

Der vorliegende Artikel behandelt die Problematik der experimentellen Untersuchung grösserer Erdungssysteme von teilweise sehr unterschiedlichen Hochspannungsanlagen und beschreibt die dazu eingesetzten Messmethoden. Zur Überprüfung der Anforderungen bezüglich Personensicherheit genügt im allgemeinen die Erfassung von Einwirkspannungen oder die Bestimmung der Erdungsspannung einer Anlage. Es wird jedoch gezeigt, dass mit einer systematischen Erfassung der Erdungsstromverteilung darüber hinaus betrieblich relevante Aussagen über die Erdungssituation und den Erdungszustand einer Hochspannungsanlage möglich sind.

# Die messtechnische Überprüfung von grossen Erdungsanlagen

■ Reinhold Bränlich

Erdungsmessungen haben primär eine wichtige sicherheitstechnische Aufgabe: Sie bezwecken die Überprüfung der Wirksamkeit von Erdungssystemen. Im Einflussbereich von elektrischen Anlagen dürfen weder im Betrieb noch im Störfall Erdpotentialdifferenzen oder Erdströme auftreten, die Lebewesen oder technische Einrichtungen gefährden können. Diese Anforderungen sind in Form von Grenzwertfestlegungen in der SEV-Regel 3569-

1.1985 «Erden als Schutzmassnahme in elektrischen Starkstromanlagen» [1] und in der geltenden Starkstromverordnung (Ausgabe März 1994) [2] im einzelnen formuliert.

Neu erstellte oder modifizierte Anlagen müssen diesbezüglich mittels Erdungsmessungen überprüft werden. Bei bestehenden Erdungsanlagen ist der experimentelle Nachweis ihrer Wirksamkeit alle zehn Jahre zu wiederholen. Die bei Erdungsmessungen zu überprüfenden Anforderungen an Erdungsanlagen beinhalten konkret die gesetzlich geregelte Einhaltung der maximalen Einwirkspannungen zur Gewähr-

Dieser Artikel basiert auf einem Referat, das der Autor an der FKH/VSE-Fachtagung «Erdungssysteme von Energieversorgungsanlagen; Anforderungen, Berechnungsmethoden, neue Messverfahren» am 20. September in Luzern gehalten hat.

#### Adresse des Autors:

Dr. Reinhold Bränlich, Fachkommission für Hochspannungsfragen, FKH, Voltastrasse 9, 8044 Zürich.

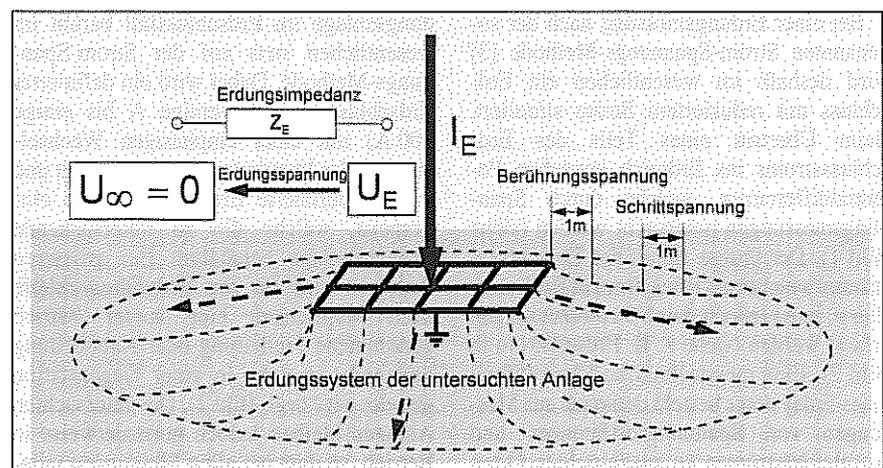


Bild 1 Grundprinzip einer Erdungsmessung

Ein Erdschlussstrom  $I_E$  wird in das Erdsystem eingespeist. Dieser Strom tritt ins Erdreich über und erzeugt dabei in der Anlagenumgebung eine trichterförmige Potentialanhebung  $U_E$ . Im Übergangsbereich der Anlage entstehen Schritt- und Berührungsspannungen, die gemessen und ausgewertet werden.

leistung der Personensicherheit und zur Reduktion von Beeinträchtigungen fremder technischer Einrichtungen.

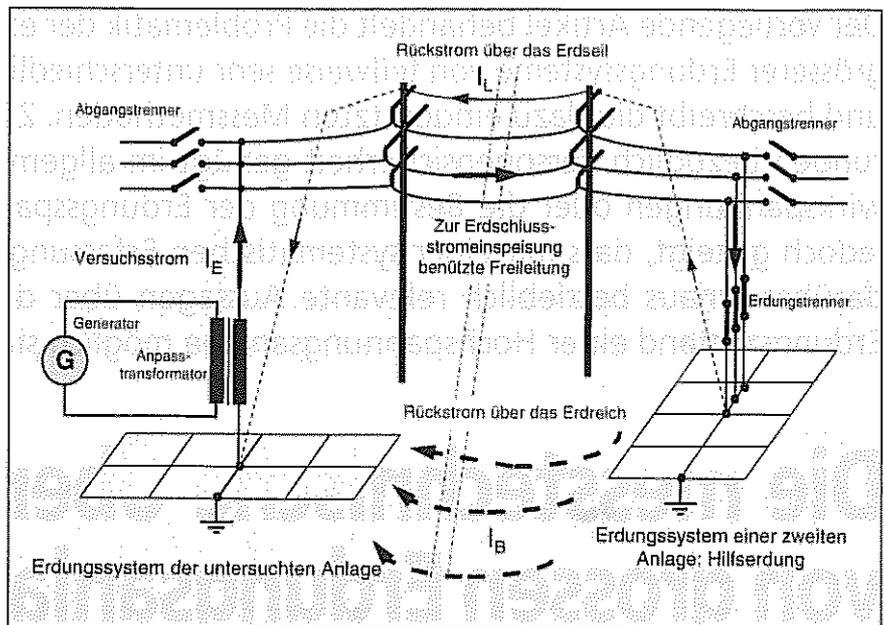
Ausser der Kontrolle der sicherheitstechnischen Aspekte soll die Erdungssituation einer elektrischen Anlage aber auch nach betriebstechnischen Gesichtspunkten beurteilt werden. Im Zentrum stehen dabei Abklärungen zur Vermeidung von Beeinflussungen und Überlastungen eigener Betriebseinrichtungen und Leitungen im Erdschlussfall oder Untersuchungen zur Minimierung von Energieverlusten im Betrieb aufgrund geerdeter Leiterschleifen.

Zur Erfüllung aller Zielsetzungen ist nicht nur das Erdungssystem alleine zu betrachten, sondern es sind weitere Faktoren, wie die Netzsituation und die Eigenschaften der gesamten elektrischen Anlage und deren Umgebung, einzubeziehen. Dabei ist insbesondere zu bedenken, dass die Einzelmessungen bei der Überprüfung einer Erdungsanlage nur stichprobenweise vorgenommen werden können und dass die Auswahl solcher Stichproben eine genaue Kenntnis der Gesamtsituation der untersuchten Anlage voraussetzt.

