

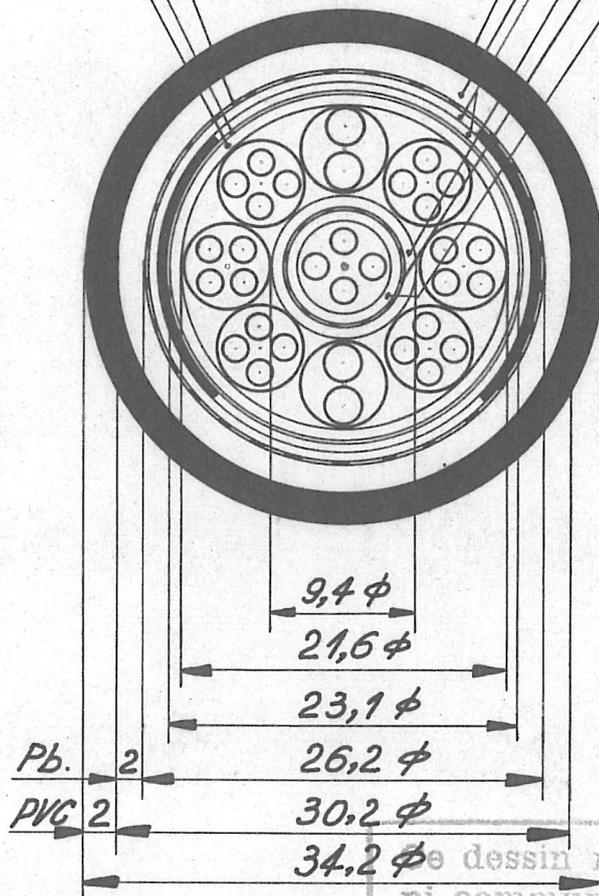
K. Berger, Zürich

Blitzsichere Schwachstromkabel

Couches	Composition
Centre	1 Quarte 1,0 ϕ sous écran
1 Couche	6 Quarte 1,0 ϕ + 2 paires 2,5 mm ²

1 toile métallisée 0,25 mm.
 1 toile coton 0,3 mm.
 1 ceinture 0,75 mm.

Protection PVC. 2 mm.
 Plomb 2 mm.
 2 fers feuillard 30x0,5 mm.
 1 ceinture 0,75 mm.
 1 pap. métallisée 0,15 mm.
 1 ceinture 0,75 mm.



ce dessin ne doit être reproduit ni communiqué à des tiers sans notre autorisation.

Ohne unsere Einwilligung darf diese Zeichnung weder kopiert noch Drittpersonen übergeben werden.

Modifications:

Remplacé par:

Remplace:

Section droite. Câble Löbbia-
Castasegna.
 C^{de} 96725. EW. Stadt Zurich.

Echelle

2:1

Dessiné:	17.6.58	J.P.P.
Contrôlé:		
Vu:	12.6	07

Câbles Cortailod

4-17377a

Blitzsichere Schwachstromkabel

Von K. Berger, Zürich

621.315.21.027.2 : 621.316.93

Der nachstehende Aufsatz gibt den Inhalt eines Referates wieder, das der Versuchsleiter an der Mitgliederversammlung der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) im Dezember 1961 hielt. Der Autor beschreibt darin eine neue elektromagnetische Abschirmung von Schwachstromkabeln, die insbesondere gegenüber Blitzströmen wirksam ist. Sie beruht auf einer künstlich verstärkten Stromverdrängung auf dem Kabelmantel und entsteht dadurch, dass zwischen zwei elektrischen Leiter ein magnetischer Schirm aus einer oder mehreren Lagen eines dünnen Eisenblechs mit einer gesamten Dicke von einem oder wenigen Millimetern gelegt wird. Ein Mantelstrom gegebener Höhe wird dadurch zum grössten Teil auf den äusseren Leiter gedrängt, währenddessen der Strom im inneren Leiter viel kleiner wird, als dessen Ohmscher Widerstand entspricht. Die für die elektrische Beanspruchung der Kabelisolation gegen den Mantel massgebende Längsspannung lässt sich dadurch um Grössenordnungen reduzieren, was durch Anwendung des Induktionsgesetzes dargelegt wird. Die für grösste Blitzströme, sowie für Wechselströme der Frequenz 50 bis zur Grössenordnung 10 kA stark reduzierten Längsspannungen lösen zugleich das Problem der Erdungen der angeschlossenen Apparate, so dass mit den üblichen Prüfspannungen derselben von 2...4 kV auszukommen ist, sofern nur alle Kabelenden gut durchverbunden und möglichst vermascht werden.

