Grundsätzliche Überlegungen zur Revision der Vorschriften über die Erdung von Hochspannungsanlagen

Von K. Berger, Zürich

Sonderabdruck
aus dem Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Jahrgang 1961, Nr. 9

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

Sonderabdruck aus dem Bulletin des SEV, Jahrgang 1961, Nr. 9

Grundsätzliche Überlegungen zur Revision der Vorschriften über die Erdung von Hochspannungsanlagen

Von *K. Berger*, Zürich

Der Aufsatz gibt den Inhalt eines Vortrages wieder, den der Autor als Versuchsleiter vor der Mitgliederversammlung der Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen (FKH) am 1. Dezember 1960 hielt. Im Referat werden zunächst einige Störungsvorgänge beschrieben, die sich für die Anordnung und Bemessung der Erdungen in Hochspannungsanlagen von praktischer Bedeutung erwiesen haben. Die Grenzen der für den Menschen noch ungefährlichen Wechselströme und Stoßströme werden auf Grund der neueren Literatur erwähnt und mit den Berührungsspannungen und -strömen bei Isolationsfehlern verglichen. Im Zusammenhang mit der heute in Revision befindlichen Verordnung für Starkstromanlagen werden vier Punkte für die Neufassung der grundsätzlichen Erdungsbestimmungen zur Diskussion gestellt. Im wesentlichen wird die Schaffung einer einheitlichen und einzigen «Hochspannungserdung» an Stelle der bisherigen «Schutz- und Betriebserdungen» vorgeschlagen. Wo Niederspannungskreise den Bereich der Hochspannungsanlage verlassen (Ortsnetz, PTT), wird hiefür eine getrennte «Niederspannungserdung» benötigt, die bisher den Namen «Sondererdung» trägt. Auf die infolge der gegenüber früher grösseren Speisespannung (16 kV statt 6...10 kV) gewachsenen Anforderungen an die Isolation des Niederspannungskreises in den Ortstransformatorstationen (Verbraucherstationen) wird besonders hingewiesen.

Cet article est basé sur une conférence que l'auteur a donnée, en sa qualité d'ingénieur chargé des essais, 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 (FKH), le 1er décembre 1960. Il débute par la description de quelques phénomènes perturbateurs, qui sont à la base de la disposition et du dimensionnement des terres d'installations à haute tension. Les limites des courants alternatifs et des courants de choc encore non dangereux pour les personnes sont indiquées, en se basant sur des communications récentes, et comparées avec les tensions et courants de contact qui résultent de défauts d'isolement. En relation avec la revision en cours de l'Ordonnance sur les installations électriques à fort courant, quatre points sont mis en discussion pour la nouvelle teneur des dispositions essentielles concernant les mises à la terre. L'auteur propose principalement la création d'une seule et unique «terre pour l'installation à haute tension», au lieu des «terres de protection et de service» prévues jusqu'ici. Là où des circuits basse tension quittent la zone de l'installation à haute tension (réseau local, PTT), il faut une «terre pour circuits extérieurs à basse tension» séparée, appelé jusqu'ici «terre séparée». Enfin, l'auteur attire particulièrement l'attention sur le fait qu'en raison de la tension d'alimentation plus élevée qu'autrefois (16 kV, au lieu de 6 à 10 kV), les exigences posées à l'isolement des circuits extérieures à basse tension dans les postes de transformation locaux (postes de consommateurs) sont devenues plus sévères.

Die im Gange befindliche Revision der Verordnungen für Starkstrom- und Schwachstromanlagen hat auch das Problem der Vorschriften, wie Erdungen in Hochspannungsanlagen beschaffen sein sollen, neu aufgerollt. Seit der 3. Auflage der Verordnung über elektrische Anlagen vom Jahre 1933 und der 4. Auflage (elektrische Anlagen und Enteignung) vom Jahre 1948 sind die elektrischen Anlagen in der Schweiz in einem Mass ausgebaut worden, dass auch die Anforderungen an die Erdungen gewaltig gestiegen sind. Die Betriebserfahrungen, die mit der direkten Nullpunkterdung gemacht wurden, ferner die Überlegungen und Erfahrungen der Stoßspannungs-Technik verlangen eine Überprüfung der Grundlagen des Abschnitts «Erdungen».

Der Zweck der Erdung ist offenbar zweifacher Art

1. Die Erdung soll in erster Linie das Berühren aller unmittelbar zugänglichen Leiter in Hochspannungsanlagen gefahrlos machen. Die «Erdung» bezweckt somit den Schutz der Lebewesen in der Hochspannungsanlage gegen Spannungsdifferenzen zwischen berührbaren Anlageteilen. Dieser Schutz ist nötig im Moment, wo irgendwelche Isolationsfehler einen Stromübertritt auf normalerweise stromlose Leiter bewirken, oder wenn Blitzströme in die sonst stromlosen Teile einer Anlage geraten. Im ersten Fall stammen die Fehlerströme aus den Stromquellen der Anlage, im zweiten Fall zunächst aus dem Blitz, anschliessend in der Regel ebenfalls aus den Quellen der Hochspannungsanlage.

Neben dem Überspannungsschutz der Lebewesen in der Anlage kann es auch nötig sein, zu verhindern, dass von einem Fehlerstrom in der Anlage weitere Überschläge, Funken und Lichtbogen bewirkt werden, das heisst, Spannungsdifferenzen auf harmlose Werte zu begrenzen. Auch in diesem Sinn ist das Erdungsproblem ein Überspannungsschutz-Problem.

Die Erdung, welche diesen Zweck erfüllen soll, wird denn auch in den bisherigen Verordnungen als «*Schutzerdung*» bezeichnet (Art. 13 und 14).

2. Die Erdung soll in gewissen Fällen einen Strom dem Erdboden zuführen. Beispiele hierfür sind die Polerdung in Bahnanlagen, die Nullpunkterdung in Höchstspannungsanlagen, die Erdung einer Klemme der Hochspannungswicklung von Spannungswandlern, die Erdung der HF-Kreise für leitungsgerichtete Telefonie, die Erdung der Überspannungsableiter usw. In den einen Fällen handelt es sich um dauernde Betriebsströme wie bei Polerdungen von Bahnen und bei Spannungswandlern, im andern um vorübergehende Ströme wie im Nullpunkt von Leistungstransformatoren oder in den Ableitern.

Die Verordnung spricht in diesem Fall von einer «*Betriebserdung*» (Art. 15 und 16).

Wie wird nun der Zweck der Erdung als Schutz- und Betriebserdung erreicht?

Der *Schutz von Personen*, das heisst die Verhinderung von gefährlichen Berührungsspannungen, z. B. zwischen Händen und Füssen, kann offenbar nur dadurch erreicht werden, dass die *Spannungsdifferenz berührbarer Leiter* auf ungefährliche Werte begrenzt wird.

Wie hoch liegen nun diese ungefährlichen Werte?

