Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 71 (1980)

Heft: 4

Artikel: Erdmessungen in ausgedehnten Anlagen

Autor: Schwab, F.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-905226

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: 14.12.2025

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

Solange Erdgas und Erdöl in ausreichenden Mengen irgendwo auf der Welt förderbar sind, ist die marktwirtschaftliche Verdrängung dieser Energie durch die Kohlevergasung und -verflüssigung mit einem privatwirtschaftlich nicht tragbaren Risiko verbunden. Die Entwicklung der Kohlevergasung und -verflüssigung ist auf staatliche Mittel angewiesen. An der Notwendigkeit, solche Techniken zu entwickeln, gibt es jedoch keinen Zweifel. Angesichts der im Vergleich zu Öl und Gas riesigen Kohlevorräte auf der Erde sichert der Besitz der Umwandlungstechniken die Versorgung mit flüssigen und gasförmigen Kohlewasserstoffen auch nach Erschöpfung der Gas- und Ölvorräte. Darüber hinaus schützt uns dieser Besitz schon heute vor unbegrenzter Preis- und Lieferwillkür derjenigen, die über Öl- und Gasreserven verfügen.

Der Entwicklungsaufwand dafür sollte einer Industrienation so selbstverständlich sein wie dem vorsorgenden Familienvater die Prämie für seine Kapitallebensversicherung.

Adresse des Autors
Hans-Dieter Harig, Dr.-Ing., STEAG Aktiengesellschaft, Postfach 7020, D-4300 Essen 1.

Erdungsmessungen in ausgedehnten Anlagen

Von F. Schwab

Es wird unterschieden zwischen Erdungsmessungen in kleineren und mittleren Unterwerken sowie in grossen, ausgedehnten Anlagen. Für letztere wird die Schwebungsmethode unter Zuhilfenahme eines freigeschalteten Generators, der asynchron zur Netzfrequenz läuft, dargelegt. Als Beispiel wird auf die Erdungsmessung beim Kernkraftwerk Gösgen hingewiesen.

Le mesurage du dispositif de mise à terre varie selon qu'il s'agit d'une petite ou moyenne sous-station, ou d'une grande installation. Pour ce dernier cas, l'auteur présente la méthode de battement pratiquée à l'aide d'un générateur indépendant fonctionnant en marche asynchrone par rapport à la fréquence du réseau. L'article donne comme exemple la mesure de mise à terre de la centrale nucléaire de Gösgen.

1. Einleitung

Der Revisionsentwurf «Schutz gegen gefährliche Berührungs- und Schrittspannung» des Abschnittes «A. Erdung» des Kapitels III. Schutzmassnahmen der Verordnung über die Erstellung, den Betrieb und Unterhalt von elektrischen Starkstromanlagen (Starkstromverordnung) [1] schreibt vor, dass für jede Erdungsanlage nach ihrer Erstellung die Berührungs- und Schrittspannungen beim höchstmöglichen einpoligen Erdschlußstrom zu bestimmen und bei jeder Änderung im Netz oder in der Erdungsanlage zu wiederholen sind. Zudem ist jede Erdungsanlage periodisch, Anlage- und Sondererdungen in Abständen von höchstens zehn Jahren, auf ihre Wirksamkeit zu überprüfen.

Die zulässige Einwirkspannung darf während unbegrenzt langer Zeit 50 V nicht übersteigen, hingegen ist sie für kurzzeitige Vorgänge eine Funktion der Einwirkzeit. Da moderne Schutzeinrichtungen in Hochspannungsanlagen eine Fehlerabschaltzeit von weniger als 100 ms garantieren, darf beispielsweise die Einwirkspannung während einer Einwirkzeit von maximal 100 ms einen Wert von maximal 700 V annehmen. Ohne diese Relativierung wäre es kaum mehr möglich, Unterwerke zu betreiben, da zum Teil schon die heutigen und speziell die zukünftigen hohen Kurzschlußströme praktisch unerreichbar niedrige Erdungsimpedanzen bedingen würden, damit die früher grundsätzlich verlangten 50 V maximale Einwirkspannung eingehalten werden können.