Mit den im folgenden beschriebenen Messmethoden werden im wesentlichen die Erdungsverhältnisse bei *netzfrequenten Vorgängen* untersucht. Dies betrifft im weitesten Sinn die Überprüfung der Erdungsanlage im *Erdschlussfall*. Auch die Auslegung von Erdungsanlagen erfolgt im allgemeinen nach den Anforderungen des Erdschlussfalls. Bei einem solchen Ereignis fliesst ein meist hoher Erdschlussstrom über das Erdungssystem zur erdschlussspeisenden Quelle zurück. Der Rückstrompfad führt einerseits über die Anlagenerde durch das Erdreich, andererseits aber über geerdete Leiter (Erdseile, Kabelschirme). Der jeweilige Erdungsstromanteil ist je nach Beschaffenheit der Anlage und des Netzes stark variabel.

Bei einer Erdungsmessung nach der sogenannten Strom-Spannungs-Methode [3] wird deshalb im wesentlichen ein Erdschluss mit reduziertem Strom simuliert. Beim Übertritt eines Teils des Erdschlussstroms ins Erdreich entstehen Potentialdifferenzen, welche durch Spannungsmessungen untersucht werden (siehe Bild 1). Der übrige Anteil der Erdschlussströme, welcher als Rückstrom in Erdleitern fliesst, muss jedoch durch Strommessungen erfasst werden (siehe z. B. Erdseilstrom in Bild 2). Eine messtechnische Überprüfung eines Erdsystems besteht demnach aus Messungen von Spannungsdifferenzen und Ausgleichsströmen an ausgesuchten Orten der Erdungsanlage, die durch Erdschlussströme entstehen.

Nach Abschluss einer Messkampagne müssen die Wirksamkeit der Erdungsanla-



**Bild 2 Erdschlussstromspeisung über die Erdungssysteme zweier Unterwerke unter Benutzung einer Freileitung**  
Die Summe des Rückstroms im Erdreich  $I_B$  und des Rückstroms im Erdseil  $I_L$  ergibt den versuchsmässig eingespeisten Erdschlussstrom  $I_E$ .

ge und die im Erdschlussfall auftretenden Einwirkungsspannungen beurteilt und dokumentiert werden. Bei dieser Beurteilung ist eine Analyse der Erdungssituation aus einer Vielzahl der gemessenen Spannungs- und Stromwerte vorzunehmen. Es müssen für den Anlagenbetreiber Schlussfolgerungen gezogen werden, aus denen gegebenenfalls Schwachstellen der Erdungsanlage und weitere Optimierungsmassnahmen abzuleiten sind.

### Einspeisung des Erdschlussstroms - Bildung einer Erdschlussstromschleife

Die messtechnische Untersuchung der Potential- und Stromverteilung einer Erdungsanlage im Erdschlussfall beruht im wesentlichen stets auf der Strom-Spannungs-Methode. Dabei wird ein definierter Erdschlussstrom  $I_E$  (einige A bis einige 100 A) mit einer einphasigen Wechselstrom- oder Impulsstromquelle erzeugt und in eine definierte Erdschlussstromschleife eingespeist, welche die zu untersuchende Erdungsanlage beinhaltet. Bei grösseren Anlagen wird für die Erdschlussstromschleife nach Möglichkeit eine ausser Betrieb genommene Freileitung oder Kabelleitung verwendet, welche in einer Gegenstation vererdet wird (vgl. Bild 2). Die untersuchten Anlagen bleiben jedoch normalerweise in Betrieb, so dass bei allen Messungen mögliche Beeinflussungen aus dem Anlagenbetrieb (50 Hz und Oberwellen) zu berücksichtigen sind. Die Entfernung zwischen den beiden für die Erdschlussstromschleife

benützten Unterwerken muss ausreichend gross sein, so dass eine gegenseitige Beeinflussung der Erdungssysteme ausgeschlossen werden kann. Um die Erdschlussstromschleifenimpedanz bei den notwendigen Distanzen zu reduzieren, werden die Phasen der Freileitungen oder Kabelleitungen, über welche die Erdschlussstromspeisung erfolgt, normalerweise parallel geschaltet.

Durch den Schleifenstrom wird das Potential des untersuchten Erdungssystems um die Erdungsspannung  $U_E$  angehoben, die in Form eines Potentialberges von der äusseren Begrenzung der Erdungsanlage mit zunehmender Entfernung abfällt. Die in diesem Potentialrichter befindlichen Objekte liegen in einem Spannungsgradienten und weisen somit Spannungsdifferenzen gegenüber der Umgebung auf, welche als Einwirkungsspannungen mit geeigneten Voltmetern gemessen werden können<sup>1</sup>.

Wie einleitend schon erwähnt wurde, fliessen die in der versuchsmässig eingerichteten Erdschlussstromschleife erzeugten Ströme (wie auch im Erdschlussfall) nicht ausschliesslich durch das Erdreich zur Gegenerde zurück, sondern nehmen ihren Weg zu einem wesentlichen Anteil über Erdseile und Kabelschirme von Leitungsabgängen. Auch andere ausgedehnte leitfähige Strukturen in der Umgebung der Erdungsanlage, wie zum Beispiel Rohrleitungen, Bahnanlagen oder Telecommleitungen, führen Erdungsströme. Die Erfassung dieser lei-

<sup>1</sup> Auch um das für die Gegenerde (Hilfserde) verwendete Erdsystem bildet sich ein Potentialrichter aus. Es können deshalb mit der gleichen Erdschlussstromschleife beide Erdsysteme gleichermaßen untersucht werden.

tungsgebundenen Erdungsströme ist ebenfalls Bestandteil einer Erdungsmessung.

Alle Messergebnisse (Einwirkspannungen und Erdleiterströme) werden nachträglich auf den maximalen Erdschlussstrom der untersuchten Anlage linear hochgerechnet. Der maximale Erdkurzschlussstrom einer starr geerdeten Hochspannungs-Schaltanlage entsteht normalerweise bei einem einpoligen Erdfehler an einer Sammelschiene und ist vom Netzzustand abhängig.

Bei grösseren Erdungsanlagen von Unterwerken und Kraftwerksanlagen wird zur Einspeisung des Erdschlussstroms  $I_E$  eine Stromquelle von einigen 10 A bis einigen 100 A benötigt. Die FKH verwendet dazu ein mobiles 100-kVA-Diesel-Generator-Aggregat. Der integrierte Asynchrongenerator gibt an den Klemmen eine Ausgangsspannung von etwa 500 V ab. Zur Anpassung an die jeweilige Impedanz der Versuchsleitung wird zwischen Generator und Erdschluss-Einspeisestelle ein Anpasstransformator geschaltet.