Nach der heutigen Starkstromverordnung soll die Berührungsspannung den Betrag von effektiv 50 V bei 50 Hz nicht übersteigen. Nach den deutschen Vorschriften liegt diese Grenze bei 65 V. Da mit einem Körperwiderstand des Menschen von 1000...2000 Ω zu rechnen ist, ergeben sich folgende höchstzulässige Grenzen:

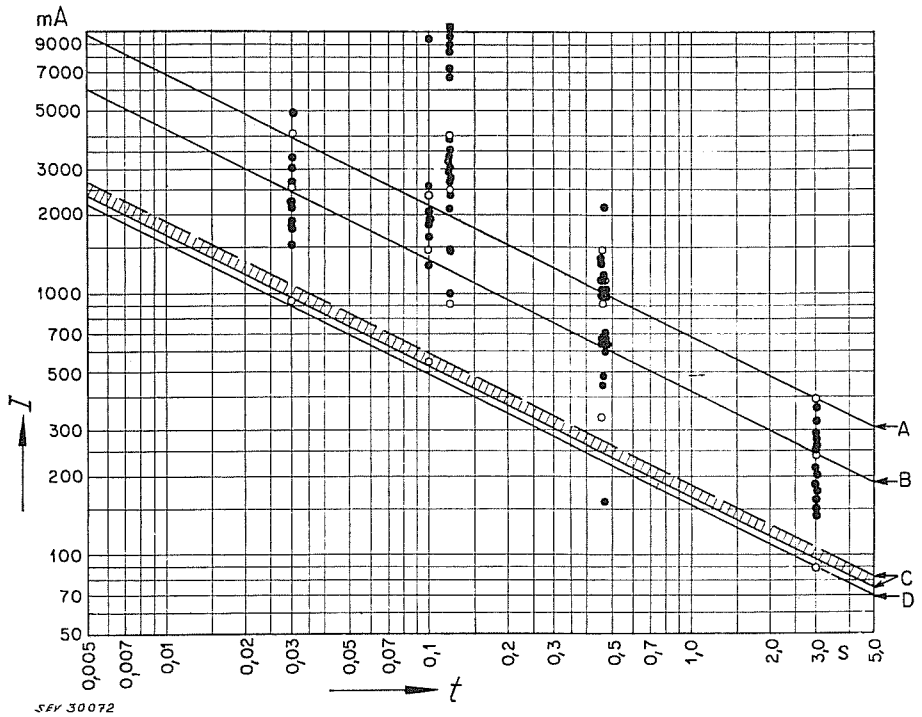

Fig. 1

Kritische Wechselströme *I* (60 Hz) nach Dalziel, die zum Herzflimmern führen, in Funktion ihrer Dauer der Stromeinwirkung *t*

● gemessen an Schafen von 57,4 kg Gewicht

○ gerechnet nach Formel $I^2t = 0{,}027$ [A²s]

Flimmer-Wahrscheinlichkeit:

A 99½ % für Schafe von 57,4 kg Gewicht; *B* 50 % für Schafe von 57,4 kg Gewicht; *C* ½ % für Tiere und Menschen von 70 kg Gewicht; *D* ½ % für Schafe von 57,4 kg Gewicht

Für den Körperstrom I während 5 s

$$I = \frac{U}{R} = \frac{50}{1000...2000} = 25...50 \text{ mA}$$

Für die elektrische Ladung während 5 s

$$Q = IT = (25...50) \cdot 5 = 125...250 \text{ mCb}$$

Für die elektrische Energie während 5 s

$$A = I^2RT = UIT = 6{,}3...12{,}5 \text{ Ws}$$

Seit dem Erscheinen der letzten Verordnungen sind von *Ch. F. Dalziel* in Berkeley (Cal.) ausführliche Untersuchungen über die Gefährdung von Menschen und Tieren durch Wechselstrom und Stoßstrom veröffentlicht worden[1]). Es ist daraus zu schliessen, dass für *Wechselströme der Frequenz 60 Hz (und 50 Hz)*, die während 0,01...5 s den Körper von Hand zu Fuss durchfliessen, der Ausdruck $\int i^2 dt$, das heisst der Stromquadratimpuls für die Gefährdung massgebend ist. Dieser Impuls beträgt nach *Dalziel* für die Grenze, an der in 0,5% aller Fälle Herzflimmern auftritt:

$$\int i^2 dt \approx 0{,}027 \text{ [A}^2\text{s]}$$

Fig. 1 gibt eine Reproduktion der entsprechenden Kurven, die an Schafen gemessen wurden. Die im menschlichen Körper auf Grund dieser Messungen als höchstzulässig zu bezeichnende Wechselstromenergie beträgt:

$$A_K \approx 0{,}027\ R \text{ [Ws]}$$

wenn R den Körperwiderstand (in Ω) bedeutet.

Für die *Gefährdung durch Stoßströme* hat *Dalziel* eine Reihe von Unfällen untersucht, deren Resultate Fig. 2 zeigt. Der Autor zieht aus den spärlichen Daten den Schluss, dass bei den kurzen Impulsen, die bei reinem Stoss eher mit Gleichstrom als Wechselstrom zu vergleichen sind, mit einer Gefahrengrenze zu rechnen ist, deren Stromquadratimpuls mindestens doppelt so hoch liegt, das heisst bei einer kritischen Energie:

$$A_K = R \int i^2 dt \approx 0{,}054\ R \text{ [Ws]}\ .$$

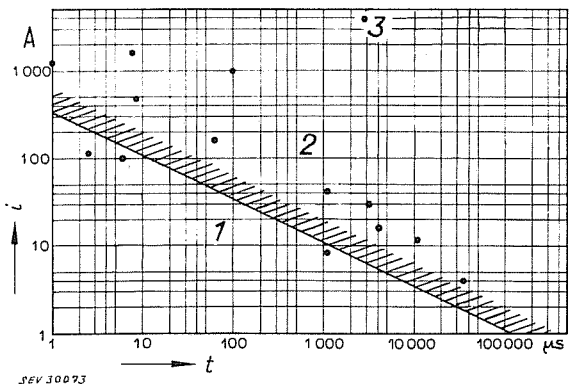

Fig. 2

Grenzen der für Menschen gefährlichen Stoßströme *i* über ihrer Dauer *t*

(nach Dalziel)

1 ungefährlicher Bereich; *2* Gefahrbereich; *3* nicht tödliche Unfälle

Für einen aperiodischen Stoßstrom wird $\int i^2 dt = 0{,}5\ I^2 T$, sofern I der Scheitelwert des Stoßstromes und T dessen Zeitkonstante sind.

In diesem Fall kann für die kritische Energie geschrieben werden

$$R\ I^2\ T = 0{,}108\ R \text{ [Ws]}$$

[1]) *Dalziel, Ch. F.*, Univ. Berkeley, Paper 53—313. Vancouver B. C., Canada: AIEE Safety Comittees Sept. 1...4, 1953.

Tabelle I gibt die auf Grund der Untersuchungen von *Dalziel* heute als höchstzulässig zu betrachtenden Körperströme bzw. Energien an für die beiden Fälle von 50-Hz-Wechselstrom und von Stoßströmen kurzer Dauer (50 μs).

Höchstzulässige Körperströme bzw. -Energien

Tabelle I

Dauer des Körperstroms (Hand—Fuss)	5 s	50 μs [Zeitkonstante T]
Körperwiderstand R	1000 Ω	500 Ω
Kritischer Impuls $\int i^2 dt$	0,027 A^2s	0,054 A^2s bezw. 0,108 I^2T
Kritische Energie	27 Ws	27 Ws
Kritischer Strom I	70 mA (Fig. 1)	60 A (Fig. 2)

Es ergibt sich daraus, dass die bezüglich Herzflimmern gefährlichen Ströme je nach ihrer Dauer in weiten Grenzen, d. h. zwischen etwa 50 mA und 50 A variieren. Die grossen Stoßströme bewirken in der Regel eine sehr starke Schockwirkung und zum Teil vorübergehende Lähmungen, ohne dass es aber zum gefürchteten Herzflimmern kommt.