Die Messung des Spannungstrichters, d.h. die Erdungsspannung in Funktion des Abstandes von der Anlageerde bis zum Erreichen der Asymtote der Bezugserde, ist nicht mehr vorgeschrieben. Es empfiehlt sich aber trotzdem, den Trichter auszumessen, da er erstens das grundsätzliche Gefährdungspotential bezüglich der Potentialverschleppung und der Berührungs- und Schrittspannungen vor allem im Übergangsbereich zwischen Werkbereich und Bezugserde aufzeigt und zweitens bei der Messung eines Wertes von unter 700 V und dem Vorhandensein schneller elektronischer Schutzrelais sich jede weitere Messung als überflüssig erweist, da keine Berührungs- oder Schrittspannung höher als die totale Trichterspannung sein kann. Im weiteren erlaubt die Trichterspannung die Berechnung der Erdungsimpedanz des Unter- oder Kraftwerkes und damit bei bekanntem spezifischem Widerstand des Erdreiches, der zum Beispiel nach der Wenner-Methode [2] bestimmt werden kann, eine Abschätzung der Zweckmässigkeit der Verlegung des Erdungsnetzes unterhalb der Anlage. Letzteres kann auch durch Modellmessung im elektrolytischen Trog bestimmt werden [3].

2. Erdungsmessungen in kleineren und mittleren Anlagen

Zur Erdungsmessung und zur Bestimmung der Berührungs- und Schrittspannungen wird mit reduzierter Spannung und somit reduziertem Strom ein Erdschluss in der Anlage simuliert, indem entsprechend Fig. 1 eine Spannungsquelle mit der Anlageerde und einer entfernten Bezugserde verbunden wird [4]. In kleineren und mittleren Anlagen, bei denen aufgrund nicht allzugrosser Ausdehnung und nicht zu vieler eingeführter Leitungen darauf geschlossen werden darf, dass die Fremd- und Störspannungen in einem kleinen Rahmen bleiben, kann der in der Anlage zu simulierende Erdschlußstrom über einen synchron zur Netzfrequenz arbeitenden Transformator gespiesen werden. Als Rückschluss wird mit Vorteil die Anlagenerdung eines benachbarten Unterwerkes verwendet, damit die geerdete Stelle innerhalb einer Werksumzäunung liegt, da

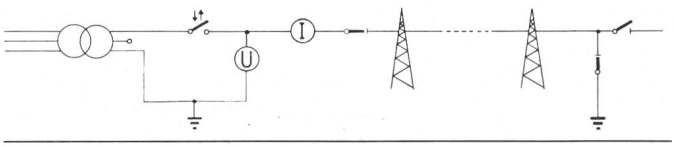

Fig. 1 Erdungsmessung mit intermittierender Speisung

der Meßstrom doch schon eine beträchtliche Berührungsspannung erzeugen kann. Die Distanz zwischen den Unterwerken sollte einige Kilometer betragen, um die gegenseitige Beeinflussung der Spannungstrichter auszuschliessen. Die Verbindung dieser beiden Erdungen erfolgt am einfachsten über eine abgeschaltete Freileitung, wobei man je nach Distanz eine, zwei oder drei Phasen parallel verwendet, damit man auf einen Erdschlußstrom von 100...200 A kommt. Aus diesem simulierten Erdschlußstrom und dem maximal bei einem reellen Erdschluss auftretenden Strom, der durch eine Kurzschlussleistungsbestimmung ermittelt wird, ergibt sich der Faktor, mit dem die zu messenden Berührungs- und Schrittspannungen zu multiplizieren sind. Die Nullimpedanz von Hochspannungsfreileitungen liegt zwischen 0,8 und 1,3 Ω/km, so dass man bei einer unter 10 km langen Leitung auch mit dem 380-V-Eigenbedarfsnetz der Anlage arbeiten kann. Falls 220 V nicht genügen, müssen Transformatoren zwischengeschaltet werden, die unter Verwendung von nur einer oder mehreren Phasen der Leitung wieder den erwünschten Erdschlußstrom ergeben. Zur dauernden Kontrolle der vorhandenen Fremd- und Störspannungen muss der Erdschlußstrom in ca. 20-Sekunden-Intervallen ein- und ausgeschaltet werden. Da die Phasenlage der Fremd- und Störspannungen bei dieser Messart nicht bekannt ist, muss deren Anteil klein sein, da diese Werte, die bei abgeschaltetem Erdschlußstrom erfasst werden, für den Extremfall zur Meßspannung addiert werden müssen, damit man sicher die totale Einwirkspannung erhält.

