen wird das Verhältnis noch grösser.

Man begeht also keinen grossen Fehler, wenn im Modell anstelle des metallischen Kabelmantels der Stollendurchmesser abgebildet wird. Wenn man dies im Modell 1 : 2000 tut, so ergeben sich die Kurven der Fig. 16. Dabei ist als Ordinate der Summenstrom auf dem Kabelmantel dargestellt als Bruchteil des aufgedrückten Blitzstromes i_B für verschiedene Überdeckungen (Kurven 2).

Es ist zunächst erstaunlich, wie gross der Anteil des Blitzstromes ist, der zum Kabelmantel gelangt. Bedenkt man jedoch die gute Leitfähigkeit des Stollens bzw. des Mantels des Stollenkabels gegenüber derjenigen des Gebirges, so ist klar, dass der Stollen mit Kabelmantel wie eine feine metallische Nadel wirkt, die man in das praktisch isolierende Gebirge hineinsteckt. Der zum Stollen gelangende Blitzstromanteil fließt nun zum überwiegenden Teil über den metallischen Kabelmantel, nur zum verschwindenden Teil durch das Wasser des Stollens, wie folgende Rechnung zeigt:

Längswiderstand eines 1 km langen Wasserzylinders mit 3 m Durchmesser, mit $\varrho = 200 \Omega \text{m}$:

$$R_{St} = \frac{1000 \cdot 200}{1,5^2 \cdot \pi} = \frac{2 \cdot 10^5}{7,1} \approx 28 \text{ k}\Omega$$

Längswiderstand eines Kabelmantels von 20 mm^2 Cu und 1 km Länge:

$$R_K = \frac{1000}{57 \cdot 20} \approx 1 \Omega$$

Frägt man sich nun schliesslich, welches die elektrische Beanspruchung der Kabelisolation durch diesen abfließenden Blitzstromanteil ist, so ist nach den Ausführungen im ersten Kapitel ein Ohmscher Spannungsabfall im Kabelmantel

$$\Delta u = \int_0^x i_K R_K dx$$

zu erwarten.

4. Beispiel:

Blitzstrom $i_B = 50 \text{ kA}$, Kabelmantel 20 mm^2 Cu, mittlere Überdeckung des Stollens $h \approx 200 \text{ m}$, somit nach Fig. 16 interpoliert $i_K \approx 0,20 i_B \approx 10 \text{ kA}$, einseitig.