Nach dieser kurzen Betrachtung der gefährlichen Grenzwerte sollen nun *die in einer Hochspannungsanlage möglichen Berührungsspannungen untersucht werden.*

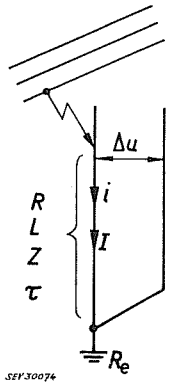

Fig. 3

Spannungsdifferenz Δu beim fehlerhaften Stromübertritt an die Erdung R_e

$\Delta u = iR$ bei Gleichstrom; $\Delta U = I(R + j\omega L)$ bei Wechselstrom; $\Delta u_{xt} = iZ_w$ (während 2 τ) bei Stoss

R, L, Z_w Widerstand, Induktivität und Wellenwiderstand der Erdleitung; τ Laufzeit der Welle; R_e Erdungswiderstand

Irgendwo in der Anlage soll ein Isolationsdefekt passieren, durch den auf die Eisenkonstruktion oder die Armierungseisen des Gebäudes ein Strom übertritt (Fig. 3). Stationär wird dies ein Gleichstrom oder Wechselstrom I sein, vorübergehend ein Ausgleichsstrom, z. B. ein Stoßstrom i. Zwischen zwei Punkten der an der Erdungsstelle verbundenen Erdleitungen besteht eine Spannungsdifferenz, die sich im Gleichstromfall aus dem Ohmschen Widerstand, im Wechselstromfall aus der Impedanz $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, im Fall von Stoßströmen infolge des plötzlichen Überschlags aus dem Wellenwiderstand Z_W der Erdleitung und dem Fehlerstrom errechnet. Da Z_W Werte einiger 100 Ω hat, ist die kurzzeitige Stoßspannung ganz wesentlich grösser als die stationären Werte unter Gleich- oder Wechselstrom.

Was die Höhe der Stoßspannungswelle betrifft, die beim Überschlag in der unverzweigten Erdleitung entsteht, so ist diese bei gleichen Wellenwiderständen der Hochspannung und der Erdleitung rund die Hälfte der momentanen Hochspannung! Das ist ein sehr hoher Wert, der gefährlich aussieht. Dabei ist aber zu bedenken, dass die Dauer dieser Spannung sehr kurz ist. Sie besteht nämlich nur während der doppelten Laufzeit 2 τ auf der Erdleitung bis zur «Erde» und zurück. Für 10 m Erdleitung beträgt diese Zeit $^1/_{30}$ μs = 33 ns. Diese Zeit entspricht etwa der kürzesten Dauer des Zusammenbruchs der Spannung im Funken bei Luftdruck im homogenen Feld (Kugelfunkenstrecke). Im inhomogenen Feld dauert der Zusammenbruch länger, so dass die Spannungsfront auf 10 m Leiterlänge gar nicht Platz hat. Die Höhe der Stoßspannung wird dadurch stark abhängig von der Länge der unverzweigten Erdleitung. Sobald diese sich verzweigt, teilt sich der Wellenstrom und die Wellenspannung sinkt. Dies heisst praktisch: Lange unverzweigte Erdleitungen sind schlecht; auf ihnen sind hohe Spannungen möglich. Die *Vermaschung der Erdleitungen* bringt doppelten Vorteil: Die Stoßspannung wird sowohl in der Höhe wie auch in der Dauer der hohen Spitzen reduziert. Fig. 4 soll die Wirkung dieser Vermaschung von Erdleitungen andeuten.

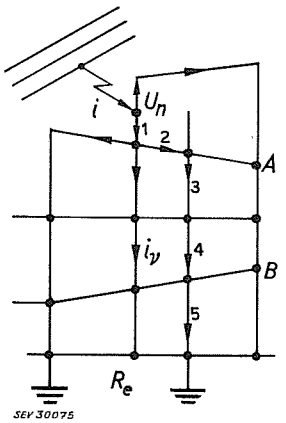

Fig. 4

Stromwege über vermaschte Erdleitungen

U_n Spannung des Fehlerortes gegenüber der Erdung R_e; U_{AB} Spannungsdifferenz zwischen den Punkten A und B; i_ν Strom der ν. Teilstrecke; R_e Erdungswiderstand; R_ν, L_ν und Z_ν wie in Fig. 3, aber für die ν. Teilstrecke; τ_ν Laufzeit über die ν. Teilstrecke

$$U_n = \sum_1^n I_\nu (R_\nu + j\omega L_\nu);$$

$$\Delta U_{AB} = \sum_A^B I_\nu (R_\nu + j\omega L_\nu);$$

$$u_\nu = i_\nu Z_\nu \ldots (2\tau_\nu);$$

$$i_\nu \ll i$$

In Anbetracht dessen, dass eine Einspeisung aus einem Isolationsdefekt des Hochspannungsnetzes irgendwo erfolgen kann, soll die Schutzerdung die Form eines möglichst ausgedehnten, verzweigten Netzes haben. Die Spannungsdifferenz bzw. Berührungsspannung zwischen den Punkten A und B wird hier nicht nur stossmässig viel kleiner, sondern ist auch beim nachfliessenden Wechselstrom infolge der Stromverteilung kleiner.

Theoretisch interessierte Leser können sich den Grenzfall unendlich vieler Leitungen ausmalen: Dies ist ein Blechkäfig, über den der Strom aus einem Isolationsdefekt abfliesst, ohne dass inwendig ein Magnetfeld entsteht; auf diesen Fall des sog. Faradaykäfigs soll noch eingetreten werden. Eine hohe Schutzwirkung ist somit nur zu erreichen durch enge Vermaschung aller Schutzerdleitungen und Verbindung zu den Erdelektroden nicht nur an *einer* Stelle, sondern an vielen solchen. Das heisst praktisch die Verwendung von Ringerdungen oder Banderdungen, *nicht* aber von Plattenerdungen.

Im folgenden sollen nun die *dauernd oder vorübergehend stromführenden Betriebserdungen* behandelt werden.

Ein dauernder Strom über eine Erdung bewirkt einen Spannungsabfall über die Betriebserdleitungen. Wird z. B. der *Nullpunkt eines Transformators* an eine separate Betriebserdung *BE* geführt (Fig. 5), so wird dort im Erdschlussfall der Hochspannungsleitung ein Kurzschlußstrom I_{cc} fliessen, der diese Erdung auf

Spannung $I_{cc} R_{BE}$ bringt. Man muss somit hier dafür sorgen, dass kein Lebewesen beide Erdungen zugleich berühren kann, und dass der Spannungstrichter der Betriebserdung nicht gefährlich gross wird. Dies geschieht z. B. in französischen und italienischen Anlagen dadurch, dass die Betriebserdung des Nullpunktes in einen tiefen Schacht gelegt wird, in dessen Achse die Zuleitung bis zum Transformator-Nullpunkt isoliert verlegt ist.

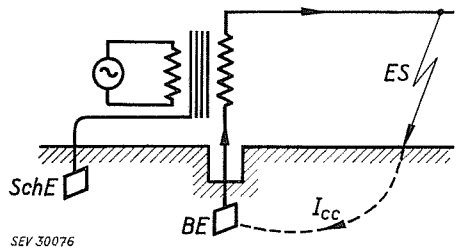

Fig. 5

Getrennte Betriebserdung *BE* **(bis 1943) und Schutzerdung** *SchE*

I_{cc} Kurzschlußstrom infolge des Erdschlusses *ES*

Die zweite Möglichkeit besteht darin, diese Nullpunkterdung mit der vermaschten Schutzerdung zu verbinden, das heisst, nur eine einzige Hochspannungserdung zu benützen. Fig. 6 zeigt, dass damit die Gefährdung, die durch zwei getrennte Erdungen geschaffen wird, vermieden ist. Beim Erdschluss auf der Hochspannungsleitung kommt jetzt die gesamte Erdung auf eine Spannung, die allerdings infolge der zusammengelegten Erdungen kleiner bleibt als bei getrennter Betriebserdung.