3. Erdungsmessungen in ausgedehnten Anlagen

In ausgedehnten Anlagen mit mehreren Spannungsebenen liegen die einzelnen Schaltanlagen häufig relativ weit auseinander. Zudem bewirken grosse Anlagen meistens eine allseitige und grosszahlige Leitungszuführung. Dadurch entstehen Störspannungen, die in ausgedehnten Anlagen stark ortsabhängig sind. Erzeugt werden sie durch Wechselströme aus Nulleitern von Niederspannungsanlagen, aus Erdschlußspulen und durch kapazitive Unsymmetrien der Leitungen. Insbesondere, falls noch 16⅔-Hz- oder Gleichstromanlagen das Unterwerkgebiet tangieren, treten hohe Störspannungen auf, deren Spannungsvektor zudem nicht mehr synchron zur speisenden Erdschlussspannung liegt. Diese Stör- und Fremdspannungen dürfen nicht von der Meßspannung abgezogen werden, und deren Addition bringt oft unrealistisch hohe Werte. Gleichströme allein könnten durch einen Kondensator am Eingang des Voltmeters abgeblockt werden, hochfrequente Störspannungen in der Nähe von Sendern durch Shunten des Voltmeters durch einen für 50 Hz sehr hochohmigen Kondensator. Um dem Dilemma einer komplizierten Vektorwinkelmessung auszuweichen, benötigt man einen phasenumschaltbaren Transformator [5], oder man wendet am einfachsten die sogenannte Schwebungsmethode an. Da bei grossen Unterwerken meistens auch ein Kraftwerk in dieses einspeist, benützt man anstelle der synchronen Netzspannung im ersten Fall entsprechend Fig. 2 einen frei geschalteten Generator, der im Separatbetrieb mit einer Frequenz

$$f_M = f_{Netz} \pm \Delta f$$

die Leitung zur Gegenelektrode speist. Anstelle eines Kraftwerkes kann auch eine starke Notstromgruppe verwendet werden. Dank der einzuregelnden kleinen Frequenzdifferenz von etwa 0,5 Hz zwischen der Generator- und der Netzfrequenz rotiert

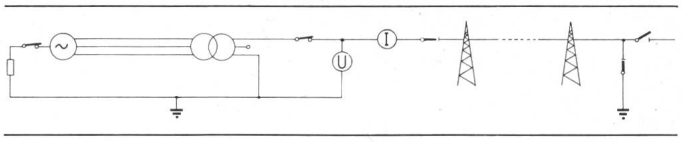

Fig. 2 Erdungsmessung mit der Schwebungsmethode

der Vektor der Meßspannung gegenüber dem Vektor der Störspannung, so dass aus der minimalen und der maximalen Instrumentenablesung sehr einfach auf die störungsfreie Messspannung geschlossen werden kann. Die gesuchte Meßspannung U_M durchläuft alle Phasenlagen gegenüber der Störspannung U_S. Sie addiert sich bei Phasengleichheit und subtrahiert sich bei Opposition. Wie aus Fig. 3 ersichtlich ist, muss man zur Bestimmung der Meßspannung U_M zuerst feststellen, ob sie am Messort grösser oder kleiner als die Störspannung U_S ist.

Für den Fall (a) $U_M > U_S$ ist

$$U_M = \frac{U_{max} + U_{min}}{2}$$

Für den Fall (b) $U_M < U_S$ wird

$$U_M = \frac{U_{max} - U_{min}}{2}$$

wobei U_{max} den Höchst- und U_{min} den Niedrigstwert der Ablesung bedeutet. Im Zweifelsfalle zeigt das Berechnen von U_M nach beiden Formeln, welche der zwei angewendet werden muss. Da die Kontrolle, welche der beiden Spannungen grösser ist, öfters gemacht werden muss, empfiehlt es sich, mit einer Funkverbindung zwischen dem Kommandoraum des Kraftwerkes und dem jeweiligen Messort zu arbeiten. Zur Schonung des Generators, d.h. zu dessen Symmetrierung, kann man in Serie geschaltete Dreieck-Stern-Transformatoren oder falls solche fehlen und soweit vorhanden die Wasserwiderstände, auf die das Kraftwerk bei Lastabwurf geschaltet wird, einsetzen.

