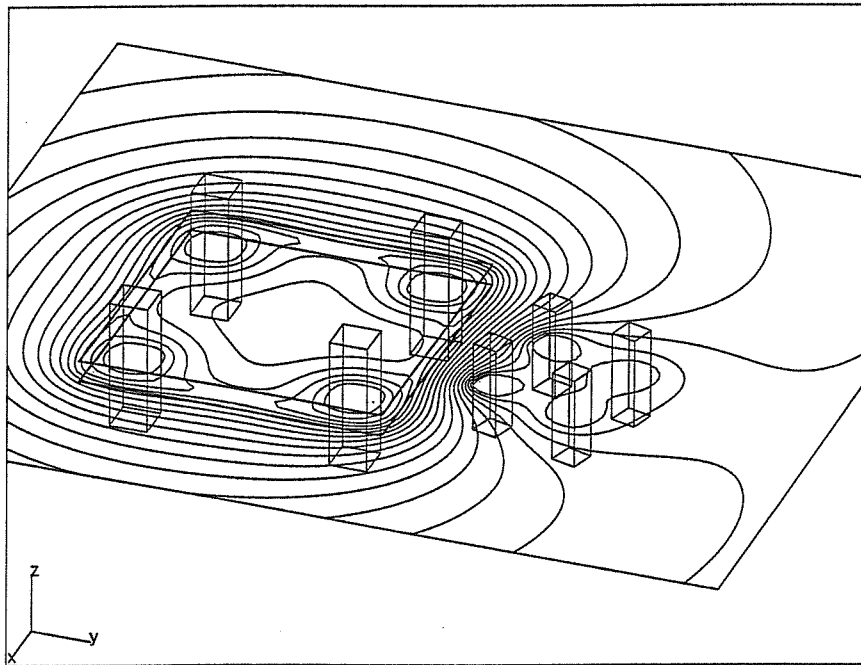


***FKH- / VSE-Fachtagung
20. September 1995
Hotel Union, Luzern***

ERDUNGSSYSTEME VON ENERGIE- VERSORGUNGSANLAGEN

***Anforderungen, Berechnungsmethoden,
neue Messverfahren***



*Aequipotentiallinienbild in der Umgebung von zwei Mastfundamenten,
die sich auf unterschiedlichem Potential befinden.*

VSE-Druckschrift 5.56 d/f

***FKH- / VSE-Fachtagung
20. September 1995
Hotel Union, Luzern***

ERDUNGSSYSTEME VON ENERGIE- VERSORGUNGSANLAGEN

***Anforderungen, Berechnungsmethoden,
neue Messverfahren***

Veranstalter:

***Fachkommission für Hochspannungsfragen, FKH
Voltastrasse 9
8044 Zürich***

***Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke, VSE
Postfach 6140
8023 Zürich***

**FKH- / VSE-Fachtagung
20. September 1995**

ERDUNGSSYSTEME VON ENERGIEVERSORGUNGSANLAGEN

**Anforderungen, Berechnungsmethoden,
neue Messverfahren**

Vorwort

Erdungssysteme von Energieversorgungsanlagen müssen für die sichere Beherrschung von betriebsmässigen Störfällen (z.B. Erdkurzschlüssen) richtig dimensioniert sein und haben dabei insbesondere den gestellten Anforderungen bezüglich der Personensicherheit und der elektromagnetischen Verträglichkeit (z.B. Beeinflussung von Mess- und Steuerkreisen, Kommunikationsnetzen) zu genügen. Die sorgfältige Planung und bauliche Ausführung sowie die Instandhaltung und regelmässige Kontrolle von Erdungsanlagen sind deshalb für den sicheren Betrieb von Energieversorgungsanlagen von grosser Bedeutung.