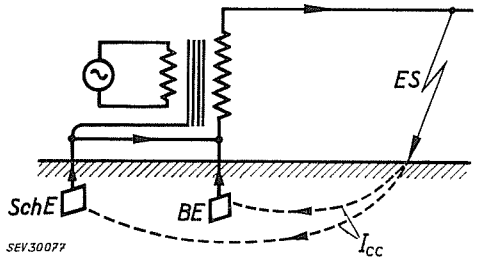

Fig. 6

Verbundene Betriebserdung *BE* **und Schutzerdung** *SchE*

I_{cc} Kurzschlußstrom infolge des Erdschlusses *ES*

Ein wesentlicher Unterschied besteht im Fall eines Erdschlusses in der Anlage selber. Bei verbundenen Erdungen fliesst hier der aus den Generatoren der Anlage gelieferte Kurzschlußstrom gar nicht über die Erdung, sondern kann sich metallisch schliessen. Im Fall getrennter Erdungen würden hier maximale Spannungsdifferenzen zwischen beiden Erdungen entstehen, mit maximalen Schrittspannungen in der Freiluftanlage. Eine weitere Komplikation bei getrennter Nullpunkterdung liegt auch darin, dass Stromwandler für die Messung des Nullpunktstromes für die volle Erdungsspannung der Betriebserdung isoliert sein müssten, da deren Gehäuse an der Schutzerdung liegen muss. Ebenso muss die Isolation abgestufter Transformatorisolationen dem Spannungsabfall an der getrennten Betriebserdung Rechnung tragen.

Betrachtet man statt der Nullpunkterdung die *Erdung von Ableitern*, so kann festgestellt werden, dass bereits seit 1943 hier die Notwendigkeit durchgedrungen ist, die Erdklemmen möglichst kurz mit dem Schutzerdungsnetz zu verbinden. Nur dadurch lässt sich die Schutzwirkung des Ableiters voll ausnützen. Der Ableiter hat damit grundsätzlich das Prinzip getrennter Betriebs- und Schutzerdungen durchbrochen; er gehört sowohl zur Schutzerdung wie auch zur Betriebserdung.

Auch bei den *Spannungswandlern* ist es ganz belanglos, die kleinen Ströme der Hochspannungswicklung in der Grössenordnung von einigen mA an die Schutzerdung zu führen; ein Grund für eine getrennte «Betriebserdung» besteht hier nicht. Das gleiche gilt für die *Erdung der HF-Quellen* der leitungsgerichteten Telefonie.

Sowohl die Betriebserfahrungen der letzten Jahrzehnte wie auch die theoretischen Überlegungen zeigen, dass es nach Abwägen aller Vorteile und Nachteile richtig ist, nur *eine einzige Hochspannungserdung* zu benützen und diese keineswegs in Schutzerdung und Betriebserdung aufzutrennen. Vor allem werden alle Isolationsprobleme dadurch einfacher und übersichtlicher, ganz abgesehen davon, dass eine Trennung von Erdungen praktisch oft sehr schwierig ist, so dass diese Trennung in der Regel nur auf dem Papier, nicht aber in der Praxis besteht.

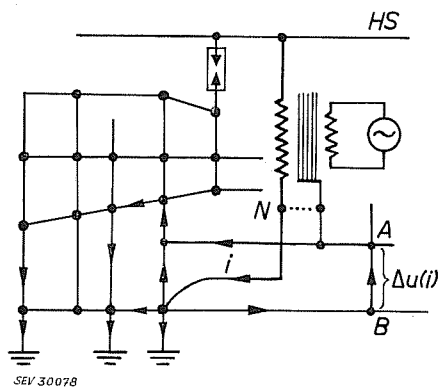

Fig. 7

Entstehung der Störspannung $\Delta u(i)$ **zwischen den Punkten** *A* **und** *B* **infolge der Betriebserdung des Transformator-Nullpunktes** *N*

HS Hochspannungsleitung; *i* Nullpunktstrom

Auf einen grundsätzlichen Mangel der zusammengelegten Erdungen soll hier besonders hingewiesen werden, der dann entsteht, wenn ein *dauernder Erdstrom* vorhanden ist. Fig. 7 zeigt, dass in diesem Fall zwischen zwei beliebigen Punkten *A* und *B* des Erdungsnetzes eine dauernde Spannungsdifferenz besteht, die ungefährlich ist, die aber Niederspannungskreise stören kann. Werden z. B. die Sekundärkreise von Spannungs- und Stromwandlern sowohl am Wandler wie auch an den Messinstrumenten oder Relais geerdet, so kann die Spannungsdifferenz ΔU der dauernden Erdströme die Messung von Spannung und Strom stören. Ähnlich ist es, wenn Verstärker an verschiedenen Punkten des Erdungsnetzes geerdet werden. Die Spannungsdifferenz ΔU kann sich dann als «Brumm» äussern. Spannungsempfindliche Niederspannungskreise sind daher nur in *einem* Punkt zu erden. Diese Regel gilt bekanntlich auch in Niederspannungsnetzen mit stromführendem Nulleiter. Es kann von Vorteil sein, den dauernden Erdstrom dort in das vermaschte Erdungsnetz einzuführen, wo er die kleinste Störspannung liefert. Im allgemeinen wird dieser Punkt in der Nähe der Erdungen liegen, so dass die Betriebs-

Erdleitung bis dort isoliert zu verlegen ist, falls «Brumm»-Schwierigkeiten auftreten.

Während es somit vorteilhaft scheint, an Stelle von «Schutzerdung» und «Betriebserdung» nur von einer einheitlichen Erdung der Hochspannungsanlage zu sprechen, die z. B. als «*Hochspannungserdung*» zu bezeichnen wäre, mag es in gewissen Fällen zweckmässig sein, «*Schutzerdleitungen*» von «*Betriebserdleitungen*» zu unterscheiden. Auch wenn mehrere verschiedene Hochspannungssysteme in derselben Anlage vorhanden sind, ist eine einzige Hochspannungserdung zweckmässig. Denn es handelt sich ja stets um den Personenschutz gegen Berührungsspannungen, der auf diese Weise am sichersten erreicht wird. Im speziellen Fall von Hochspannungsanlagen mit 50-Hz- und 16⅔-Hz-Systemen kann unterschieden werden zwischen Anlagen mit Bahnanschluss in der Anlage selber, oder dann mit Speisung lediglich weit entfernter Geleise. Im ersten Fall ist der Anschluss der Geleise an die Hochspannungserdung unumgänglich. Im zweiten Fall ist die Polerdung am weitab liegenden Geleise unumgänglich, die zusätzliche Verbindung zur Kraftwerkerdung muss von Fall zu Fall erwogen werden.

Nachdem der Fall grosser Hochspannungsanlagen für Freiluft und Innenraum besprochen wurde, soll anschliessend der Fall der Transformatorstation für Verbraucherspannung betrachtet werden.

Die bisherige Verordnung sieht vor, die Verbraucher von Niederspannungsenergie dadurch gegen Überspannungen des Hochspannungsnetzes zu schützen, dass der Niederspannungskreis gegen die Hochspannungserdung für mindestens 4 kV Prüfspannung isoliert wird. Diese Regelung gilt, sofern sich die Verbraucher ausserhalb des Hochspannungskomplexes befinden. Die Begründung der Spannung von 4 kV liegt darin, dass die Hochspannungserdung bei einem Doppelerdschluss des Hochspannungsnetzes auf eine Spannung kommen kann, die sich der Betriebsspannung nähert. Voraussetzung ist, dass der eine Erdschluss in der Station selber passiert. Die Spannung an der Erdung ist umso höher, je höher der Erdungswiderstand der Station im Vergleich zum Erdungswiderstand der zweiten Erdschlußstelle ist. Fig. 8 zeigt den Fall des heute üblichen 16-kV-Netzes.