Bei Anlagen mit vielen Leitungszuführungen übernehmen die entsprechenden Erdseile mit der Grosszahl von Masterdungen einen wesentlichen Anteil der Anlagenerde. Es empfiehlt sich daher, die auf jedem einzelnen Erdseil wegfliessenden Ströme zu messen, um den Einfluss des eigentlichen Erdungsnetzes von demjenigen der Kettenleitwiderstände der Freileitungen zu trennen.

Die Messung des Gesamtspannungstrichters der Anlage darf nicht parallel zur Richtung der benützten Verbindungs-

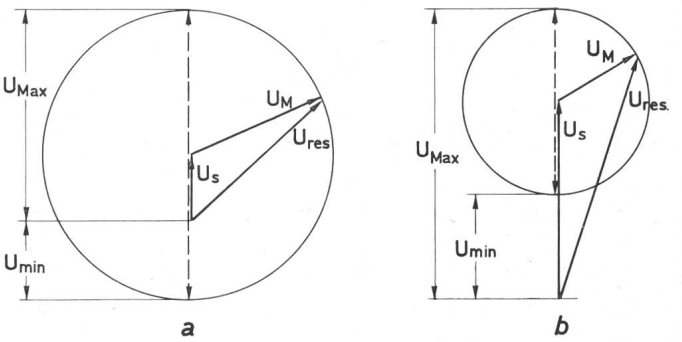

Fig. 3 Vektordiagramme der Schwebungsmethode
U_M Meßspannung
U_S Störspannung

leitung zur Bezugserde erfolgen, damit der Messdraht keiner Induktionsspannung ausgesetzt wird. Sicherheitshalber sollten zwei geographisch unterschiedliche Spannungstrichter ausgemessen werden, wobei bis zur Erreichung der Asymtote mehrere 100 m Messdraht zur Verfügung stehen müssen. In vielen Fällen ist auch die PTT an Spannungsmessungen an ihren Kabeln interessiert, so dass auch von dieser Seite eine Kontrolle des Trichters möglich ist. Die Messung der Trichterspannung parallel zu natürlichen Wasserläufen muss vermieden werden, da deren Längswiderstände von der Grössenordnung Ω/km eine Äquipotentiallinie darstellen und daher die Messung beeinflussen.

Die Berührungsspannung entspricht einer Spannungsdifferenz zwischen einem leitenden Objekt und der in 1 m Abstand in den Boden gesteckten Sonde. Die Schrittspannung ist die Spannungsdifferenz zweier in einem Abstand von 1 m in den Boden gesteckter Sonden. Als Meßsonden dienen 20...40 cm tief in den Boden gesteckte Flachkupfer- oder Rundstahlstäbe. Diese Messungen liegen auf der sicheren Seite, da der Übergangswiderstand zwischen den Schuhen eines Menschen und dem Erdboden bedeutend höher ist als derjenige der 20...40 cm im Boden steckenden Sonden. Die Trichter-, Schritt- und Berührungsspannungen werden mit einem hochohmigen Voltmeter von einigen Megaohm Innenwiderstand gemessen, damit der Einfluss der Übergangswiderstände der Sonden vernachlässigbar klein wird, wobei bei den Schritt- und Berührungsspannungen, wenn deren unbelastete Werte zu hoch erscheinen, mit einer zweiten Messung dem Menschen durch Überbrücken des Voltmeters mit einem 2000-Ω-Widerstand Rechnung getragen wird. Auch dieser Wert liegt auf der sicheren Seite, da der menschliche Durchgangswiderstand vor allem bei feuchten Händen und Füssen wesentlich tiefer liegt.

4. Auszumessende Spannungsdifferenzen, Schritt- und Berührungsspannungen

Theoretisch müssten alle Anlagen punktweise bezüglich der Schritt- und Berührungsspannungen abgetastet werden. In der Praxis werden in erster Linie die gefährdeten Stellen kontrolliert, wobei die Erfahrung aus früheren Messungen eine wesentliche Hilfe darstellt. Eine wichtige Messung liegt wie bereits erwähnt in der Bestimmung der Stromaufteilung zwischen der Anlagenerde, den Erdseilen und Kabelmänteln, da für die Abschätzung der Güte des Erdungsnetzes nur derjenige Strom verwendet werden darf, der tatsächlich in die Erde fliesst, und andererseits der Anteil der Ströme über die Erdseile etwas über die Güte der Erdseile und deren Kettenleitwiderstand aussagt.