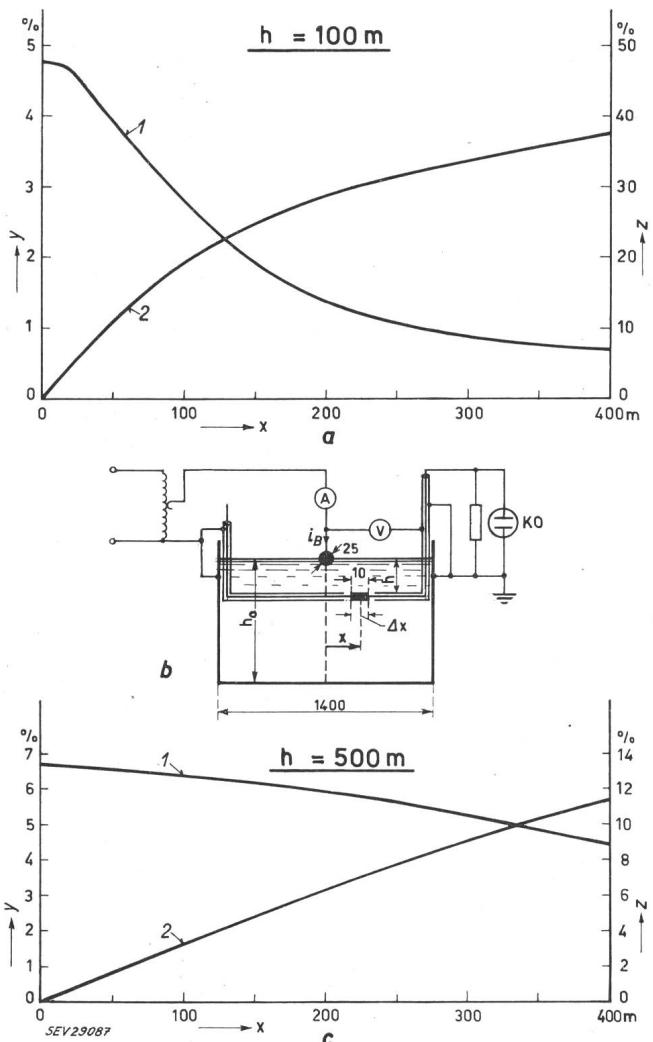


Fig. 16

Strom im Stollen (Kabelmantel) unter dem Blitzeinschlag B
Maßstab: 1 mm im Modell entspricht 2 m

a Überdeckung $h = 100 \text{ m}$; b Schema des Modells; c Überdeckung $h = 500 \text{ m}$

h Überdeckung des Stollens; h_0 Tiefe der Fläche mit Spannung 0; i_B Blitzstrom; x Abszisse, Nullpunkt unter B

1 $y = \frac{\Delta i}{i_B}$ Strom Δi im Messelement $\Delta x = 20 \text{ m}$ in % von i_B

2 $z = \frac{\Sigma \Delta i}{i_B}$ Summenstrom von $x = 0$ bis x , in % von i_B

Masse in mm

Fließt dieser Strom im wesentlichen in einer Richtung (nämlich gegen das Wasserschloss und die Rohrleitung zu den Erdungen des Kraftwerks), so entsteht maximal der doppelte Strom auf dem Kabel und damit ein Spannungsabfall pro km

$$\Delta u = 2 i_K R_K = 20000 l = 20 \text{ kV/km}$$

Wird berücksichtigt, dass der volle Strom nur auf einem Teil der Kabellänge auftritt, so dürfte bei den üblichen Stollenlängen weniger km mit Spannungsabfällen auf dem Mantel von ca. 20...50 kV (Stoss) zu rechnen sein. Solange alle Adern vom Mantel isoliert sind, erscheint infolge der kapazitiven Kopplung zwischen Mantel und Adern in quasistationärer Betrachtung ungefähr je die Hälfte dieser Spannung am Anfang und Ende des Stromabflusses als Beanspruchung der Kabelisolation. Sobald ein Durchschlag z. B. am Anfang des Kabels erfolgt, erscheint jedoch die volle Spannung am Ende.

Wenn z. B. am Kabelendverschluss ein Übertrag auftritt, so ist in der Gegend des Blitzstromeintrittes mit dem vollen Spannungsabfall als Beanspruchung der Isolation zu rechnen. Eine Gefährdung der Isolation besteht somit sowohl in der Gegend des Eintritts des Blitzstromes, wie auch mit umgekehrter Polarität am Stromaustritt, d. h. am Ende der Spannungsabfallstrecke. Mit Beanspruchungen der Kabelisolation von ca. 20...50 kV Stoss ist somit selbst im Fall eines Cu-Mantels mit ca 10 mm² Querschnitt zu rechnen. Dies sind Spannungen, die von dünnen Polythen- und PVC-Isolationen stossweise ohne weiteres gehalten werden.

2.1 Zusammenfassung und Folgerungen

In Stollen im Hochgebirge verlegte Kabel sollten stets einen Metallmantel aufweisen, dessen equivalenter Cu-Querschnitt im allgemeinen mindestens ca. 10 mm² beträgt, bei kleinen Überdeckungen sogar mehr als 10 mm². Damit lassen sich Durchschläge der Kabelmantelisolation und auch der Aderisolation, wenn diese aus modernen Thermoplasten besteht, vermeiden.