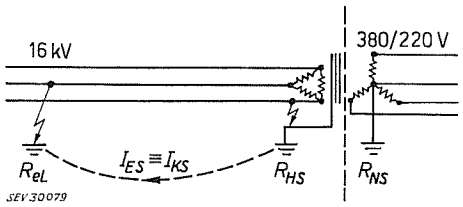

Fig. 8

Beanspruchende Spannung der Niederspannungsinstallation einer Transformatorstation bei einem Doppelerdschluss in der Hochspannung 16 kV

R_{eL} Erdungswiderstand beim Leitungserdschluss; R_{HS} Erdungswiderstand beim Stationserdschluss; R_{NS} Erdungswiderstand der Niederspannungserdung; $I_{ES} = I_{KS}$ Doppelerdschlußstrom; U_{eL} Spannung an der Leitungserdung; U_{HS} Spannung an der Hochspannungserdung; ΔU_L Spannungsabfall der Leitung zwischen beiden Erdschlußstellen

$$U_{eL} + U_{HS} = 16 \text{ kV} - \Delta U_L \qquad U_{HS} \simeq 10 \text{ kV}$$

In einem leistungsfähigen Netz teilt sich die verkettete Speisespannung auf beide Erdungswiderstände und auf das dazwischenliegende Stück Leitung auf. Für eine Gebirgsstation kann der Erdungswiderstand R_{HS} der Station merklich höher sein als der Erdwiderstand R_{eL} der zweiten Fehlerstelle. Bei grosser Distanz beider Erdschlußstellen zählt dagegen die Leitungsreaktanz, die mindestens etwa 0,5 Ω/km beträgt. Es dürfte daher im allgemeinen genügen, das Niederspannungsnetz gegen die Hochspannungserdung auf etwa 10 kV Prüfspannung zu isolieren. Diese Erhöhung entspricht ungefähr der Erhöhung der Verteilspannungen, die früher 6...8 kV betrugen und heute kaum mehr unter 16 kV liegen. Es bleibt noch zu erwähnen, dass die Prüfspannung von 10 kV nur beschränkte Gewähr gegen den Übertritt der Hochspannung zur Niederspannung bietet, nämlich nur im Fall eines Isolationsdefekts der Hochspannung ohne Überspannung. Sobald jedoch Überspannungen zu einem Überschlag der Hochspannungsisolation oder zu einem Ansprechen der Hochspannungsableiter führen, so hängt es vom Spannungsabfall des Stossstroms an der Hochspannungserdung ab, ob ein Überschlag von der Hochspannungserdung zur Niederspannung folgt. Mit 10 Ω Widerstand der Hochspannungserdung führen 1500 A Stoßstrom zu einer Stossspannung von 15 kV, was ungefähr der Prüfspannung mit 10 kV Wechselspannung entspricht. Bei grösseren Stoßströmen in der 10 Ω-Hochspannungserdung wird die Niederspannungsanlage nicht mehr verschont.

Diese Forderung von 10 kV Prüfspannung bedeutet für die innere Isolation der Verbrauchertransformatoren kaum eine Mehranforderung, da Ölisolationen dieser Anforderung ohne weiteres gewachsen sein dürften. Dagegen ist die gesamte Luftisolation der Niederspannungsanlage von der Hochspannungserdung für diese Spannung zu isolieren, was bereits Kriechwege einiger cm bedingt, womit die Trennung auch deutlich sichtbar wird. Es ist zu erwarten, dass sich die Praxis, die Niederspannungsanlage in Ortstransformatorstationen auf Isolierplatten zu montieren, weiter durchsetzen wird.

Nach der bisherigen Verordnung wird die Erdung der Niederspannung als «Sondererdung» bezeichnet, um die Trennung von der Hochspannungserdung zum Ausdruck zu bringen. Inhaltlich wäre sie im Gegensatz zur Hochspannungserdung z. B. auch als «*Niederspannungserdung*» zu bezeichnen.

Da mit der Zeit die Kabelzuführungen zu Stationen zu steigender Bedeutung kommen werden, sollen im folgenden einige Probleme der Erdung solcher Kabel betrachtet werden; wobei es sich um Hochspannungs- und auch um Niederspannungskabel handeln kann. Das Erdungsproblem der Kabel wird kompliziert durch die Erscheinung der elektrolytischen Korrosion der Kabelmäntel, sei es durch Elementbildung oder durch betriebsfremde Gleichströme (Bahn- und Tramströme). Diese Schäden, die sich in der Regel erst nach vielen Betriebsjahren zeigen, haben dazu geführt, dass die metallischen Kabelmäntel heute oft mit einem 2...3 mm starken Isoliermantel aus Polyvinylchlorid (PVC) oder aus Polyätylen überzogen werden. Diesem Korrosionsschutz wurde bisher die Wirkung der Metallmäntel als Erdung leider geopfert, und es werden zugleich Spannungen aus Anlagen auf wesentlich grössere Distanzen verschleppt als dies bei blankem Metallmantel der Fall wäre. In anderen Fällen handelt es sich darum, dauernde Sekundärströme auf Bleimänteln von Einleiter-Hochspannungskabeln zu verhindern. Die nachstehenden Ausführungen beschränken sich auf einige grundsätzliche Beispiele.

1. *Wie hoch werden die Leiterspannungen eines Kabels, dessen Metallmantel an die Hochspannungserdung geerdet ist?*

Fig. 9 zeigt den *stationären Zustand*, bei dem die Leiter im Kabel gegen dessen Mantel und dann auf der Freileitung gegen Erde lediglich durch ihre Kapazitäten fixiert sind. Die Erdungsspannung des Kabelmantels teilt sich entsprechend auf.

$$\frac{U_K}{U_K+U_F} = \frac{C_F}{C_K+C_F}$$

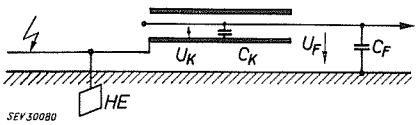

Fig. 9

Stationäre Spannung einer freien Kabelader mit Freileitungsfortsetzung

HE Hochspannungserdung; C_K Kabelader-Kapazität; C_F Freileitungsdraht-Kapazität; U_K Spannung der Ader gegen Mantel; U_F Spannung der Ader gegen Erde an der Freileitung

$$\frac{U_K}{U_K + U_F} = \frac{C_F}{C_K + C_F}$$

Es ist

$$U_F = U_e \frac{C_K}{C_F + C_K}$$

U_e Erdungsspannung am Kabelmantel
U_F Spannung der Freileitung gegen Erde
C_K Kabelkapazität
C_F Freileitungskapazität

Bei einer langen oder ausgedehnten Freileitung liegt die Erdungsspannung praktisch an der Kabelisolation, bei einer kurzen Freileitung dagegen liegt sie an der Freileitungsisolation.

$$u_P = 2u_V \frac{Z_F}{Z_M+Z_K+Z_F}$$

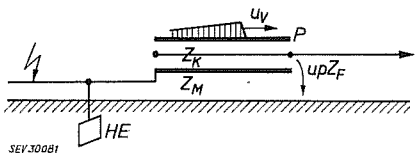

Fig. 10

Eindringen einer Welle aus dem Kabel in die Freileitung infolge der plötzlichen Spannungserhöhung der Hochspannungserdung *HE*

P Übergang vom Kabel zur Freileitung; Z_K Wellenwiderstand des Kabels (Ader—Mantel); Z_M Wellenwiderstand des Mantels (Mantel—Erde); Z_F Wellenwiderstand der Freileitung; u Spannung der vorlaufenden Welle; u_P Spannung im Punkt *P*

$$u_P = 2u_V \frac{Z_F}{Z_M + Z_K + Z_F}$$

Fig. 10 soll das *Eindringen einer steilen Wanderwelle* aus der Anlagenerdung zum Kabel darstellen. Es lässt sich leicht berechnen, dass die Spannung der Freileitung am Übergangspunkt vom Kabel zur Freileitung sich bestimmt aus:

$$u_P = 2\, u_V \frac{Z_F}{Z_F + Z_K + Z_M}$$

u_V Höhe der vorlaufenden Welle
Z_F Wellenwiderstand der Freileitung ($\approx$ 500 Ω)
Z_K Wellenwiderstand des Kabels (30...50 Ω)
Z_M Wellenwiderstand des Kabelmantels gegen Erde ($\approx$ 400 Ω)

Wellenmässig liegt somit praktisch die volle Erdungsspannung an der Freileitung.