Bei kleinen Erdungsanlagen, beispielsweise bei Transformatorstationen und bei Masterdern, werden Erdungsmessgeräte (Voltmeter mit integrierter Stromquelle) eingesetzt, wobei die Gegenerde mit Erdsonden bewerkstelligt wird. Zur Impedanzmessung einzelner Erdschleifen werden neuerdings auf dem Markt auch Erdungsmesszangen angeboten.

### Grundsätzliche Problematik der Erdungsmessungen

Selbst wenn alle messtechnischen Probleme, wie zum Beispiel die Eliminierung von Störspannungen (siehe nachfolgendes Kapitel «Methoden zur Eliminierung von Störspannungen»), beherrscht werden, bleiben bei Erdungsmessungen eine Reihe prinzipieller Probleme bestehen, welche oft erhebliche Unsicherheiten bei der Interpretation der gemessenen Werte zur Folge haben. Ebenso sind der Reproduzierbarkeit von Erdungsmessungen unabdingbare Grenzen gesetzt. Die dafür verantwortlichen Probleme sollen im folgenden aufgezählt und wo nötig kurz erläutert werden. Einige der offenen Probleme können durch eine standardisierte Messprozedur bereinigt werden. Spezielle Aspekte der Messmethoden müssten teilweise mit praktischen Versuchen an Erdungsanlagen untersucht werden.

1. Der *spezifische Widerstand* des Erdbodens ist zeitlich nicht konstant. Er unterliegt jahreszeitlichen Schwankungen, die von der Erdbodenfeuchtigkeit und der Temperatur abhängig sind [3, 4].

2. Nach einer Neuverlegung von erdfühli- gen Leitern findet durch Verdichtung des

Erdreichs in der Umgebung der Erdelektroden eine langsame *Reduktion des Erdübergangswiderstands* statt, welche normalerweise über viele Monate andauert [3].

3. Da die *Erdbodenleitfähigkeit* aus geologischen Gründen zu *grösseren Tiefen hin abnimmt*, bilden allfällige Erdschlussströme keine kugelsymmetrischen Strömungsfelder um die Erdungsanlagen. Die Erdströme fliessen vermehrt an der Oberfläche ab. Werden vorerst die Wechselstromeffekte (siehe Bild 3) ausser acht gelassen, dann nimmt die Stromdichte und das resistive elektrische Feld eines Einzelerders zunächst quadratisch mit dem Abstand und weiter entfernt davon nahezu linear dazu ab. Der Einfachheit halber wird für die folgende Überlegung eine halbkugelförmig begrenzte Erdungsanlage angenommen. Mathematisch ausgedrückt ist die Erdungsspannung  $U_E$  das Integral der resistiven Feldstärke  $E_E(r)$  vom Rand des Erdungssystems ( $r=r_0$ ) bis zu einem unendlich grossen Abstand.

$$U_E = \int_{r_0}^{\infty} E_E(r) dr = \int_{r_0}^{\infty} E_0 \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-k} dr$$

mit  $1 < k < 2$  (1)

- $E_E$  resistive Feldstärke um das Erdungssystem [V/m]
- $r$  Abstand vom Zentrum des Erdungssystems [m]
- $r_0$  Radius des Erdungssystems [m]
- $E_0$  resistive Feldstärke an der Begrenzung des Erdungssystems [V/m]
- $k$  vom geologischen Untergrund abhängiger Exponent für die abfallende Trichterspannungsfunktion

Da in der Praxis das Spannungstrichterprofil nicht bis zu einem unendlich grossen Abstand erfasst werden kann, ist die Erdungsspannung  $U_E$  und damit auch die Erdungsimpedanz  $Z_E = U_E/I_E$  der Anlagen davon abhängig, bei welcher Distanz von der Erdungsanlage die Auswertung des Trichterpotentials für die Bestimmung der Erdungsspannung erfolgt. Im Grenzfall der flächenhaften Stromausbreitung ( $k=1$ ) wäre die Erdungsimpedanz gar unendlich gross (siehe auch [7], Kapitel D, Abschnitt f: «Erdungen auf Böden mit leitender Oberschicht auf schlecht leitendem Untergrund»).

4. Das unter dem Aspekt 3 beschriebene Problem der unklaren Definierbarkeit der Erdungsimpedanz wird dadurch noch komplizierter, dass es sich bei den Erdschlussströmen um betriebsfrequente Wechselströme handelt, welche den Stromverdrängungseffekten im Erdboden unterworfen sind (siehe Bild 3). Wechselströme

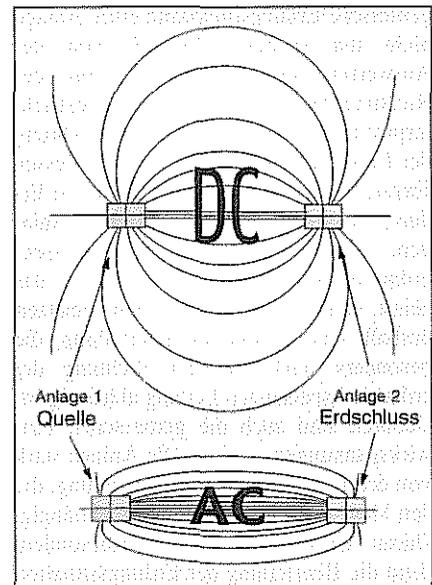


Bild 3 Stromlinien im resistiven Feld zwischen zwei Erdungssystemen (qualitative Darstellung)

oben im Fall von Gleichstrom, unten im Fall von Wechselstrom.

In beiden Fällen liegt in der Anlage 2 ein Erdschluss vor, welcher über eine Leitung von der Anlage 1 aus gespeist wird. Man beachte im Wechselstromfall die Konzentration der Stromlinien jeweils auf der Seite des Leitungsausgangs.

im Erdboden breiten sich nicht beliebig weit aus, sondern sie sind bestrebt, den Erdschluss-Stromkreis in einer möglichst engen Schleife zu schliessen. Erdschlussrückströme im Boden fliessen demnach nicht gemäss einem Dipolströmungsfeld (Bild 3 oben) zur Gegenerde zurück, sondern sie fliessen in einem engen Korridor von einigen 100 m Breite entlang der erdschlusspeisenden Leitung (Bild 3 unten). Aus diesem Grund entsteht eine stark *asymmetrische Erdungsstromverteilung* um die untersuchte Erdungsanlage, zumal der Erdschlussstrom nur von einer Seite her eingespeist wird. Mittels der Magnetfeld- oder Stromeindringtiefe in den Erdboden,  $\delta$ , lassen sich quantitative Aussagen über die Ausbreitung von Erdströmen machen.

$$|\delta| = \sqrt{\rho / \omega \mu_0} \quad (2)$$

- $\delta$  Eindringtiefe des Erdrückstroms [m]
- $\rho$  spezifischer Widerstand des Erdreichs [ $\Omega\text{m}$ ]
- $\omega$  Kreisfrequenz des Erdstroms [ $\text{s}^{-1}$ ]
- $\mu_0$  magnetische Permeabilität des Vakuums [ $4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am]