Texte d'une conférence que l'ingénieur chargé des essais avait donnée lors de l'Assemblée des membres de la Commission de l'ASE et de l'UCS pour l'étude des questions relatives à la haute tension, en décembre 1961. L'auteur décrit un nouveau blindage électromagnétique de câbles à courants faibles, qui est notamment très efficace contre les courants de foudre. Ce blindage est basé sur un effet pelliculaire artificiellement renforcé sur la gaine du câble, par la présence, entre deux conducteurs électriques, d'un écran magnétique constitué par du fer en lames fines de un à quelques millimètres d'épaisseur totale. Un courant de gaine d'une intensité donnée est ainsi déplacé en majeure partie vers le conducteur extérieur, tandis que le courant dans le conducteur intérieur est beaucoup plus faible que celui qui correspondrait à la résistance de ce conducteur. La tension longitudinale, qui est déterminante pour la sollicitation de l'isolation du câble par rapport à la gaine, peut être ainsi considérablement abaissée, ce qui est démontré par la loi d'induction. Les tensions longitudinales fortement réduites pour les courants de foudre les plus intenses, ainsi que pour les courants alternatifs à 50 Hz jusqu'à 10 kA environ, permettent en outre de résoudre le problème des mises à la terre des appareils raccordés, de sorte que ceux-ci peuvent être essayés sous les tensions usuelles de 2 à 4 kV, à la condition que toutes les extrémités des câbles soient bien reliées entre elles et étroitement maillées.

Nachdem sich in den letzten Jahren die Defekte von Schwachstromkabeln in Wasserstollen von Kraftwerken in den Zentralalpen des Tessins in unangenehmer Weise gehäuft haben, ist bereits in den Herbst-Mitgliederversammlungen der Jahre 1959 und 1960 über die grundsätzlichen Mittel zur Behebung der Blitzstörungen an Stollenkabeln berichtet worden (Bull. SEV 1960, Nr. 11 und 1961, Nr. 9). Es sei besonders erinnert an die Kabelschäden z.B. auf der Strecke Sambuco-Wasserschloss Peccia¹⁾ sowie an die Schäden am Stollenkabel Caveragno-Palagnedra, die von den Kabelwerken Brugg, und schliesslich an die mehrfachen Schäden der Stollenkabel Biasca-Olivone der Kraftwerke Blenio, die von den Kabelwerken Cortailod und zum Teil von den Spezialisten der PTT untersucht wurden. An diese Schadenfälle von Stollenkabeln reiht sich eine Untersuchung der Ingenieure der PTT anlässlich eines grösseren Blitzschadens im Sommer 1961 am Maggiatalkabel der PTT bei Avegno. Über den Blitzschutz von Telephonanlagen erschien bereits 1958 ein ausgezeichnetes Überblick²⁾. Die Schäden bestanden vor allem in vielfachen Aderunterbrüchen oder Aderkurzschlüssen sowie in einzelnen Löchern im Bleimantel oder im PVC-Mantel. Papierisolierte Kabel werden infolge des eindringenden Wassers sofort unbrauchbar, aber auch kunststoffisolierte Kabel mussten auf grossen Strecken ausgewechselt

werden, nachdem zuviele Aderpaare unbrauchbar geworden waren.

Aus allen, zum Teil recht merkwürdigen Schaden Spuren war zu schliessen, dass der Ohmsche Widerstand des Bleimantels, sofern ein solcher überhaupt vorhanden war, zu hoch lag. Es entsteht dann beim Abfliessen des Blitzstromes über den Mantel ein Ohmscher Spannungsabfall, der sich im Kabelinnern als sog. «Längsspannung» äussert. Diese Längsspannung beansprucht die Isolation der Adern gegenüber dem Mantel auf Durchschlag. Bei einem üblichen Mantelwiderstand der Grössenordnung 0,5...1 Ω /km entstehen bei z. B. 20 kA Blitzstrom auf dem Mantel 10...20 kV Spannungsabfall pro km. Die übliche Papierisolation des Mantels ist dieser Beanspruchung nicht gewachsen und wird durchgeschlagen. Die vom Durchschlag betroffene Ader kommt damit auf die lokale Mantelspannung, womit sich die Spannungsdifferenz zwischen die betroffene und alle anderen Adern verlagert. Dadurch entsteht in der Umgebung des Manteldurchschlages eine ganze Reihe von Aderdurchschlägen und Aderunterbrüchen, je nach der Dauer des Stromstosses.