2. *Wieviel trägt ein blanker Kabelmantel beliebiger Länge zur Verbesserung des Erdungswiderstandes einer Anlage bei?*

Fig. 11 zeigt den grundsätzlichen Verlauf des im Kabelmantel fliessenden Längsstromes. Für ein sehr langes Kabel ($l \to \infty$) lässt sich dieser Verlauf als Exponentialfunktion $e^{-\beta x}$ darstellen. In genau gleicher Weise ändert sich auch die Spannung des Kabelmantels

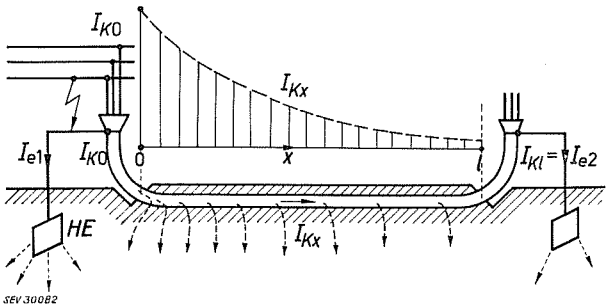

Fig. 11

Strom- und Spannungsverlauf eines nackten, an die Hochspannungserdung *HE* geerdeten Kabelmantels im Erdboden

I_e: Strom in der Hochspannungserdung *HE*; I_{K0} Kabelmantelstrom am Anfang $x = 0$; I_{Kx} Kabelmantelstrom an der Stelle x; I_{Kl} Kabelmantelstrom am Ende $x = l$

gegenüber Erde. $X = 1/\beta$ stellt die Strecke dar, auf der der Strom auf $1/e = 37\%$ abklingt. Aus den allgemeinen Leitungsgleichungen ergibt sich die Grösse von β. β erhält einen sehr einfachen Wert unter der Voraussetzung, dass

a) der Längswiderstand des Kabelmantels klein sei gegenüber der Reaktanz ωL des Mantels bei Betriebsfrequenz,
b) die kapazitiven Ströme nach Erde gegenüber den Ohmschen Strömen zu vernachlässigen sind.

Es wird dann

$$X = \frac{1}{\beta} = \sqrt{2}\,\sqrt{\frac{R_e'}{\omega L'}}\ \text{(km)}$$

R_e' Ableitwiderstand des Mantels für 1 km (Ω · km)
$\omega L'$ Reaktanz des Mantels pro km (Ω/km)

Dabei rechnet man den Ableitwiderstand eines runden Stabes von Länge l und dem Durchmesser d aus der Gleichung aus:

$$R_e = \frac{\varrho}{2\,\pi\, l} \cdot \ln \frac{l}{d/2}$$

Mit $\varrho = 100$ Ωm (Tiefland); $d = 4$ cm; $l = 1000$ m wird

$$R_e' \approx \frac{100}{2000\,\pi} \cdot 2{,}3 \cdot \log \frac{1000}{0{,}02} \approx 0{,}17\ \Omega\,\text{km}$$

somit wird

$$\frac{1}{\beta} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{0{,}17\,/\,0{,}5} = 0{,}825\ \text{km}$$

Mit $\varrho = 10\,000$ Ωm (Urgestein); $d = 4$ cm; $l = 1000$ m wird

$$R_e' = \frac{10^4}{2000\,\pi} \ln \frac{1000}{0{,}02} \approx 17\ \Omega\,\text{km}$$

und

$$\frac{1}{\beta} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{17\,/\,0{,}5} = 8{,}25\ \text{km}$$

Es ist ersichtlich, dass ein blanker Kabelmantel, ein Stollengeleise oder eine Druckleitung, sofern ihr Längs-

widerstand kleiner ist als ihre Reaktanz, die Erdung einer Anlage ganz wesentlich verbessern kann. Im Tiefland nützt vor allem der erste km des Kabels, im Hochgebirge die ersten 10 km. Dabei hat es keinen Sinn, den Längswiderstand des Mantels bzw. eines Geleises oder Erdungsbandes viel tiefer zu halten als seine Reaktanz ωL.

3. *Was passiert beim Eindringen einer Wanderwelle in ein Kabel, dessen Mantel nur am entfernten Ende geerdet ist?*

Es handle sich z. B. um ein Einleiterkabel für 220 kV, das zu einer Drehstromleitung gehört. Dieser Fall bildet die Regel bei Kavernen-Kraftwerken mit Freiluftanlagen für die Leitungen. Es ist naheliegend, solche Einleiterkabel an beiden Enden an die Hochspannungs-Erdung zu legen. In der Schleife zwischen je zwei Kabeln besteht dann ein Magnetfeld, das mit Betriebsfrequenz pulsiert und daher auf den Bleimänteln einen Strom induziert. Die dadurch zusätzlich geheizten Bleimäntel vermindern die zulässige Kabelbelastung, wenn die Leitfähigkeit des Mantels nicht durch einen zusätzlichen Belag aus Cu oder Bronze verbessert wird. Die Praxis ist dieser Schwierigkeit ausgewichen, indem man diese Leitungskabel nur an einem Ende erdet, nämlich an den Transformatoren, mit denen der Kabelendverschluss in der Regel kombiniert ist. So entsteht die Anordnung der Fig. 12.

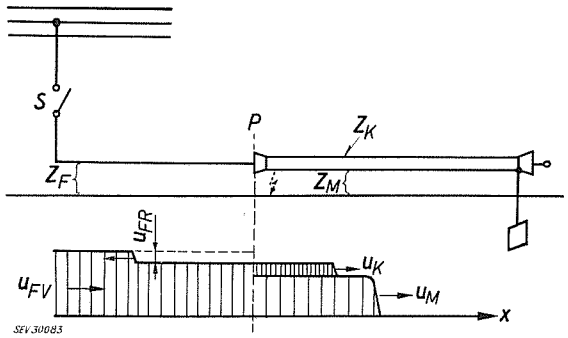

Fig. 12

Eindringen einer Spannungswelle aus der Freileitung F in ein im Übergang P nicht geerdetes Kabel

Z_F Wellenwiderstand der Freileitung; Z_K Wellenwiderstand des Kabels (Ader—Mantel); Z_M Wellenwiderstand des Kabelmantels gegen Erde; u_{FV} vorlaufende Welle der Freileitung; u_{FR} rückläufige Welle der Freileitung; u_K vorlaufende Welle im Kabel; u_M vorlaufende Welle Kabelmantel—Erde

Eine aus der Freileitung F zulaufende Wanderwelle dringt beim Schliessen des Schalters S in das Kabel ein. Da der Anfang P des Mantels nicht geerdet ist, muss dort der Mantelstrom gleich Null bleiben. Dies ist nur dadurch möglich, dass der Mantel auf Spannung kommt, derart, dass der Vorwärtsstrom der Mantelwelle gleich dem Rückstrom der Kabelwelle (Welle im Kabelinnern) wird. Die Spannung im Übergangspunkt P teilt sich daher entsprechend den Wellenwiderständen des Kabels und des Kabelmantels gegen Erde auf.