Bei den in der Praxis vorkommenden spezifischen Erdbodenwiderständen von 10 bis 1000  $\Omega\text{m}$  resultieren bei einer Netzfrequenz von 50 Hz Eindringtiefen  $\delta$  zwischen 150 und 1500 m. Aus obigem Zusammenhang ist zu folgern, dass die

gemessene Erdungsimpedanz einer Anlage nicht nur (gemäss Punkt 3) von der Auswertungsdistanz, sondern von der Richtung des gemessenen Spannungstrichterprofils gegenüber der Einspeiserichtung des Erdschlussstroms und auch von dessen Frequenz abhängig ist. Besonders die Erdungsanlagen grosser elektrischer Anlagen, welche im Durchmesser die Grössenordnung der Stromeindringtiefe  $\delta$ , das heisst einige 100 m, erreichen, besitzen deshalb eine Erdungsstromverteilung, die besonders stark von der Richtung der erdschlusspeisenden Leitung abhängig ist. Dadurch sind auch die gemessenen Einwirkspannungen rund um die Anlage stark von der ausgewählten Versuchsleitung, die den Mess-Erdschlussstrom trägt, abhängig. Dieser Umstand erschwert insbesondere dann die Beurteilung der Erdungssituation bei Erdungsmessungen grosser Anlagen, wenn nur eine Einspeisevariante untersucht wird.

5. Durch gewisse *ausgelagerte, aber erdungsmässig verbundene Anlagenteile*, wie beispielsweise Endmasten von Kabelausführungen, liegt keine klare Begrenzung der Erdungsanlage vor. Die Erdungsimpedanz ist nicht zuletzt auch aus diesem Grund nicht genau definierbar. Ausserdem hängt der messtechnisch bestimmte Reduktionsfaktor für Einwirkspannungen (Verhältnis des Erdungsstroms zum Erdschlussstrom) von der genauen Stelle ab, an welcher der Erdseilrückstrom oder der Kabelmantelrückstrom erfasst wird. Schliesslich wird das Ergebnis der Messungen von Einwirkspannungen wegen der genannten Ausläufer des Erdsystems noch mehr von der Richtung der erdschlusspeisenden Leitung abhängig.

Aus den oben aufgeführten Aspekten geht klar hervor, dass nur die Einspeisung eines Erdschlussstroms via alle erdschlusspeisenden Leitungen ein richtiges Abbild der Erdschlusssituation ergibt. Eine solche Erdungsmessung ist jedoch aus praktischen Gründen wohl nur im Ausnahmefall machbar. Um dennoch zumindest reproduzierbare Erdungsmessungen durchführen zu können, wäre deshalb eine einheitliche Vorgehensweise für die Durchführung von Erdungsmessungen an grösseren Erdungsanlagen zweckmässig. Zurzeit fehlen jedoch entsprechende Richtlinien oder Empfehlungen für die Schweiz.

### Methoden zur Eliminierung von Störspannungen

Da Schaltanlagen und Kraftwerkszentralen normalerweise während der Erdungsmessungen in Betrieb stehen, können durch ohmsche oder induktive Kopplung Stör-

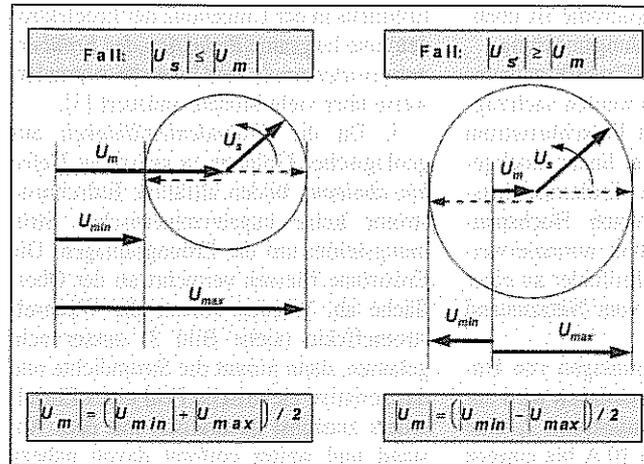


Bild 4 Bestimmung der Messspannung mit der Schwegungsmethode

Die Messspannung  $U_m$  wird bestimmt durch Eliminierung von netzfrequenten Störeinkopplungen für den Fall, dass die Messspannung grösser ist als die Störspannung (links), und den Fall, dass die Messspannung kleiner ist als die Störspannung (rechts).

spannungen in die Versuchsstromschleife oder die Messschleife eingekoppelt werden. Die Überlagerung solcher Störspannungen führt leicht zu wesentlichen Messwertverfälschungen, wenn sie nicht durch geeignete Massnahmen eliminiert werden [3, 5]. Nebst den betriebsfrequenten Störsignalen der Starkstromanlage (50 Hz oder  $16^{2/3}$  Hz) können auch Netzoberwellen und Gleichströme zu Messfehlern führen. Als Massnahmen gegen die Störspannungen sind die folgenden Methoden üblich:

- Schwegungsmethode
- Ein/Aus-Methode
- Umpolmethode
- Vektorvoltmeter, Synchrongleichrichter, Empfangverstärker
- Wahl einer von der Netzfrequenz abweichenden Frequenz, Filterung der Störfrequenzen

Bei der *Schwegungsmethode* wird für den Versuchsstrom eine leicht vom Betriebsstrom abweichende Frequenz gewählt (Abweichung kleiner als 1 Hz). Durch die Überlagerung von netzfrequenten Störspannungen  $U_s$  mit der Messspannung  $U_m$  entsteht ein Schwegungseffekt, der die Anzeige des Voltmeters zwischen einem Maximalwert  $U_{max}$  und einem Minimalwert  $U_{min}$  schwanken lässt. Die Messspannung

errechnet sich aus den Extremwerten des Anzeigeelements gemäss Bild 4. Es liegt auf der Hand, dass die Ableseunsicherheit von der Geschicklichkeit des Ausführenden und von der Zeitkonstante des Instruments abhängig ist.

Bei der *Ein/Aus-Methode* und der *Umpolmethode* wird ein netzfrequenter Versuchsstrom erzeugt, der periodisch ein- und ausgeschaltet wird. Bei der Umpolmethode werden die beiden Phasen der Quelle zusätzlich bei jedem Einschalten noch umgepolt. Alle Messungen werden dann bei ausgeschalteter Versuchsstromquelle (Messung von  $U_s$ ) und eingeschalteter Versuchsstromquelle durchgeführt, wobei bei der Umpolmethode bei beiden Polaritäten gemessen wird ( $U_1$  bei positiver,  $U_2$  bei negativer Polarität und  $U_s$  bei ausgeschaltetem Versuchsstrom). Es ist zu bemerken, dass die Umpolmethode nur dann sinnvolle Werte liefert, wenn der Versuchsstrom absolut phasenstarr mit dem Netzstrom ist. Ausserdem muss der sich als Störgrösse einkoppelnde Netzstrom während der drei Ableseungen an einem Messpunkt konstant bleiben.