Auch am Ende des Kabels ist maximal mit den berechneten Spannungen zu rechnen; es empfiehlt sich, dort Überspannungsableiter für Schwachstrom zu verwenden, um einen Ausgleich zwischen Kabeladern und geerdeten Mänteln herzuführen. Im Wasserschloss empfiehlt sich ferner eine stark vermaschte oder flächenmässige Verbindung der Kabelendverschlüsse untereinander und mit den Druckrohr-Leitungen, welche den Störstrom aus dem Blitz weiterleiten. Damit sollen dort starke induktive Abfälle vermieden werden, die sich wieder als Beanspruchung der Isolation auswirken. Mit anderen Worten: Der Faradaykäfig des Kabelmantels des Gebirgskabels ist möglichst geschlossen fortzusetzen an die weiterführenden Kabel. Die gleichzeitige Verbindung an die Druckrohrleitung bedeutet als «Erdung» lediglich eine Entlastung der weiteren Kabelmäntel vom Blitzstrom.

3. Blitzschutz von Luftkabeln und blitzexponierten Sende- und Messtürmen

Das beim Hochgebirgs-Stollenkabel betrachtete Problem des Blitzstromes auf dem Kabelmantel besteht in erhöhtem Mass bei frei in der Atmosphäre

aufgehängten sog. Luftkabeln, wie sie z. B. als Steuer- und Telephonkabel zwischen Kraftwerk und Wasserschloss verwendet werden. Hier ist der Kabelmantel direkt dem Blitz ausgesetzt, und es muss beim Einschlag mit dem vollen Blitzstrom gerechnet werden. Anderseits kommt hier als günstiger Faktor in Betracht, dass das Kabel von geerdeten Masten getragen wird, welche den Kabelmantel teilweise vom Blitzstrom entlasten. Dieser günstige Effekt dürfte allerdings im Hochgebirge nicht hoch einschätzen sein, weil die Masterdungen in der Regel von der Größenordnung einiger 100Ω sind und somit wenig Strom ableiten.

Auch in diesem Fall scheint das thermoplastisierte Kabel dem Papierkabel infolge seiner viel grösseren Stossfestigkeit der Isolation weit überlegen zu sein. Der erforderliche Mantelquerschnitt dürfte hier in der Regel bei ca. $50 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ liegen. Wesentlich ist aus den besprochenen Gründen ein geschlossener Mantel, dessen Querschnitt allerdings reduziert werden kann, wenn parallel dazu weitere gute Leiter vorhanden sind. Ein nicht geschlossener Metallmantel um das zu schützende Kabel ist dagegen stets eine unwirtschaftliche und unsichere Lösung des Blitzschutz-Problems.

Ein interessantes Beispiel blitzstromführender Kabelmäntel bilden sodann die Sendeturme mit ihren Antennen und übrigen elektrischen Installationen. Fig. 17 zeigt die Anordnung auf dem Monte San Salvatore, wo sich auf dem seit 1958 in Betrieb befindlichen Kurzwellen- und Fernsehturm der PTT auch die Shunte für die oszillographische Blitzstrommessung befinden.