Die eingangs erwähnte Revision der Starkstromverordnung unterscheidet im Hochspannungsbereich zwei Zonen: einerseits den eigentlichen Werkbereich mit einer einzigen Erdung, der Anlagenerdung, und anderseits den Übergangsbereich, der unmittelbar an den Werkbereich anschliesst und das gesamte Gebiet bis zur Bezugserde umfasst.

Bezüglich der Erdung von Freileitungen unterscheidet die Starkstromverordnung zwischen besiedeltem Gebiet, in dem grössere Menschenansammlungen zu erwarten sind, wo die Einwirkspannungen wie diejenigen im Hochspannungsbereich zu behandeln sind, dem übrigen besiedelten Gebiet, wo Einwirkspannungen höchstens zwei Sekunden bestehen dürfen, und dem nicht besiedelten und nicht an Verkehrswegen liegenden Gebiet, in dem an die Masterdungen keine Anforderungen gestellt werden.

Einfachheitshalber kann diese Unterteilung auch für die Messung gemacht werden, indem man Spannungsdifferenzen innerhalb der Anlage, in unmittelbarer Umgebung der Anlage und an einzelnen Masten überprüft. Kritische Punkte bezüglich Berührungs- oder Schrittspannungen innerhalb der Anlage sind Metallzäune, Hochgerüste, Wasserschieber, Wasserhahnen, Kabelendverschlüsse, Beleuchtungskandelaber, Hydranten, Apparategerüste usw. Wesentliche Beachtung muss den metallischen Verbindungen zwischen einem Unterwerk und der Umgebung, die durch Kabelmäntel, Wasserleitungen, PTT-Kabel, Geleiseanschlüsse, Abwasserleitungen usw. entstehen können, geschenkt werden. Bei kleineren Anlagen, die einen steilen Spannungstrichter aufweisen, sollten Wasser- und Abwasserleitungen über einige Meter lange Isolierstücke im Bereich der Umzäunung isoliert sein. Bei Schienen auf einem Schotterbett genügt es im allgemeinen, auf deren Durchverbinden zu verzichten. PTT-Leitungen werden in der Regel durch Isolierübertrager von der Anlage getrennt. Ausserhalb der Anlage können in nahegelegenen Gebäuden Spannungen zwischen Nulleiter, Wasserleitungen, Haushaltapparaten, Armaturen usw. auftreten, die aber bei vorschriftsgemässer Installation selten hohe Werte annehmen. Höhere Werte können unter Umständen bei Wasserhahnen in Gärten bezüglich der Berührungsspannung gefunden werden. Aus Sicherheitsgründen sollte man keine metallarmierten Bewässerungsschläuche zum Rasensprengen verwenden. Elektrische Rasenmäher können wegen ihrer langen Kabel grössere Spannungsdifferenzen abgreifen, so dass in solchen Fällen die Spannung zwischen der Steckdose im oder am Haus und dem entferntesten Punkt im Garten kontrolliert werden muss.

5. Erdungsmessungen für das Kernkraftwerk Gösgen-Däniken

Der gesamte Anlagenkomplex Gösgen besteht aus dem Wasserkraftwerk mit der 8-, 16- und 50-kV-Anlage sowie einem 150-, 220- und 400-kV-Unterwerk, denen nun das Kernkraftwerk Gösgen angegliedert wurde. Alle diese Anlagen sind untereinander mit Erdbändern und Erdseilen verbunden. Vor dem Bau des Kernkraftwerkes Gösgen wies die Gesamtanlage eine Erdungsimpedanz von 37 mΩ auf. Die massiven Erdungsanlagen des Kernkraftwerkes, vor allem die im Grundwasser stehenden Gebäudekomplexe, reduzierten die gesamte Erdungsimpedanz auf 12 mΩ. Man erkennt daraus, dass die

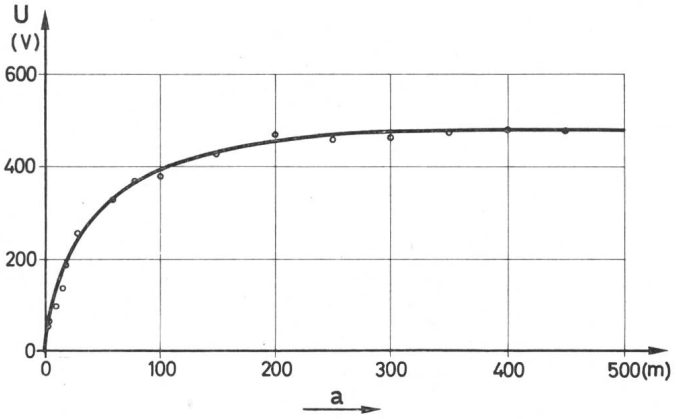

Fig. 4 Trichterverlauf (auf 40 kA Erdschlußstrom bezogen)
a Abstand von der Umzäunung des Unterwerks