Während bei der Ein/Aus-Methode mit Voltmetermessungen nur eine obere Grenze für den Messfehler angegeben werden kann, besteht bei der Umpolmethode eine

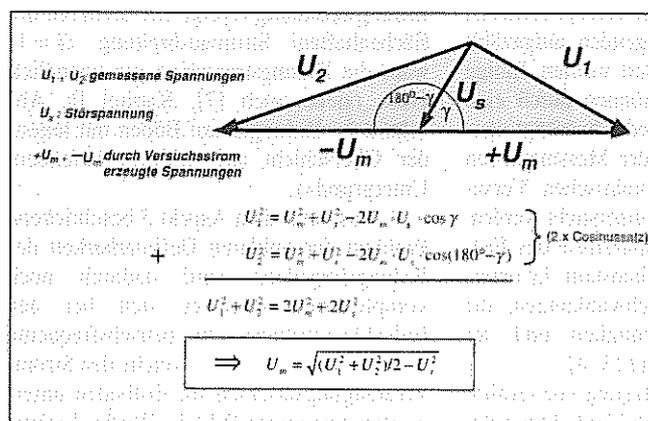


Bild 5 Bestimmung der Messspannung mit der Umpolmethode

Zeigerdiagramme für die Bestimmung der Messspannung durch Eliminierung von netzfrequenten Überlagerungen aus dem Messwert der Störspannung ohne Versuchsstrom und den Messwerten für die beiden Polaritäten der Versuchsstromquelle.

| Methode                                  | Frequenz                                  | Messung                                   | Vorteile   | Nachteile   |
|--|---|---|--|---|
| 1. Schwebungs-<br>methode                | Abweichung von der<br>Netzfrequenz <1 Hz  | Messzeit einige Sekun-<br>den ohne Filter | Messung bei nahezu<br>Netzfrequenz                                       | Auswertung nicht<br>immer eindeutig                         |
| 2. Ein/Aus-Methode                       | beliebig                                  | zwei Messvorgänge,<br>ohne Filter         | Einfachheit  | keine Fehlereliminierung,<br>nur Fehlerabschätzung          |
| 3. Umpolmethode                          | Netzfrequenz                              | drei Messvorgänge,<br>ohne Filter         | eindeutige Ermittlung<br>von Messspannungen,<br>Messung bei Netzfrequenz | keine Eliminierung von<br>Oberwellen,<br>dreimalige Messung |
| 4. Vektorvoltmeter,<br>Einfangverstärker | beliebig                                  | ein Messvorgang mit<br>Spezialmessgerät   | Unterdrückung sämtlicher<br>Störungen möglich                            | Referenzsignal der Ver-<br>suchsstromquelle nötig           |
| 5. Filterung der<br>Störfrequenzen       | Abweichung von der<br>Netzfrequenz >10 Hz | ein Messvorgang<br>mit Filter             | Unterdrückung sämtlicher<br>Störungen möglich                            | Messfrequenz entspricht<br>nicht Netzfrequenz               |

Tabelle 1 Unterdrückung von Störeinkopplungen bei Erdungsmessungen

Zusammenstellung der Eigenschaften sowie der Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden

eindeutige Beziehung zwischen den drei Messwerten und der durch den Versuchsstrom hervorgerufenen Messspannung  $U_m$  (siehe Bild 5). In jüngster Zeit wurde auch eine Ein/Aus-Methode mit Computer-Mess- und -Auswertesystem vorgestellt, welches eine wirkungsvolle Eliminierung der Störeinflüsse ermöglicht [6].

Die FKH hat in der Vergangenheit, mit Ausnahme der Umpolmethode, mit allen diesen Methoden einige Erfahrungen gesammelt. Dabei hat sich die Verwendung einer von der Netzfrequenz abweichenden Frequenz für den Versuchsstrom am besten bewährt. Das Verfahren wird in einzelnen Fällen in Kombination mit der Methode der Synchrongleichrichtung verwendet. Zur Erzeugung des Versuchsstroms verwendet die FKH einen Asynchrongenerator, welcher bei ungefähr 60–70 Hz betrieben wird. Die von 50 Hz abweichende Frequenz des eingespeisten Erdungsstroms erlaubt eine einfache und wirkungsvolle Trennung der versuchsbedingten Erdungsströme von betriebsmässigen Erdungsströmen. Zur Ermittlung der Einwirkspannungen wird ein geeignetes hochselektives Filter verwendet, welches eine Beeinflussung der Messresultate durch den 50-Hz-Anlagenbetrieb oder auch durch 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnströme wirksam verhindert.

Zur Messung von Stromverteilungen werden auch *Einfangverstärker* oder *Synchrongleichrichter* eingesetzt, welche eine sehr empfindliche Messung von Erdungsteilströmen in Amplitude und Phase zulassen. Durch solche hochentwickelte elektronische Geräte lassen sich präzise Messungen bei grossen Anlagen und kleinen Versuchsströmen (einige 10 A) problemlos durchführen. Für diese Messmethode ist es allerdings notwendig, ein Referenzsignal von der Versuchsstromquelle zum Messort zu übertragen.

Weitere Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden zur Unterdrückung von Störeinflüssen sind in Tabelle 1 aufgezählt.

### Ermittlung von Spannungsprofilen und Erdungsimpedanzen

Zur genaueren Beurteilung von Erdungsanlagen kann der Verlauf von Erdungsspannungsprofilen (d. h. Erdungsspannungstrichtern) herangezogen werden. Zur Ermittlung eines Profils des Spannungstrichters werden Spannungsdifferenzen zwischen der Anlagenerde (Referenz) und einer in den Erdboden gesteckten Messsonde an definierten Stellen (z. B.

1 m, 5 m, 10 m, 100 m Distanz zur Anlage) entlang einer vorgegebenen Richtung gemessen (siehe Bild 6).

Aus dem Verlauf eines Spannungsprofils kann vor allem der Anlagen-Übergangsbereich und die Wirksamkeit von Potentialsteuerungsmassnahmen einer Erdungsanlage beurteilt werden. Insbesondere sind hier die Spannungsgradienten direkt ersichtlich. Die auftretenden Schrittspannungen können als Spannungsdifferenzen den gemessenen Spannungsprofilen entnommen werden.