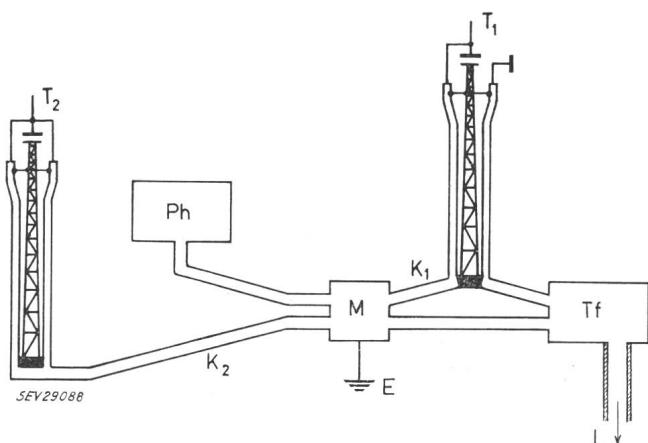


Fig. 17

Faradaykäfig der Blitzmessung und Sender auf dem Monte San Salvatore

E Erdung aus ca. 300 m Stahldraht; K_1 Messkabel zum Turm T_1 , 400 $\text{mm}^2 \text{ Cu}$; K_2 Messkabel zum Turm T_2 , 550 $\text{mm}^2 \text{ Cu}$; L Zoreskanal nach Paradiso, ca. 1,5 km; M Oszillographen-Messraum; Ph Photoraum im Gipfelgebäude; T_1 Turm der PTT auf dem Gipfel; T_2 Turm der FKH auf dem San Carlo; Tf Transformatorenstation

Die gesamte Einrichtung auf dem Berg, mit Ausnahme der Blitzauflaufspitze beider Türme und der UKW- und Fernsehantennen, ist in einen geschlossenen Faradaykäfig eingeschlossen, der sich aus den Kabelmänteln, Metallnetzen um die Messräume für den Blitz und Metallschränken für die Hochfrequenzeinrichtungen zusammensetzt.

Der Blitzstrom fliesst zum kleinen Teil in die «Erdung» E auf dem Berg, zum grossen Teil über

den Zores-Kanal in der Richtung Lugano, wo er sich allmählich in den Erdboden (Kalkgestein mit Humus) verliert. Innert dieses zusammengesetzten Käfigs treten grundsätzlich nur Ohmsche Spannungsabfälle auf.

Die Erfahrungen mit diesem Käfig in den 2 Gewitterperioden 1958 und 1959 sind ausgezeichnet. Sie beweisen, dass sich mit Faradaykäfigen ein sehr guter Blitzschutz einwandfrei und mit mässigen Kosten realisieren lässt. Dabei spielt die sog. «Erdung» E eine durchaus nebенächliche Rolle; sie könnte mit entsprechendem Leitwert des Käfigs auch weggelassen werden.

Die geschilderte Erweiterung eines Kabelmantels in einen räumlich beliebig geformten metallumschlossenen Faradaykäfig weckt zunächst einige Bedenken. Es fragt sich, ob es auch hier zulässig ist, im Innern des Käfigs nur mit Ohmschen Spannungsabfällen zu rechnen, wie das beim langen Kabel der Fall ist.

Die hochfrequente Betrachtung lehrt, dass äussere, elektromagnetische Wechselfelder in beliebig geformten Metallocberflächen nur in eine gewisse Tiefe, die sog. Eindringtiefe, eindringen. Das elektrische Feld stellt sich bis auf kleine Ohmsche Komponenten senkrecht zur Leiteroberfläche; das magnetische Feld liegt, ungefähr parallel zur leitenden Oberfläche und induziert in dieser Wirbelströme, die eben den genannten Effekt des begrenzten Eindringens bewirken. Je höher die Frequenz, um so stärker werden die Wirbelströme in der Metallocberfläche und um so weniger tief kann das Oberflächenfeld eindringen. Man erkennt, dass auch in diesem allgemeinen Fall der bei niederfrequenten Strömen an der Innenhaut des Käfigs auftretende Ohmsche Spannungsabfall den schlimmsten Fall darstellt. Es gibt auch hier Mantellinien, die mit einem inneren Leiter keinen Fluss umschließen. Für diese Linien gilt somit der Satz, dass immer nur der Ohmsche Abfall als Spannung erscheint. Bei sehr hohen Frequenzen, wo die Eindringtiefe viel kleiner ist als die Dicke der Mantelhaut, ist anderseits innen überhaupt kein Feld mehr zu spüren; der Faradaykäfig wirkt dann als vollkommene Abschirmung. Es ist somit bei beliebig geformten Metallflächen möglich, äussere Felder fernzuhalten, wenn nur der Ohmsche Widerstand der Fläche genügend tief oder die Frequenz der äusseren Felder genügend hoch liegt.