Aus den entsprechenden Gleichungen folgt für die Spannung in P:

$$U_P = 2\, U_V \cdot \frac{Z_K + Z_M}{Z_K + Z_M + Z_F}$$

U_V Höhe der vorlaufenden Welle auf der Freileitung
Z_F Wellenwiderstand der Freileitung
Z_K Wellenwiderstand des Kabels
Z_M Wellenwiderstand des Kabelmantels gegen Erde

Da Z_M nur wenig kleiner ist als Z_F, wird sich der Kabelmantel auf annähernd die volle Spannung der Vorwärtswelle aufladen.

Wie die Erfahrung zeigt, treten beim Auftreffen steiler Wellen, z. B. infolge von Schaltvorgängen, Überschläge vom freien Kabelmantel nach Erde auf. Diese können durch Niederspannungsableiter verhindert werden. Falls Kabelstromwandler am nicht geerdeten Kabelende vorhanden sind, muss die Erdleitung dieser Ableiter durch diesen Wandler hindurchgeführt werden, damit im Fall des defekten Ableiters der Kabelleiterstrom doch richtig gemessen wird.

Schliesslich soll die Wirkung dickwandiger oder eisenarmierter, blanker Kabelmäntel betrachtet werden, die mindestens an einem Ende an die Hochspannungserdung geerdet werden.

Hieher gehört der Fall eines langen Schwachstromkabels, dessen Metallmantel an die Hochspannungserdung geerdet ist, so dass er nach Fig. 11 eine zusätzliche Erdung der Anlage bildet.

Wie gross ist die im Kabelinnern, d. h. zwischen einer Kabelader und dem Mantel gemessene Spannung, sofern die Ader am anderen Ende mit dem Mantel verbunden ist? Diese Spannung wird in der Nachrichtentechnik als *Längsspannung des Kabels* bezeichnet.

Um diese Frage zu beantworten, kann man zwei Gedankenexperimente, von denen jedes für sich zum Ziel führt, durchführen:

Im ersten Experiment soll die Tatsache vorausgesetzt sein, dass in dicken Leitern Stromverdrängung auftritt. Dieser sog. Haut- oder Skineffekt ist um so mehr ausgeprägt, je höher die Frequenz des Wechselstromes und je kleiner der spezifische Mantelwiderstand ist. In Fig. 13 ist ein Kabelmantel übertrieben dick dargestellt worden. Wird diesem dicken Mantel ein

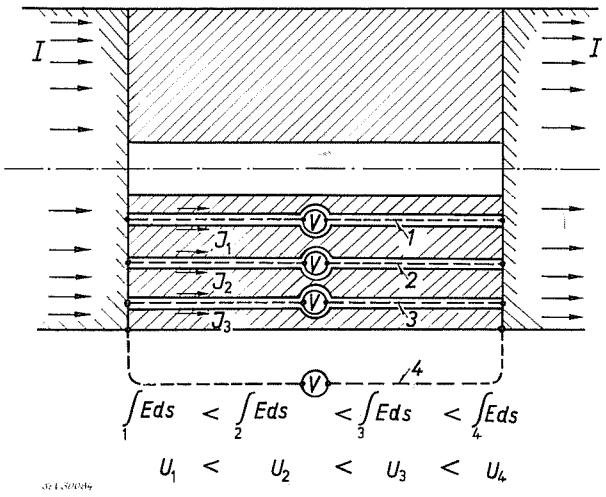

Fig. 13

Spannung U an verschiedenen Achsenabständen in einem dickwandigen Kabelmantel, der von einem hochfrequenten Wechselstrom I durchflossen ist

V Voltmeter; 1, 2, 3 kleiner, mittlerer, grosser Radius; J Stromdichte; E Feldstärke = ϱJ

Wechselstrom zugeführt, so verteilt er sich ungleich im Querschnitt, und zwar ist aussen die grösste Stromdichte J_3, an der Innenhaut des Mantels die kleinste Stromdichte J_1 vorhanden. Würde man drei sehr feine Löcher längs des Mantels bohren und darin mit einem hochohmigen Voltmeter die Spannung zwischen beiden

Endflächen messen, so würde das innerste Voltmeter die kleinste Spannung

$$U_1 = \int E_1 \mathrm{d}s = \varrho \int J_1 \mathrm{d}s$$

messen, das äusserste Voltmeter die grösste Spannung $U_3 = \int E_3 \mathrm{d}s = \varrho \int J_3 \mathrm{d}s$, wobei E die elektrische Feldstärke und ϱ den spezifischen Widerstand des Mantelmaterials bedeutet.

Wie stark J_1 und J_3 verschieden sind, hängt von der Frequenz f des Wechselstromes und vom spezifischen Widerstand ϱ ab. In einer ebenen Platte sinkt die Stromdichte J im Leiterinnern exponentiell ab, so dass man eine «Eindringtiefe» definieren kann, in welcher die Dichte z. B. auf $1/e = 37\%$ des Oberflächenwertes sinkt. Diese Tiefe beträgt für nicht magnetische Leiter

$$X_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10^7 \varrho}{f}}$$

Tabelle II gibt einige Zahlenwerte für Cu und Pb, sowie für den Erdboden im Tiefland.

Eindringtiefe des Stromes X_e für einige nicht magnetische Leiter

Tabelle II

$f =$	50	10^3	10^6	Hz
Kupfer $\left(\varrho = \frac{10^{-6}}{57}\right)$	9,4	2,1	0,067	mm
Blei ($\varrho = 0{,}21 \cdot 10^{-6}$)	34	7,2	0,23	mm
Erdboden ($\varrho = 100\ \Omega$m)	700	160	5	m

Aus Tabelle II ist ersichtlich, dass die Stromverdrängung in Cu- und Pb-Mänteln bei 50 Hz noch keine wesentliche Rolle spielt. Ganz anders ist es bei rasch veränderlichen Vorgängen wie z. B. Stossvorgängen. Bei Frequenzen von 1 MHz wird auch im Bleimantel J_1 gegenüber J_3 verschwindend klein. Das innerste Voltmeter misst dann $U_1 \approx 0$, währenddem U_3 wesentlich grösser ist als im Fall eines gleichmässig im Mantelquerschnitt verteilten Gleichstromes. Dagegen dringen Frequenzen von 1 kHz noch durch den Bleimantel hindurch.

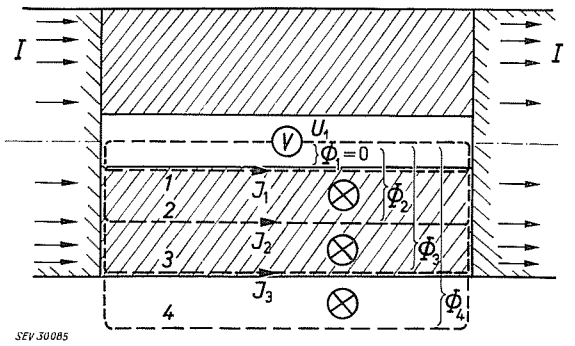

Fig. 14

Schleifenspannungen am Voltmeter V für verschiedene Schleifen *1, 2, 3, 4*

J Stromdichte; E Feldstärke $= \varrho J$; Φ Fluss

Das Voltmeter V misst die Ohmsche Spannung an der Innenhaut des Mantels («Längsspannung» des Kabels)