Wenn das Spannungsprofil über eine genügend grosse Distanz vorliegt, kann die wirksame Erdungsimpedanz der zu untersuchenden Anlage ermittelt werden. Der Betrag der Erdungsimpedanz  $Z_E$  ist definiert als das Verhältnis der maximalen Trichterspannung  $U_E$  (Asymptote) zu dem diese Spannung hervorruhenden Erdungsstrom  $I_E$  oder Messstrom  $I_M$ :

$$Z_E = U_E / I_E \quad (3)$$

Ein wichtiger Grund für die Messung von Spannungsprofilen ist die Frage nach der Höhe der Erdübergangsspannung  $U_E$ . Ist  $U_E$  nämlich kleiner als die maximal zulässige Berührungsspannung, so kann praktisch auf die Messung von Einwirkspannungen verzichtet werden. Aus den im Kapitel über die Einspeisung des Erdschlussstroms beschriebenen Schwierigkeiten und aus den Erfahrungen der FKH geht allerdings hervor, dass die auf diese Weise gemessene Trichterspannung stark von der Richtung des Messprofils (gegenüber dem Leitungsabgang mit dem versuchsmässig eingespeisten Erdungsstrom) abhängig ist. Reproduzierbare Werte für eine gemessene Erdungsimpedanz werden aber erzielt, wenn die Profilverlauf etwa im rechten Winkel zur Erdschluss-einspeisenden Leitung steht und wenn ausserdem in der Richtung der Profilmessung keine anderen Leitungsabgänge und erdfühiligen Strukturen vorhanden sind.

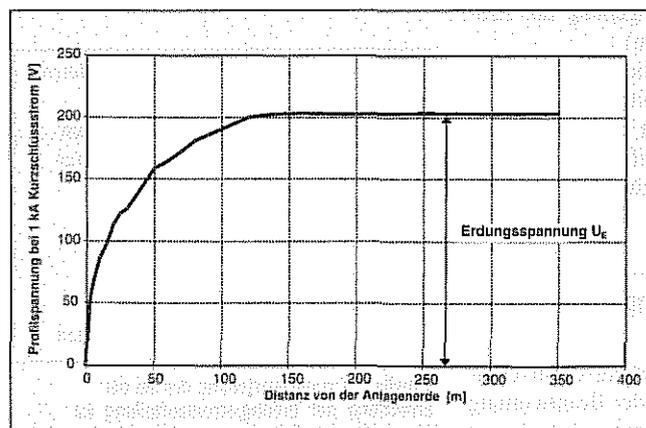


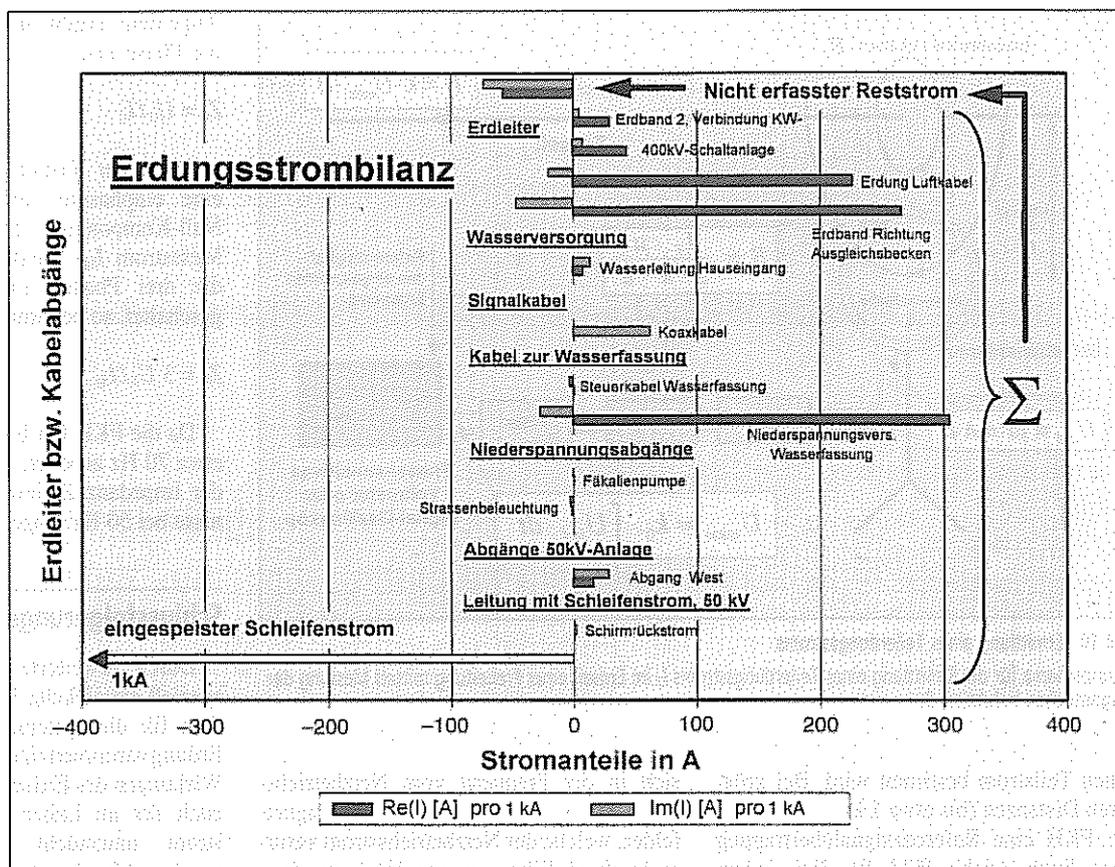
Bild 6 Spannungstrichterprofil einer mittelgrossen Hochspannungsanlage

Aus diesem gemessenen Profilverlauf ergibt sich eine Erdungsimpedanz  $Z_E$  von etwa 205 m $\Omega$ .



Bild 8 Beispiel einer Erdungsstrombilanz

Da zwischen den Erdungsstromanteilen oft wesentliche Phasenverschiebungen vorliegen, ist die Bilanz getrennt mit Real- und Imaginärteil durchgeführt.



gebungserde und der Anlagenerde, so ergibt die vektoriell addierte Summe der gemessenen Ströme den eingespeisten Schleifenstrom. Die Aufteilung des Erdungsstroms für den Kurzschlussfall kann auf diese Weise ermittelt und kontrolliert werden. In der Regel tritt jedoch ein erheblicher Anteil des Erdungsstroms via Erdungsnetz direkt ins Erdreich über. Dieser Anteil ist normalerweise einer direkten Messung nicht zugänglich und erscheint in der Erdungsstrombilanz als Restbetrag. Ein Beispiel einer Erdschlussstrombilanz ist in Bild 8 dargestellt.

Die FKH verwendet für die Messung einzelner Stromanteile geeignete Zangenstromwandler oder spezielle Rogowski-Spulen, so dass auch Leiter grösseren Querschnitts (z. B. Hochspannungskabel), Rohrleitungen und Masten bis zu Durchmessern von über einem Meter umfasst werden können. Die Bürdenspannungen der Stromwandler müssen zur Vermeidung von Störeinkopplungen mit abgeschirmten und verdrehten Signalkabeln zum Messplatz übertragen werden. Zur Unterdrückung von 50-Hz-Betriebsströmen und  $16^{2/3}$ -Hz-Bahnströmen werden wie bei der Messung von Einwirkspannungen Bandsperrfilter eingesetzt.