Eine erste Abhilfe gegen solche Störungen besteht somit in der Herabsetzung des Ohmschen Widerstandes des Kabelmantels. Die Möglichkeiten, den Mantelwiderstand herabzusetzen, haben sich leider als sehr beschränkt erwiesen. Da die Prüfspannung der Aderisolation gegen den Mantel in der Regel nicht höher als 2...4 kV liegt, müsste die Längsspannung auf höch-

¹⁾ E. Foretay und E. Ruchet: Schutz von Kabeln in Wasserstollen gegen Blitzschäden. Bull. SEV 1961, Nr. 2.

²⁾ H. Meister: Blitzschutz an Telephonanlagen. Techn. Mitt. PTT 1958, Nr. 1.

stens diesen Wert reduziert werden. Wie obiges Beispiel zeigt, lässt sich dies mit einem Bleimantel weniger Millimeter Dicke nicht erreichen. Selbst bei Verwendung von Kupferbändern oder Kupferdrähten unter dem Bleimantel ergeben sich Metallmengen, die recht teuer und schwer werden. Wird z.B. ein Mantelstrom von 20 kA über 2 km Kabellänge zugrunde gelegt, so müsste der Widerstand höchstens

$$\frac{2 \text{ [kV]}}{20 \text{ [kA]}} = \frac{1}{10} \text{ [\Omega]}$$

betragen, das entspricht $1/20 \text{ }\Omega/\text{km}$ oder etwa $20 \cdot 20 = 400 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$. Solche Kabelmäntel sind schlechterdings nicht realisierbar.

Mit dem Ausbau der grossen Kraftwerkgruppen in unseren Alpen ist eine ähnliche Schwierigkeit für Schwachstromkabel dadurch entstanden, dass die im Moment von Erdschlüssen der 220-kV- und 380-kV-Anlagen auftretenden Erdströme ebenfalls die Grössenordnung von 10 kA erreichen.

Für den Schutz ihrer Schwachstromkabel gegenüber solchen grossen Wechselströmen im Erdboden haben die Ingenieure der PTT in den letzten Jahren den Weg beschritten, die gefährdeten Kabel in einen durchverbundenen Zoreskanal zu verlegen. Zu diesem Zweck werden an den Enden der einzelnen Zores-Halbschalen 6 mm starke Kupferdrähte hart angelötet, die nach der Verlegung des Mantels durch Lötens oder Klemmen durchverbunden werden. Die gleiche Massnahme wird auch für gefährdete Schwachstromkabel längs der Geleise elektrischer Bahnen angewendet. Durch den grossen Eisenquerschnitt entsteht eine bedeutende Herabsetzung des Längswiderstandes und damit eine entsprechende Verminderung der Längsspannung im Kabel. In anderen Fällen wurde unter dem Bleimantel eine Lage runder Kupferdrähte angebracht, was ebenfalls eine wesentliche Reduktion des Mantelwiderstandes bewirkt.

Eine zweite Möglichkeit zur Herabsetzung der im Kabelinnern auftretenden Überspannungen besteht in der Ausnützung der Stromverdrängung im Kabelmantel. Für die üblichen Wechselströme der Frequenz 50 Hz und erst recht für Bahnströme der Frequenz $16\frac{2}{3} \text{ Hz}$ ist die Stromverdrängung in den wenige Millimeter starken Bleimänteln oder Kupferverstärkungen ganz unwesentlich. Im Eisen des Zoreskanals oder in Armierungen aus Eisen tritt sie dagegen bereits in beschränktem Mass in Erscheinung. Sie bewirkt, dass der Wechselstrom in die äusseren Schichten gedrängt wird, während er sich bei Gleichstrom gleichmässig über den Mantelquerschnitt verteilen würde. Da der beträcht-