Nun ist es klar, dass man z. B. eine Hochspannungsanlage nicht in einen metallischen Käfig setzen kann. Dies ist infolge der starken Hochspannungs-isolationen auch nicht nötig. Dagegen stellen die Niederspannungs- und Schwachstrominstallationen in diesen Anlagen einen überspannungsempfindlichen Teil dar, dessen Schutz, wie anfangs besprochen, nur durch Bildung einzelner Faradaykäfige möglich ist, welche die empfindlichen Teile möglichst vollständig umschließen.

4. Kabelmäntel und allgemeine Faradaykäfige als Überspannungsschutz gegen industriefrequeute Fremdströme und deren Erdungsspannungen

Die allgemeine Einführung der direkten Nullpunktterdung in den Höchstspannungsnetzen hat

zur Folge, dass jeder Erdschluss eines Phasenleiters einen stromstarken Kurzschluss über Erde bedeutet. Dadurch ist die Gefährdung von benachbarten Schwachstromleitungen durch magnetisch induzierte Überspannungen und durch Rückströme im Erdboden beträchtlich häufiger geworden. Doch ist dieses Problem durchaus nicht neu; es wurde seinerzeit bei der Elektrifizierung der Bahnen akut. Bereits damals wurden Lösungen studiert und gefunden, die im Prinzip vor allem auf die Herstellung eines möglichst grossen Mantelschutzfaktors hinausliefen²⁾³⁾. Es erübrigts sich, hier darauf einzugehen. Dagegen soll ein praktisch wichtiger Fall erwähnt werden, bei dem der Überspannungsschutz von Fernmeldeleitungen mittels Kabeln mit Metallmanteln gegenüber industriefrequenten Störströmen eine Rolle spielt. Es ist dies der Fall der Einführung eines Telephonkabels in eine Hochspannungsanlage mit grossem Erdkurzschlussstrom, z. B. eine 220-kV-Anlage (Fig. 18).

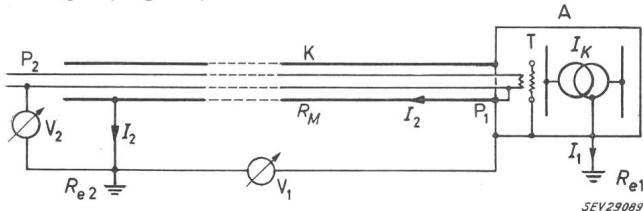


Fig. 18

Einführung eines Telephonkabels K in eine Hochspannungsanlage A mit hoher Erdungsspannung

I_1 Strom in der Anlageerdung R_{e1} ; I_2 Strom im Mantel des Telephonkabels; I_K Erdkurzschlussstrom der Hochspannungsanlage; P_1, P_2 Punkte der geerdeten Ader; R_{e1} Erdungswiderstand der Hochspannungsanlage; R_{e2} entfernte Erdung des Kabelmantels; R_M Ohmscher Mantelwiderstand; T Schutztransformator des Telephones; V_1, V_2 Voltmeter

Die Hochspannungsanlage A weise einen Erdkurzschlussstrom I_K von 10 kA und einen Erdungswiderstand R_{e1} von $0,3 \Omega$ auf. Bei einem nahen Erdschluss fliesst ein Fehlerstrom von annähernd diesem Wert zur Fehlerstelle. Davon nimmt ein Teilstrom I_{ES} seinen Weg über allfällige Erdseile; der Rest I_e fliesst über den Erdungswiderstand. Das Verhältnis der beiden Teilströme I_{ES} und I_e hängt sehr stark vom Abstand des Erdkurzschlusses von der Anlage ab. Mit einem Strom I_e über R_{e1} von z. B. 5 kA kommt die Anlageerdung auf

$$R_{e1} I_e = 5000 \cdot 0,3 = 1500 \text{ V}$$

Würde nun eine Telephonleitung als Freileitung in das Gebäude geführt, so müsste der vorgeschriebene Schutzübertrager T dieser Spannung standhalten.