Die Bestimmung der Phasenlage von Erdstromanteilen in Erdleitern und Kabelmänteln erfordert, dass ein Referenzsignal

des versuchsmässig eingespeisten Erdschlussstroms bis zum Messort übertragen wird. Bei kurzen Distanzen (bis etwa 100 m) kann das Referenzsignal des eingespeisten Erdschlussstroms mit einem be-

bürdeten Stromwandler erfasst und über eine abgeschirmte und verdrehte Zweidrahtleitung bis zum Messplatz übertragen werden, wo die Phasenverschiebung zwischen dem Referenzstrom und dem gemess-

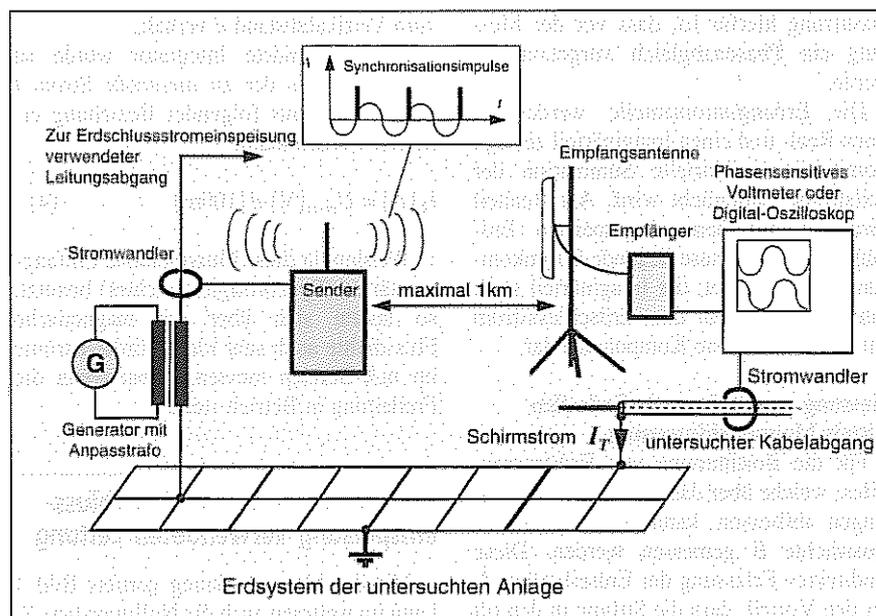


Bild 9 Übertragung von Synchronisationssignalen

Prinzipschema für die Übertragung von Synchronisationssignalen zur Messung von Phasenwinkeln zwischen dem eingespeisten Schleifenstrom (Speisequelle: Generator, links) und dem zu messenden Teilerdungsstrom  $I_T$  (rechts).

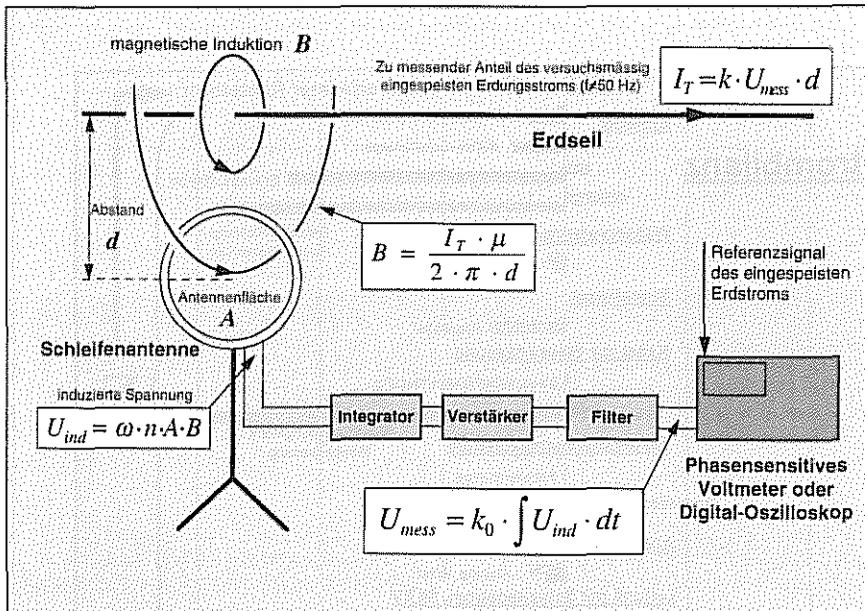


Bild 10 Ermittlung eines Teilerdungsstroms

Prinzipschema für die Ermittlung eines Teilerdungsstroms  $I_T$  im Erdseil einer Freileitung mittels Messung der magnetischen Induktion  $B$ .

senen Teilstrom bestimmt wird. Bei größeren Distanzen (bis etwa 1 km) verwendet die FKH eine Referenzsignalübertragung über Funk (siehe Bild 9). Bei jedem detektierten positiven Nulldurchgang des Referenzstroms wird ein kurzer Synchronisationsimpuls gesendet, welcher am Messplatz empfangen wird. Die Phasenverschiebung des Messstroms kann dann durch Vergleich des Nulldurchgangs des gemessenen Stroms mit dem Synchronisationsimpuls bestimmt werden. Die erreichbare Messunsicherheit bei der Bestimmung der Phasenlage liegt bei  $\pm 5^\circ$ . Voraussetzung hierfür ist, dass vor der Messung ein Phasenabgleich vorgenommen wurde.

Die Erdungsstromanteile werden in einen Real- und einen Imaginärteil zerlegt, womit eine vektorielle Summation der Teilströme ermöglicht wird. Als Realteil wird die mit dem eingespeisten Erdschlussstrom in Phase liegende Stromkomponente bezeichnet; der Imaginärteil stellt dann die gegenüber dem Erdschlussstrom um  $90^\circ$  verschobene Komponente dar.

**Messung von Strömen in Erdseilen mittels Magnetfeldmessung**

Für die Bestimmung von Erdstromanteilen, welche über das Erdseil von Freileitungen abfließen, kann die magnetische Flussdichte  $B$  gemessen werden. Diese «indirekte» Erfassung der Erdseilstrome  $I_T$  hat den Vorteil, dass die Ströme in den oft schwer zugänglichen Erdseilen ohne Mastbesteigungen mittels einer Schleifenantenne vom Boden aus bestimmt werden können. Da der eingespeiste Strom ( $\approx 70$  Hz)

sich in der Frequenz vom Netzbetriebsstrom unterscheidet, können die Magnetfelder, welche der Netzbetriebsstrom verursacht, durch Filterung unterdrückt werden.

Das Prinzip der «indirekten» Erdleiterstrommessung ist in Bild 10 dargestellt. Der Erdseilstrom  $I_T$  verursacht eine magnetische Flussdichte  $B$ , welche in der Schleifenantenne eine Spannung  $U_{ind}$  induziert. Nach Verstärkung und zeitlicher Integration des induzierten Spannungsverlaufs erhält man ein Signal  $U_{mess}$ , welches sich proportional zu dem im Erdseil fließenden Strom und umgekehrt proportional zum Vertikalabstand  $d$  verhält.