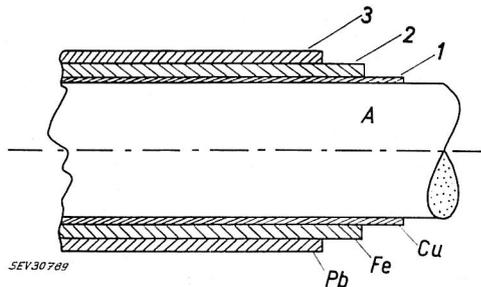


Fig. 1
Schematischer Mantelquerschnitt

1 innerer Leiter, z. B. aus Kupfer (Cu); 2 ferromagnetische Schicht, z. B. aus Eisen (Fe); 3 äusserer Leiter, z. B. aus Blei (Pb);
A Kabelinneres (Adern)

liche Bleimantelstrom aussenliegende Eisenschichten, wie z.B. Eisenarmierungen, sowie den Zoreskanal magnetisiert, wird dieser schon bei mässigen Mantelströmen magnetisch gesättigt, wodurch die wirksame Permeabilität des Eisens rasch sinkt, so dass das Eisen seine günstige, den Strom nach aussen drängende Wir-

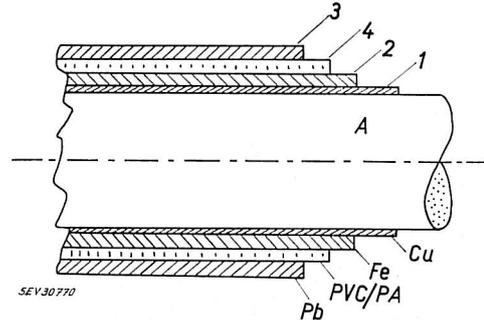


Fig. 2

Schematischer Mantelquerschnitt
4 isolierende Schicht aus PVC oder Polyäthylen (PA)
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

kung wieder verliert²⁾. Günstig ist die Stromverdrängung im Mantel nach aussen unter allen Umständen deshalb, weil ja, wie früher gezeigt wurde, für die Beanspruchung der Kabelisolation nur die Längsspannung an der innersten Haut des leitenden Mantels massgebend ist. Diese Längsspannung rechnet sich aus dem spezifischen Widerstand der inneren Mantelhaut und der dortigen Stromdichte aus, die infolge der Stromverdrängung kleiner wird. Da die Stromverdrängung mit höherer Frequenz des Wechselstromes zunimmt, muss es insbesondere für Blitzströme möglich sein, einen Mantel derart aus leitenden und magnetischen Stoffen zu kombinieren, dass die Stromverdrängung möglichst gross wird. Die folgenden Fig. 1 und 2 zeigen Beispiele einer derartigen Anordnung. In Fig. 1 sind über dem Kabelinnern A drei Schichten 1, 2 und 3 gezeichnet, die z.B. aus Kupfer, Eisen und Blei bestehen, d.h. aus zwei elektrisch guten Leitern mit einem dazwischen gelegten Stoff hoher magnetischer Permeabilität. In Fig. 2 befindet sich zwischen dem Eisen- und dem Bleimantel noch eine Isolierschicht aus PVC oder Polyäthylen.

Was passiert nun, wenn diesem kombinierten Kabelmantel ein Blitzstrom I z.B. an einem Endverschluss oder einer Muffe M aufgedrückt wird? Fig. 3 zeigt die Anordnung für den Fall, wo die mittlere Schicht aus Eisen zwischen dem inneren Leiter 1 aus Kupfer und dem Bleimantel 3 isoliert ist. Der Einfachheit halber sei angenommen, der Blitzstrom I flosse bei der Muffe $M1$ zu und trete bei der Muffe $M2$ wieder aus. Infolge der leitenden Verbindung der Leiter 1 und 3 teilt sich der Strom I auf in einen Strom im äusseren Mantel I_a und einen Strom im inneren Leiter I_i . Der zweite Strom magnetisiert den Eisenkern, der ähnlich wie ein Transformator aus dünnen, voneinander isolierten Blechen bestehen soll, um grosse Wirbelströme zu verhindern. Der Magnetfluss im Eisen bildet somit für den Strom I_i einen induktiven Widerstand ωL , der mit wachsender Frequenz ω grösser wird. Es ist bereits mit Eisenschichten von insgesamt 1 oder wenigen Millimetern möglich, ωL um Grössenordnungen grösser als den Ohmschen Widerstand R_i oder R_a zu machen. Somit fliesst ein sehr hoher Anteil des Gesamtstromes I als Ohmscher

Strom I_a im Bleimantel 3 und nur ein ganz kleiner Bruchteil als vorwiegend induktiver Strom I_i im inneren Leiter 1. Es handelt sich im Prinzip einfach um die Parallelschaltung eines Ohmschen Widerstandes R_a mit der Drosselspule $R_i/\omega L$. Der kleine Drosselspulenstrom I_i erzeugt nun im Leiter 1 eine beliebige kleine Ohmsche Längsspannung $I_i R_i$, und diese ist es, die für die Verhinderung von Kabeldurchschlägen massgebend ist. Mit anderen Worten: Die Anordnung bewirkt einfach eine künstlich vergrösserte Stromverdrängung vom inneren Leiter 1 auf den Bleimantel 3.