Statt eine Stromverdrängung oder den Skineffekt vorauszusetzen, kann man direkt vom Induktionsgesetz ausgehen, um diese Wirkungen zu verstehen; dazu diene ein zweites Gedankenexperiment. Nach Fig. 14 sei ein einziges Voltmeter V in das Kabelinnere angelegt; nun fragt es sich, welche Spannung U_1 dort gemessen wird. Bildet man zunächst die Umlaufspannung mit der Innenhaut des Kabelmantels, so ist klar, dass man damit überhaupt keinen magnetischen Fluss umschliesst[2]). Die Spannung am Voltmeter ist somit genau gleich dem Ohmschen Spannungsabfall an der Innenhaut des Mantels. Bildet man eine zweite Schleife in einer Parallelen zur Kabelachse, die sich irgendwo im Mantelquerschnitt befindet, so wird damit bereits ein Teil des Magnetflusses im Mantel umschlossen. Die gemessene Spannung U_1 des Voltmeters entspricht jetzt dem Spannungsabfall längs dieser irgendwo gewählten Parallelen zur Kabelachse minus die vom Magnetfluss in dieser Schleife induzierte Spannung. Es ist:

$$U_1 = U_2 - \frac{\mathrm{d}\Phi_2}{\mathrm{d}t} = U_3 - \frac{\mathrm{d}\Phi_3}{\mathrm{d}t} = \ldots$$

$$= \int E_2 \mathrm{d}s - \frac{\mathrm{d}\Phi_2}{\mathrm{d}t} = \int E_3 \mathrm{d}s - \frac{\mathrm{d}\Phi_3}{\mathrm{d}t} \ldots$$

In dem Mass, wie mehr Fluss umschlossen wird, muss die Ohmsche Spannung $\int E \mathrm{d}s = \varrho \int J\, \mathrm{d}s$ zunehmen. Daraus ergibt sich, dass eine Stromverdrängung nach äussen stattfinden muss.

Im Anschluss an einen früheren Aufsatz über die Wirkung von Kabelmänteln als Überspannungsschutz für das Kabelinnere[3]) ergibt sich, dass bei 50 Hz, wo die Stromverdrängung noch nicht ausgeprägt ist, die Längsspannung im Kabelinnern nicht wesentlich kleiner ist als bei Gleichstrom im Mantel, dass aber bei Stossvorgängen der dicke und gut leitende Kabelmantel das Kabelinnere infolge der Stromverdrängung ausgezeichnet schützt, in dem Sinn, dass die Längsspannung schliesslich verschwindend klein wird. Der Mantel bildet dann einen sog. Faradaykäfig, der hohe Frequenzen vom Innern fernhält.

Es gibt nun eine Möglichkeit, diese Schirmwirkung guter Leiter auch bei 50 Hz zu erhöhen, indem der magnetische Fluss bei gleichem Strom erhöht wird. Dies ist möglich durch Anwendung von Eisen als Mantelmaterial.

Die Eindringtiefe (für das Absinken auf $1/e$) ist dann durch die allgemeinere Formel gegeben:

$$X_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10^7 \varrho}{\mu f}}$$

μ relative Permeabilität

Leider ist μ wegen der Sättigungserscheinungen des Eisens stark stromabhängig, so dass die erhöhte Schirmwirkung vor allem in jenem Strombereich zum Vorschein kommt, wo hohe μ-Werte bestehen[4]). In solchen Fällen kann die Schirmwirkung bereits bei 50 Hz ganz wesentlich sein.

Aus dem Gesagten ergibt sich die praktische Folgerung, dass Niederspannungskabel in Hochspannungsanlagen unbedingt an beiden Enden an die Hochspannungserdung anzuschliessen sind. Der dabei auf dem Mantel fliessende Ausgleichsstrom verhindert insbesondere bei raschen Vorgängen die sonst beträchtlichen Überspannungen in den Niederspannungskreisen.

---

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

[3]) *Berger, K.:* Notwendigkeit und Schutzwert metallischer Mäntel von Sekundärkabeln in Höchstspannungsanlagen und in Hochgebirgsstollen, als Beispiel der Schutzwirkung allgemeiner Faradaykäfige. Bull. SEV Bd. 51(1960), Nr. 11, S. 549...563.

[4]) *Meister, H.:* Blitzschutz an Telephonanlagen. Techn. Mitt. PTT Bd. 36(1958), Nr. 1, S. 13...32.

Praktische Konsequenzen für Erdungen

Aus allen vorstehenden Überlegungen dürften sich grundsätzlich folgende praktischen Konsequenzen ziehen lassen:

1. In einer Hochspannungsanlage mit einem oder mehreren Hochspannungssystemen ist nur *eine einzige, gemeinsame Hochspannungserdung* zu verlegen. An diese sind anzuschliessen:

a) Alle unter sich möglichst eng vermaschten *Schutzerdleitungen* zu den Apparategehäusen, Gestellen, Eisenkonstruktionen, Betonarmierungen, ferner die Wasserleitungen und Kabelmäntel im Bereich der Anlage, die Erdseile der Freileitungen, die Erdklemmen der Überspannungsableiter, das geerdete Wicklungsende von Spannungswandlern, ein Pol der Sekundärwicklung von Strom- und Spannungswandlern, die unteren Enden der Ableitungen des Gebäudeblitzschutzes.

b) Pol- und Nullpunkterdleitungen von Leistungstransformatoren *(Betriebs-Erdleitungen)* in einem passenden Punkt, in der Regel nahe den Erdungen.

Nullpunkte von Niederspannungstransformatoren sind an die Hochspannungserdung anzuschliessen, wenn das gespiesene Niederspannungsnetz nicht über den Bereich der Anlage hinausreicht oder über Isoliertransformatoren versorgt wird.

2. Nullpunkte von *Niederspannungstransformatoren* (Verbrauchertransformatoren), sowie Metallmäntel von *Niederspannungskabeln* zur Speisung von ausserhalb des Hochspannungskomplexes liegenden Ortsnetzen sind an eine getrennte *Niederspannungserdung* zu erden, die sich ausserhalb des Spannungstrichters der Hochspannungserdung befindet.

In diesem Fall ist die gesamte Niederspannungsanlage innert des Hochspannungskomplexes gegen die Hochspannungserdung für eine Prüfspannung von 10 kV zu isolieren und sichtbar zu distanzieren.

Das Gehäuse des Niederspannungstransformators ist gemäss Ziff. 1 an die Hochspannungserdung zu erden. Als Niederspannungserdung sind in erster Linie ausgedehnte städtische und ländliche Wasserleitungsnetze aus Metall zu verwenden.

3. *Schwachstromanlagen*, die über den Bereich einer Hochspannungserdung hinausreichen, sind entweder auf dem ganzen Hochspannungskomplex für eine Prüfspannung von 10 kV zu isolieren und von der Hochspannungserdung zu distanzieren, oder dann durch einen Schutztransformator nach aussen von der Hochspannungserdung abzuriegeln. In diesem Fall ist lediglich die leitungsseitige Wicklung des Schutztransformators und die Zuleitung zum Schutztransformator inklusive allfälliger Kabelmäntel gegen die Hochspannungserdung für eine Prüfspannung von 10 kV zu isolieren.

Gehäuse und Kern des Schutztransformators sind an die Hochspannungserdung zu erden.

Der Anschluss über Schutzübertrager und die Isolation der Kabelmäntel von der Hochspannungserdung kann unterbleiben, wenn nachgewiesen wird, dass die Längsspannung der im Erdboden oder in Zoreskanälen verlegten Kabel für die Isolation der Schwachstromanlagen ungefährlich bleibt.

4. *Metallische Wasserleitungen* (Hydrantenleitungen) auf dem Gebiet der Hochspannungsanlage sind durch eine am Rand der Hochspannungserdung befindliche Isolierstrecke von Orts-Wasserleitungen abzuriegeln, sofern diese sonst gefährliche Spannungen annehmen. Diese Gefahr besteht im allgemeinen im dichten und vermaschten Wasserleitungsnetz grosser Städte nicht. In diesem Fall ist es im allgemeinen zulässig, sowohl die Hochspannungserdung als auch die Niederspannungserdung an das Wasserleitungsnetz anzuschliessen.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. *K. Berger*, Versuchsleiter der FKH, Seefeldstrasse 301, Zürich 8.