Wird die Telephonleitung dagegen nach Fig. 18 über ein Kabel K eingeführt, dessen Metallmantel mit der Anlageerdung verbunden ist, so fliesst jetzt ein Teilstrom I_2 über diesen Kabelmantel.

Zur Vereinfachung soll zunächst angenommen werden, ein Pol der Telephonschleife sei in P_1 an den Kabelmantel angeschlossen. Der Mantelstrom verursacht bis zum Punkt P_2 ausser dem Ohmschen auch einen induktiven Abfall. Der Gesamtwert wird

²⁾ Zastrow, A. und W. Wild: Der Mantelschutzfaktor von Fernmeldekabeln. Elektr. Nachr.-Techn. Bd. 9(1932), Nr. 1, S. 10...26.

³⁾ Benda, E. R.: Untersuchungen über Schienenströme und die Schutzwirkung von Kabelmänteln gegen Starkstromstörungen. Wiss. Veröff. Siemens-Konzern Bd. 9(1930), Nr. 1, S. 338...356.

vom Voltmeter V_1 gemessen. Liegt P_2 viele km von P_1 entfernt, so wird die Spannung zwischen P_1 und P_2 schliesslich gleich gross wie der Spannungsabfall an der Erdung R_{e1} , also z. B. 1500 V. Misst man jedoch die Spannung zwischen P_1 und P_2 auf dem Weg über eine Kabelader mit dem Voltmeter V_2 , so zeigt dieses erneut lediglich den Ohmschen Abfall, den der Mantelstrom im Mantelwiderstand erzeugt, genauer den Ohmschen Spannungsabfall an der Innenhaut dieses Mantels. Man hat es somit durch Wahl eines genügend gut leitenden Kabelmantels oder eines rohrförmigen, verschweissten Zoreskanals in der Hand, die Spannung an der Kabelisolation, die höchstens dem Ohmschen Spannungsabfall im Mantel gleichkommt, beliebig klein zu halten. Dies gilt auch für die Beanspruchung des Schutzübertragers T , dessen Eisenkern samt einer Sekundärklemme an die Anlageerdung angeschlossen wird. Würde der Kabelmantel nicht an die Anlageerdung geerdet, so trate zwischen beiden die volle Erdungsspannung der Anlage auf. Man hat somit die Wahl: Entweder Isolieren des Mantels, wobei eine grosse Spannungsdifferenz des Mantels gegen die Anlage auftritt, aber kein Mantelstrom, oder Erden des Kabelmantels an die Anlage, womit ein Mantelstrom auftritt, der aber automatisch die grosse Spannung an der Kabelisolation und am Schutzübertrager verhindert.

5. Eindringen einer Überspannungswelle in ein Kabel, dessen Mantelanfang nicht geerdet ist

Es mag schliesslich interessieren, was passiert, wenn eine Wanderwelle über die Freileitung F mit dem Wellenwiderstand Z_F gegen ein Kabel K läuft, dessen Mantel nur am Ende geerdet ist (Fig. 19).

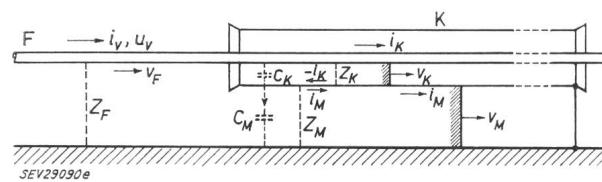


Fig. 19
Eindringen einer Wanderwelle i_v/u_v in einem Kabel K , dessen Mantel nur am Ende geerdet ist