Da erfahrungsgemäss wenige Elektroingenieure den tieferen Sinn des Induktionsgesetzes voll erfassen, soll das Gesagte noch an Hand der Fig. 5 etwas weiter ausgeführt werden. Der Strom I_a ergibt im Bleimantel 3 eine Spannung U_a , die sich bei gleichmässiger Stromdichte aus dem Gleichstromwiderstand R_a errechnet. Diese Spannung lässt sich bekanntlich in jeder Faser des Bleimantels mit einem dorthin gelegten Voltmeter messen, wie das früher gezeigt wurde (Bull. SEV 1961, Nr. 9, Fig. 13 und 14). Wäre eine Stromverdrängung vorhanden, so würde ein Voltmeter in der äussersten Faser höhere Spannungen anzeigen als an der innersten Faser. Würde man die Voltmeter-Messleitung nicht in einer Faser des Bleimantels, sondern wie in der Zeichnung im Luftraum ausserhalb verlegen, so würde dort ein Wert U_a gemessen, der grösser ist als direkt am Mantel, weil bereits ein magnetischer Fluss Φ_a im Luftraum umschlossen wird. Die Spannung im Wechselstromfeld zwischen zwei festen Punkten hängt ja bekanntlich vom Weg ab, auf dem sie gemessen wird. D.h. es existiert dort kein Potentialfeld und es ist grundsätzlich falsch, von irgendwelchen Potentialen oder Potentialdifferenzen zu reden.

Würde die Voltmeter-Messleitung zwischen den Blechen des Eisenkerns verlegt, so würde die gemessene Spannung zwischen $M1$ und $M2$ beim Verschieben der Messleitung um 1 Blech nach aussen jeweils um den Betrag der in diesem Blech induzierten Wirbelspannung (Umlaufspannung) zunehmen. Die nähere Überlegung zeigt, dass zwischen zwei voneinander vollkommen isolierten Blechen eine Isolation vorhanden sein muss, die mindestens der halben Wirbelspannung pro Blech entspricht. Diese Isolation ist aus Fig. 3 ersichtlich. Die Spannung U_i im Kabelinnern dagegen kann man auf irgendeinem Weg im Kabelinnern mes-

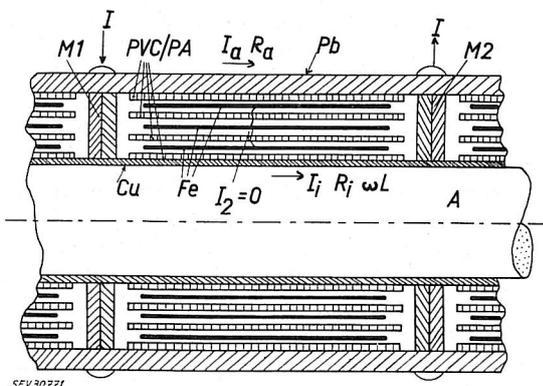


Fig. 3
Schnitt durch den Kabelmantel

A Kabelinneres (Adern); $M1$ und $M2$ Muffen des Kabels; I Mantelstrom; I_a Strom im äusseren Leiter 3; I_i Strom im inneren Leiter 1; I_2 Strom in der ferromagnetischen Schicht 2; R_a Widerstand des äusseren Leiters 3; R_i Widerstand des inneren Leiters 1; ωL Reaktanz des inneren Leiters 1; PA Polyäthylengehäuse

sen, denn dort existiert kein Magnetfeld und damit keine induzierte Spannung. Mit anderen Worten, es herrscht dort ein Potentialfeld.