Der verwendete Integrator wurde so kalibriert, dass der zu messende Strom  $I$  sehr einfach aus folgender Beziehung ermittelt werden kann:

$$I_T [\text{A}] = U_{mess} [\text{V}] \cdot d [100\text{m}] \quad (4)$$

Werden für diese Messmethode Empfangsverstärker (Synchrongleichrichter) benutzt, so lassen sich über die magnetische Flussdichte auch sehr kleine Erdseilstrome im mA-Bereich messen, selbst wenn die Freileitung in Betrieb steht.

**Nullimpedanz der zur Erdschluss-einspeisung verwendeten Leitung**

Mit der Messanordnung gemäss Bild 1 kann im weiteren auch die Nullimpedanz  $Z_0$  eines Leitungssystems ermittelt werden. Dazu werden Betrag und Phase der treibenden Spannung  $U_0$  und des Messstromes  $I_M$  oder des Erdschlussstromes  $I_E$  bestimmt.

Allgemein ergibt sich die Nullimpedanz pro Phase aus:

$$Z_0 = U_0 / I_0 \quad (5)$$

Bei einer Erdschlusseinspeisung über eine einphasige Leitung entspricht die Null-Komponente des Stromes  $I_0$  dem Messstrom  $I_M$ . Werden für eine Messung die drei Phasen einer Leitung parallel geschaltet, so bekommt man bei  $I_M = 3 \cdot I_0$ :

$$Z_0 = 3 U_0 / I_M \quad (6)$$

Da die FKH bei Erdungsmessungen mit etwa 70 Hz arbeitet, muss der Imaginärteil der Impedanz  $Z_0$  jeweils auf die Verhältnisse bei 50 Hz umgerechnet werden.

**Schlussfolgerungen**

Durch erweiterte Messmethoden und speziell entwickelte Messgeräte, insbesondere für die systematische Messung von Erdungsstromverteilungen, kann nebst den Wirkungen des Erdungsstroms im Erdreich auch der an Leiter gebundene Erdungsstrom untersucht und charakterisiert werden. Mit der für die Erdungsmessung versuchsweise eingerichteten Erdschlusschleife lässt sich mit den aufgezeigten Methoden eine eigentliche Erdschlussstrombilanz erstellen, womit alle Erdungsstromanteile quantifiziert werden können. Es können dadurch Fehler und Schwachstellen in der Erdungsanlage ausfindig gemacht werden. Die Stromverteilung gibt überdies nützliche Hinweise darüber, wo mit erhöhten Einwirkspannungen zu rechnen ist.

Es zeigt sich, dass bei allen Messungen der Unterdrückung von störenden Einkopplungen aus dem Anlagenbetrieb besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden muss. Es ist dabei insbesondere mit ohmschen und induktiven Einkopplungen – bei hochohmigen Messgeräten in Freiluftanlagen auch mit kapazitiven Einkopplungen – zu rechnen. Nach den Erfahrungen der FKH hat sich die Verwendung von Versuchsströmen mit von der Netzfrequenz abweichenden Frequenzen bewährt, da mit einfachen Filtern sehr hohe Unterdrückungsfaktoren für Störsignale erreicht werden können. Eine für diesen Zweck besonders leistungsfähige Filtermethode stellt die mit dem Versuchsstrom phasensynchrone Gleichrichtung (Lock-in-Technik, Empfangsverstärker) dar.

Aus den im Kapitel über die grundsätzliche Problematik der Erdungsmessungen diskutierten prinzipiellen Problemen geht hervor, dass Erdungsmessungen keinen Anspruch auf hohe Genauigkeit erheben kön-

nen, da ein erheblicher Spielraum in der Anwendung der Messverfahren und der Interpretation besteht. Es kann auch nicht das Ziel einer Erdungsmessung sein, ein scharfes Kriterium für «ausreichend» oder «ungenügend» aufgrund einiger weniger Messwerte zu liefern. Die Schwierigkeiten hängen vor allem auch damit zusammen, dass im Rahmen einer Erdungsmessung ein Erdschluss nicht realistisch genug simuliert werden kann. Die Erdungsstromverteilung hängt stets empfindlich von der Wahl der Leitung ab, über welche der versuchsmässige Erdschlussstrom eingespeist wird. Einen wichtigen Faktor in diesem Zusammenhang stellt der bei Wechselstrom stets vorhandene Stromverdrängungseffekt dar, welcher eine stark asymmetrische Strom- und Potentialverteilung im Erdreich erzeugt.

Die Verfahren zur messtechnischen Untersuchung von Erdungssystemen müssen deshalb in Zukunft so gewählt werden, dass möglichst wenig Spielraum für die daraus hervorgehenden Resultate entsteht. Um die Reproduzierbarkeit der Untersuchungsergebnisse an Erdungssystemen zu verbessern, wäre eine Standardisierung der Messmethoden zum Beispiel über die Schaffung einheitlicher Empfehlungen für die Durchführung von Erdungsmessungen sehr zu begrüssen.

### Verdankung

Der Autor dankt allen beteiligten FKH-Mitarbeitern für die geleistete Arbeit im Zusammenhang mit den beschriebenen Messmethoden und Ergebnissen. Besonderer Dank gilt Herrn Dr. Th. Aschwanden für wichtige Anregungen und Ergänzungen zu diesem Artikel.

### Literatur

[1] SEV-Regel 3569-1.1985: Erden als Schutzmassnahme in elektrischen Starkstromanlagen, Teile 1-3.

[2] Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung) vom 30. März 1994.

[3] Erdungen in Starkstromnetzen. Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke m.b.H. - VDEW, Frankfurt am Main; 3. Auflage, 1992.

[4] J. Wiesinger und P. Hasse: Handbuch für Blitzschutz und Erdung, VDE-Verlag GmbH, Berlin, 1982.

[5] F. Schwab: Erdungsmessungen in ausgedehnten Anlagen. Bull. SEV/VSE 71(1980)4, S. 174.

[6] R. Hoffmann: Neues Messverfahren zur Eliminierung von Fremd- und Störspannungen bei Beeinflussungs- und Erdungsmessungen. Elektrizitätswirtschaft 91(1992)22, S. 1455-1462.

[7] W. Koch: Erdungen in Wechselstromanlagen über 1 kV, Berechnung und Ausführung. Springer-Verlag, 2. Auflage, Berlin, 1955.

## La technique de mesure dans le contrôle des grandes installations de mise à la terre

Cet article décrit le problème de l'examen expérimental de grands systèmes de mise à la terre d'installations à haute tension en partie très diverses, et décrit les méthodes de mesure appliquées. En vue d'assurer l'application des exigences relatives à la sécurité des personnes, il suffit en général de saisir les tensions en présence ou de déterminer la tension de mise à la terre d'une installation. On verra cependant que la saisie systématique de la répartition des courants de terre permet en outre d'obtenir d'utiles renseignements sur la situation et l'état de mise à la terre d'une installation à haute tension.