C_K, C_M Kapazitäten des Kabels und des Mantels; F Freileitung mit Wellenwiderstand Z_F ; i_K Wellenstrom im Kabel; i_M Wellenstrom im Mantel; K Kabel mit Wellenwiderstand Z_K ; v_F, v_K, v_M Wellengeschwindigkeiten; Z_M Wellenwiderstand zwischen Kabelmantel und Erde

Auf der Freileitung F gilt für die vorlaufende Wanderwelle:

$$U_v = Z_F i_v$$

Beim Auftreffen auf das Kabel K kommt der Kabelmantel M ohne Zweifel auf eine Spannung, die sich irgendwie aus der kapazitiven Teilung von Kabelkapazität C_K und Mantelkapazität C_M gegen Erde ergeben muss. Nun gilt für die Fortpflanzung einer Welle im Kabel mit dem Wellenwiderstand Z_K der Zusammenhang:

$$U_{vK} = Z_K i_{vK}$$

währenddem für die Luftleitung zwischen Kabelmantel und Erde mit dem Wellenwiderstand Z_M gilt:

$$U_{vM} = Z_M i_{vM}$$

Die Wellengeschwindigkeit v_K im Isolator mit der relativen Dielektrizitätskonstante ϵ ist gegeben durch

$$v_K = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} c$$

c Lichtgeschwindigkeit

Die Mantelwelle läuft infolge $\epsilon = \mu = 1$ mit Lichtgeschwindigkeit, die Kabelwelle wegen $\epsilon > 1$ langsamer. Für den längs des Mantels fliessenden Strom i_M am Kabelanfang gilt die Randbedingung $i = 0$. Der von der Kabelwelle über C_K dem Mantel innen zugeführte Strom i_K speist somit die Mantelwelle auf eine Länge, die im Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten grösser ist als die Welle im Kabel. Wenn z. B. $v_M = 1,5 v_K$, so wird pro Sekunde die Mantellänge $1,5 v_K$ mit einer Ladung versehen, die gleich ist der Ladung der Kapazität c_K der Länge v_K . Daraus ergibt sich die Spannungsteilung beider Teilwellen zu:

$$\frac{u_K}{u_M} = \frac{v_M c_M}{v_K c_K}$$

Die Ströme beider Teilwellen bestimmen sich anderseits daraus, dass am Mantelanfang ein Strom 0 bestehen muss, der sich zusammensetzt aus dem Strom an der Mantelinnenhaut i_K und dem äusseren Mantelstrom i_M . Somit sind beide Ströme i_K und i_M gleich gross. Von der Ladung $i_M t$ gehen im Falle $v_M = 1,5 v_K$ $\frac{2}{3}$ in die Mantelkapazität c_{M1} der Länge v_K , $\frac{1}{3}$ in die Mantelkapazität c_{M2} der Länge $v_M - v_K$.

Auf der Strecke v_K fliessst im Mantel ein Gesamtstrom 0, entsprechend der Randbedingung bei $x = 0$. Vor dem Wellenkopf v_K dagegen fliessst ein wahrer Strom voller Höhe $i_M = i_K$ auf der Strecke $v_M - v_K$, der noch nicht vom innern Kabelmantelstrom $-i_K$ kompensiert ist.

Die Betrachtung zeigt erstens, dass eine Mantelwelle in Luft entsteht, die noch nicht von einer inneren Kabelwelle begleitet ist, nämlich auf der Länge $(v_M - v_K) t$. Zweitens ergibt sich, dass ein nicht geerdeter Kabelmantel beim Eindringen einer Welle auf beträchtliche Spannung kommt, nämlich annähernd auf die volle Wellenspannung der Freileitung, weil $c_M \ll c_K$ ist. Hochspannungskabel

⁴⁾ Der Autor ist von Prof. Dr. D. Müller-Hillebrand in Uppsala auf einen Aufsatz von I. C. Maxwell aus dem Jahre 1876 aufmerksam gemacht worden (British Association for the Advancement of Science 1876, Notices and Abstracts, p. 43), in dem dieser bereits vor bald 100 Jahren den «Faradaykäfig» als wirksames Element des Blitzschutzes beschreibt.

werden gelegentlich einseitig nicht geerdet, damit ein dort angebrachter Kabelstromwandler nur den Leiterstrom misst. An solchen Kabeln sind beim Schalten in der Anlage Überschläge vom offenen Mantel an Erde zu beobachten, weil die einziehenden steilen Wanderwellen den oben geschilderten Vorgang der Mantelaufladung auslösen.