Zwischen den Spannungen U_a und U_i , die beide zwischen den Punkten $M1$ und $M2$ gemessen sind, besteht eine Differenz, die gleich der vom Magnetfluss im Eisenkern 2 induzierten Spannung ist. Als Induktionsgesetz geschrieben heisst dies:

$$\oint \vec{E} \vec{ds} = - \frac{d\Phi}{dt}, \text{ oder}$$

$$\bar{I}_a R_a - \bar{I}_i R_i = \bar{U}_a - \bar{U}_i = - \bar{I}_i \omega L$$

Dabei sind die Spannungen U_a und U_i zwischen den gleichen Punkten $M1$ und $M2$ gemessen. Indem die induzierte Spannung $I_i \omega L$ vielfach grösser als die Ohmsche Spannung $I_i R_i$ gemacht wird, kann die Längsspannung um Grössenordnungen reduziert werden, wie folgende einfache Rechnung zeigt:

Es ist

$$\frac{I_i}{I_a} = \frac{R_a}{Z_i} = \frac{R_a}{\sqrt{R_i^2 + \omega^2 L^2}} \approx \frac{R_a}{\omega L}$$

$$\bar{I} = \bar{I}_a + \bar{I}_i$$

somit die Längsspannung

$$\bar{I}_i R_i = \frac{\bar{R}_a}{\bar{R}_a + \bar{Z}_i} \bar{I} R_i \approx \frac{R_i R_a}{\omega L} \bar{I}$$

Gegenüber dem Fall, wo der gesamte Mantelstrom I auf dem inneren Leiter 1 fließen würde, wird die Längsspannung sehr angenähert um den Faktor $R_a/\omega L$ reduziert. Voraussetzung ist, dass $\omega L \gg R_i$, was leicht zu erreichen ist, solange keine Sättigung des Eisens 2 auftritt.

Für einen gegebenen Strom I kann die Sättigung verhindert werden, indem der Bruchteil I_i/I so bestimmt wird, dass dabei die Durchflutung des Eisenkernes 2 noch unterhalb ihres Wertes für die Sättigung liegt. Sättigung tritt bei üblichen Eisensorten bei Durchflutungen von etwa 10 A/cm auf. Bei einem Umfang der Eisenschicht 2 von z.B. 10 cm (etwa 31 mm Durchmesser) entspricht dies einem Strom von etwa 100 A im Leiter 1. Für einen Gesamtstrom auf dem Mantel von 50 kA, entsprechend einem Blitzstrom von 100 kA bei beidseitigem Abfluss über den Kabelmantel, muss somit gelten:

$$\frac{R_a}{\omega L} = \frac{I_i}{I} \approx \frac{100}{50000} = \frac{1}{500}$$

Mit $R_a = 1 \Omega/\text{km}$ muss somit ωL grösser sein als 500 Ω/km . Bei einer Ersatzfrequenz des Blitzstromes von 10 kHz wird:

$$L \geq \frac{500}{2\pi \cdot 10^4} = 80 \cdot 10^{-4} \text{ H/km}$$

Bei einer Ersatzfrequenz von 10^3 Hz entsprechend einem langdauernden Stromstoss wird:

$$L \geq \frac{500}{2\pi \cdot 10^3} = 80 \cdot 10^{-3} \text{ H/km} = 0,08 \text{ H/km}$$

Berechnen wir hiezue die Induktivität eines unterteilten Eisenzylinders von 1,5 mm Dicke, dessen magnetischer Widerstand R_m beträgt:

$$R_m = \frac{l}{q \mu} = \frac{0,1}{0,0015 \mu} = 66,7 \frac{10^7}{4 \pi \cdot \mu_{rel}} \approx \frac{5,3 \cdot 10^7}{\mu_{rel}}$$

$$L = \frac{1}{R_m} = \frac{1}{5,3} 10^{-7} \cdot \mu_{rel} \text{ pro m}$$

Mit

$$\mu_{rel} \approx 5000 \text{ wird } L \approx 10^{-4} \text{ H/m} = 0,1 \text{ H/km}$$

Man erfüllt somit mit einer wirksamen Eisenschicht von 1,5 mm Stärke die Forderung, dass

$$\omega L \geq 500 R_a \quad (R_a = 1 \Omega/\text{km})$$

sei.

Ein Innenleiter I , bestehend aus zwei Kupferbändern von je 0,2 mm Dicke, gibt bei üblichen Schwachstromkabeln einen Ohmschen Widerstand von ungefähr $1 \Omega/\text{km}$. Mit 100 A ergibt sich daraus eine Längsspannung von 100 V/km, selbst bei grössten Blitzströmen auf dem Mantel.