Reduktion der Erdungsimpedanz auf einen Drittel des früheren Wertes nicht nur durch die zusätzliche Fläche der neuen Anlage, die weniger als die Hälfte der ursprünglichen ausmacht, sondern vor allem durch den im Grundwasser stehenden Teil der Erdung erreicht wurde. Fig. 4 zeigt den heutigen Erdungstrichter der Gesamtanlage, der einem zukünftig noch möglichen Ausbau entsprechend auf 40 kA Erdschlußstrom bezogen ist. Die Güte der Tiefenerdung (Grundwasser) zeigt sich darin, dass die Asymtote schon nach etwa 300 m erreicht wird. Aus der Gesamttrichterspannung von 480 V pro 40 kA ist auch ersichtlich, dass beim Einsatz eines modernen, schnellen Schutzes an keinem Ort der Anlage, weder inner- noch ausserhalb, gefährliche Spannungen auftreten können. Die Messung der Stromaufteilung bei einem Erdschluss ergab, dass 75 % in die Erdung und 25 % über die Erdseile wegfliessen. Bei der Vielzahl der über zehn abgehenden Erdseile ist auch dies ein Hinweis auf die Güte der Erdung. Rechnet man mit den 75 % des Stromes, der in die Erdung fliesst und der Trichterendspannung mit Hilfe des theoretischen Erdungswiderstandes der Anlage den spezifischen Bodenwiderstand, so erhält man als Richtwert $\varrho = 15\ \Omega\text{m}$, was für Lehm und Molasse mit Grundwassereinfluss der Wirklichkeit nahekommt. Die Kontrollen der Schritt- und Berührungsspannungen innerhalb und ausserhalb der Anlagen ergaben wie erwartet kleine Spannungsdifferenzen. Ein weiteres Untersuchungsfeld stellte die 1,8 km lange Dampf- und Kondensatleitung vom Kernkraftwerk zur Kartonfabrik Niedergösgen dar, welche dank der guten Gesamterdung ebenfalls keine hohen Spannungen ergab. Auch die bezüglich der Gefährdung von Pferden über 2 m gemessene Schrittspannung in der Nähe der Dampfleitung zeigte unbedeutende Werte.

6. Schlussfolgerungen

Die Anwendung der Schwebungsmethode gestattet auch in ausgedehnten und komplexen Anlagen eine problemlose Erdungsmessung. Die gute Vermaschung aller Erdungsanlagen, insbesondere unter Einbezug von Wasserkraftwerken und im Grundwasser stehenden thermischen Kraftwerken, bringt niedere Erdungsimpedanzen, aus denen gesamthaft ungefährliche Schritt- und Berührungsspannungen und keine Potentialverschleppungsgefahren abgeleitet werden dürfen. Die Verbindungen zwischen den einzelnen geographisch getrennten Anlageteilen müssen mehrfach und möglichst grossflächig ausgeführt werden, damit einzelne Verbindungserdbänder nicht einen zu grossen Fehlerstromanteil übernehmen und dadurch parallel geführte Mess- oder Steuerkabel magnetisch beeinflussen können.

Literatur

[1] Schutzmassnahmen gegen gefährliche Einwirkspannung. Bull. SEV 62(1971)19, S. 960...963.

[2] *H. Langrehr:* Rechnungsgrössen für Hochspannungsanlagen. AEG-Telefunken-Handbücher, Bd. 9, Berlin.

[3] *F. Schwab:* Modelltheorie und Modellmessung. Bull. SEV 57(1966)23, S. 1045 bis 1050.

[4] *W. Koch:* Erdungen in Wechselstromanlagen über 1 kV. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg.

[5] *M. Kuussaari, A. J. Pesonen:* Mesures de l'impedance de terre des portes H.T. CIGRE 1978, 36–02.

Adresse des Autors

Dr. *F. Schwab,* dipl. Ing. ETH, Vizedirektor, Aare-Tessin AG für Elektrizität, 4600 Olten.