Auch dieses Beispiel zeigt, dass es nötig ist, metallische Kabelmäntel an beiden Enden zu «erdern», d. h. auf kürzestem Wege an die Eisengerüste zu verbinden. Nur dann erfüllen diese Mäntel ihre Aufgabe eines ausgezeichneten Überspannungsschutzes für die umschlossenen Einrichtungen, ohne selber kurzzeitig auf Spannung zu kommen.

Zusammenfassung der Abschnitte 3, 4 und 5

Die Schutzwirkung von metallischen Kabelmänteln ist eine einfache und klare Folge des Induktionsgesetzes. Sie hängt vor allem damit zusammen, dass es bei Wechselfeldern kein Potential gibt, sondern nur Spannungen, die sehr stark vom Weg abhängen, auf dem sie gemessen werden. Daher gelingt es durch geschickte Wahl dieses Weges (nämlich innerhalb einer Röhre oder einem Kabelmantel) einen unter hoher Spannung stehenden Punkt unter Überwindung einer beliebig viel kleineren Spannung zu erreichen.

Im Grenzfall kann in einer Röhre aus gut leitendem Metall ein Punkt beliebig hoher Spannung (auf einem Weg ausserhalb der Röhre gemessen!) ohne Überwindung jeglicher Spannung erreicht werden.

Die Verallgemeinerung dieses Rohrprinzips auf einen beliebig geformten Hohlkörper ist durchaus möglich; sie erklärt die ausserordentlich gute Schutzwirkung des Faradaykäfigs, der an sich das Grundprinzip zur Abschirmung elektromagnetischer Felder beliebiger Frequenz und damit ein grundlegendes Vorbeugungsmittel gegen die Entstehung von Überspannungen bildet⁴⁾.

Der Faradaykäfig erlaubt einen Überspannungsschutz bei beliebig hohen Frequenzen (je höher, um so besser). Demgegenüber ist die übliche «Erdung» ein rein statischer gleichstrommässiger Begriff, der bei 50 Hz, wo der induktive Abfall auf den Erdleitungen noch nicht wesentlich grösser ist als der Ohmsche, gute Resultate als Überspannungsschutz geben kann, der aber bei hochfrequenten Vorgängen in der Regel versagen muss.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. sc. techn. K. Berger, Versuchsleiter der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH), Seefeldstrasse 301, Zürich 8.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Commission Electrotechnique Internationale (CEI)

Sitzung des Comité d'Etudes 33, Condensateurs de puissance, vom 4. bis 7. April 1960 in Rapallo

An der Sitzung des CE 33 nahmen unter dem Vorsitz von R. Nordell (Schweden) 33 Vertreter der Nationalkomitees aus 11 Ländern teil. Zur Behandlung gelangten neben kleineren administrativen Fragen 2 internationale Dokumente: Entwürfe für die Revision der Empfehlungen für Leistungskondensatoren, Publ. 70 der CEI, und eine neue Empfehlung für Seriekondensatoren. Das CES hatte zu beiden Dokumenten

seine Stellungnahme mit Änderungsanträgen bereits früher dem CE 33 unterbreitet.

Bei der Besprechung des Entwurfes zur Revision der Publ. 70 wurden die Vorschläge des CES mit wenigen Ausnahmen berücksichtigt. Eine Temperaturkategorie von -25° bis 40° C wird eingeführt. 40° C gilt als die über max. 1 h auftretende Höchsttemperatur. Die thermische Prüfung wird