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde ein lamellierter Eisenkern vorausgesetzt, dessen einzelne Bleche gegeneinander und gegen den Innenleiter I und den Aussenleiter 3 in Fig. 3 isoliert sind. Diese Anordnung bietet Gewähr dafür, dass das Eisen nur vom Strom I_i im Innenleiter I magnetisiert wird. Würden dagegen die Bleche des Eisenkernes bei den Muffen M oder den Endverschlüssen nach Fig. 4 mit den Leitern I und 3 verbunden, so würden diese Bleche ebenfalls Strom führen, und zwar entsprechend der nach aussen wachsenden Feldstärke oder Spannung nach aussen immer mehr Strom. Dies würde zu einer zusätzlichen Magnetisierung der äusseren Lagen des Eisenkernes führen. Dies darf nicht sein, weil damit die Sättigung des Eisens viel früher erreicht würde. Um dies zu verhindern, soll der Eisenkern aus relativ schmalen Eisenband oder Eisendraht gebildet werden, das mit ganz kleiner Steigung über den Innenleiter I gewickelt wird, ähnlich der klassischen Umwicklung einzelner Adern mit Eisendraht nach *Krarup*. Derart kann die Impedanz für einen Strom im Eisenband beliebig erhöht werden. Überdies wirkt die kleine Steigung günstig bezüglich des magnetischen Widerstandes. Durch Überlappung der Lagen und durch schmale Spalten zwischen zwei benachbarten Windungen derselben Lage kann der magnetische Widerstand für den kreisförmigen Magnetfluss tief gehalten werden. Jeder Luftspalt erhöht den bezüglich Sättigung zulässigen Strom I_i im inneren Leiter I . Die einzelnen Lagen des Eisenbandes sind in diesem Fall nur schwach gegeneinander zu isolieren; denn längs jedes Bandes besteht

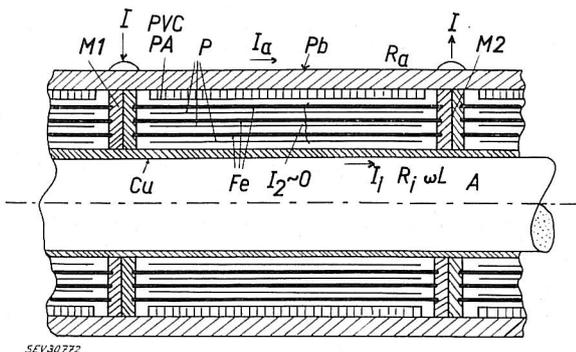


Fig. 4
Schnitt durch den Kabelmantel wie in Fig. 3
P Isolation aus Papier, Lack, Oxyd usw.
zwischen den Eisenlagen Fe

ein linearer Spannungsabfall von einer Muffe $M1$ zur nächsten Muffe $M2$, so dass theoretisch keine radiale Spannung vorhanden ist. Die Lösung nach Fig. 4 erlaubt eine Reduktion des Kabeldurchmessers und ist somit vorteilhaft.

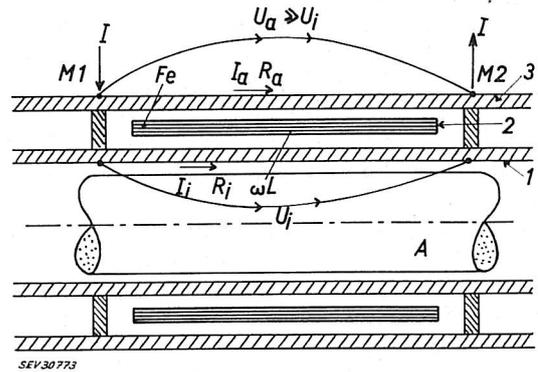


Fig. 5
Schema der Ströme und Spannungen im kombinierten Kabelmantel mit dem lamellierten Eisenkern Fe

U_a an der äusseren Manteloberfläche gemessene Spannung; U_i an der inneren Manteloberfläche gemessene Spannung ($U_i \ll U_a$); 1 innerer Leiter; 2 ferromagnetische Schicht; 3 äusserer Leiter. Der Stromein- und -austritt zwischen den Muffen $M1$ und $M2$ ist vernachlässigt.

Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 3

In den Fig. 3 und 4 war stets der Blitzstromzutritt und -austritt bei Endverschlüssen oder Muffen vorausgesetzt, wie das in der Regel bei Wasserfassungen im Hochgebirge der Fall ist. Dieser Fall ist jedoch nicht der einzige, denn bei Blitzschlägen in die Felsüberdeckung von Hochgebirgskabeln tritt ein Bruchteil des Blitzstromes von etwa 10...30% desselben durch das Gebirge zum Kabelmantel. Dieser Stromeintritt verteilt sich auf eine Länge von Hunderten von Metern, wie das insbesondere beim Fall Peccia ohne leitenden Kabelmantel ersichtlich wurde. Der auf der Strecke zwischen zwei Muffen zudringende Strom muss bis zu den nächsten Muffen über den äusseren Kabelmantel allein abfliessen. Dies ist bezüglich Längsspannung im Kabelinnern günstig. Der stromlose Zustand der magnetischen Schicht und des inneren Leiters bewirken aber, dass dort keine Spannungsabfälle vorhanden sind. Der Spannungsabfall auf dem äusseren Bleimantel äussert sich daher gegenüber der Eisenschicht, und es ist deshalb nötig, dort eine Mantelisolierung einzufügen, die diesem Spannungsabfall Rechnung trägt, wie das in Fig. 4 angedeutet ist. Mit 30% eines Blitzstromes von 100 kA auf dem äusseren Mantel, je 15% in beiden Richtungen, entstehen bei $1 \Omega/\text{km}$ äusserem Mantelwiderstand Spannungsabfälle von 15 kV/km. Bei einer Muffenentfernung von 1 km entsteht im schlimmsten Fall, nämlich beim Stromzutritt in der Mitte zwischen zwei Muffen, ein Spannungsabfall von 7,5 kV. Grössere Muffendistanz liefert entsprechend mehr Spannung. Dieser Spannung muss der Isoliermantel zwischen den Schichten 2 und 3 gewachsen sein. Dies dürfte mit jeder PVC- oder Polyäthylenschicht ohne weiteres der Fall sein, nicht aber mit Papierisolation.

Schliesslich wäre zu untersuchen, ob der beschriebene kombinierte elektromagnetische Mantel auch bei niederfrequenten Wechselströmen einen Vorteil hat, insbesondere bei 50-Hz-Erdströmen. Dazu soll nachfolgendes Beispiel dienen.

Ein geschlossenes Eisenrohr von 1,5 mm Wandstärke und 100 mm Umfang hat, wie oben gerechnet, eine Induktivität L von etwa 0,1 H/km. Somit wird bei 50 Hz:

$$\omega L = 31,4 \cdot 10^{-3} \Omega/\text{m} = 31,4 \Omega/\text{km}$$

Verglichen mit einem Ohmschen Längswiderstand R_a von etwa 1 Ω/km ist die Reaktanz ωL bereits rund 30mal grösser. Der Teilstrom I_i im inneren Leiter wird dadurch praktisch bereits rein induktiv und beträgt rund ein Dreissigstel des Gesamtstromes I , solange $\mu \approx 5000$ gilt, d.h. solange keine Sättigung des Eisens besteht. Da dies der Fall wird bei etwa 100 A (Scheitelwert) im inneren Leiter, so bildet der kombinierte Mantel mit etwa 1 Ω/km für R_i und R_a bis zu Gesamtströmen von $30 \cdot 100 = 3000$ A (Scheitelwert) eine praktisch vollkommene Abschirmung mit nur etwa 100 V/km Längsspannung (Scheitelwert). Für grössere Erdströme muss R_a kleiner gemacht werden, für 12000 A (Scheitelwert) z.B. viermal. Dies ist noch mit

einem bescheidenen Aufwand von Kupferbändern oder Kupferdrähten unter dem Bleimantel möglich. Der kombinierte Schirm scheint jedenfalls auch für niederfrequente Erdströme wesentlich günstiger zu sein als alle bisherigen Ausführungen ohne Eisenkern zwischen den Leitern.

Versuche an einem Kabelmuster, die von der FKH in der Versuchsstation Däniken durchgeführt wurden, haben das günstige Resultat bestätigt. Dabei war die Zwischenschicht aus Eisen nicht als magnetischer Schirm, sondern als mechanische Stützspirale gegen den Wasserdruck im Stollen ausgebildet und dementsprechend wenig unterteilt. Trotzdem liess sich die vorstehend beschriebene Wirkung deutlich erkennen. Weitere Versuche sind in Aussicht genommen.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. K. Berger, Versuchsleiter der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen, Seefeldstrasse 301, Zürich 8.