Die grundsätzlichen Schutzmassnahmen und die sicherheitstechnischen Anforderungen, wie die zulässigen Berührungs- und Schrittspannungen, sind bei Energieversorgungsanlagen im Rahmen der Starkstromverordnung gesetzlich geregelt. Diese Vorschriften stellen bei der Anlagenprojektierung eine Zielvorgabe dar. Die effektive Wirksamkeit der getroffenen Erdungsmassnahmen muss an der fertiggestellten oder umgebauten Anlage in der Regel durch eine Messung nachgewiesen werden.

Die langjährige Betriebserfahrung zeigt, dass mit den heutigen Vorschriften und Erdungskonzepten im Fehlerfall die Gefährdung von Personen zwar äusserst gering ist, dass aber Beeinflussungsprobleme in betroffenen und benachbarten Anlagenbereichen doch noch relativ häufig auftreten.

Die Tagung wendet sich an die Mitgliedunternehmen der FKH und des VSE sowie an alle übrigen Betreiber von Energieversorgungsanlagen und an weitere interessierte Kreise. Das Tagungsziel besteht darin, über bestehende und neue Methoden und Hilfsmittel zur Auslegung sowie zur Untersuchung von Erdungsanlagen zu informieren.

In einer im Tagungsprogramm vorgesehenen offenen Diskussionsrunde besteht für die Teilnehmer die Möglichkeit, spezielle Erdungsprobleme, Ergänzungen und eigene Erfahrungen einzubringen.

TAGUNGSPROGRAMM

- ab 09.15 Empfang der Teilnehmer
 Kaffee und Erfrischungen, Abgabe der Tagungsunterlagen
- 10.00 **Begrüssung durch den FKH-Präsidenten**
 Dr. F. Schwab, Aare Tessin AG für Elektrizität
- 10.10 **Einführung und Abgrenzung der Thematik**
 Dr. Th. Aschwanden, FKH
- 10.20 **Anforderungen und Vorschriften für Erdungssysteme von Starkstromanlagen**
 P. Conrad, Eidgenössisches Starkstrominspektorat, ESTI
- 10.50 **Projektierung und Berechnung von Erdungsanlagen**
 P. Bircher, Bernische Kraftwerke AG
- 11.20 **Neue Möglichkeiten zur messtechnischen Überprüfung von Erdungsanlagen**
 Dr. R. Bräunlich, FKH
- 11.50 **Frage- und Diskussionsrunde**
 Dr. Th. Aschwanden
-
- 12.30 *gemeinsames Mittagessen*
-
- 14.00 **Comportement des mises à la terre vis-à-vis des phénomènes périodiques et transitoires**
 Verhalten von Erdungen bei periodischen und transienten Vorgängen
 H. Sauvain, EMC Fribourg SA
- 14.30 **Ausführungen und Instandhaltung der Erdungsanlagen von Hochspannungseinrichtungen in der Praxis**
 J. Bouvard, Nordostschweizerische Kraftwerke AG
- 15.00 **Aktuelle Erdungsfragen in Mittelspannungsnetzen**
 Dr. R. Schmid, ABB Mittelspannungstechnik AG
- 15.30 **Spezifische Erdungsprobleme bei Bahnanlagen am Beispiel der Neubaustrecke der S-Bahn Zürich**
 M. Lörtscher, SBB, Kreisdirektion III Bauabteilung, El. Anlagen
- 16.00 **Schlussdiskussion**
 Dr. Th. Aschwanden
- ca. 16.30 Ende der Veranstaltung

Tagungsleitung: Dr. Th. Aschwanden, FKH

Tagungsort: Hotel Union, Luzern

Zusammenfassung der Referate

Inhaltsverzeichnis

Anforderungen und Vorschriften für Erdungssysteme von Starkstromanlagen P. Conrad.....	1
Projektierung und Berechnung von Erdungsanlagen P. Bircher.....	6
Neue Möglichkeiten zur messtechnischen Überprüfung von Erdungsanlagen Dr. R. Bräunlich.....	11
Comportement des mises à la terre vis-à-vis des phénomènes périodiques et transitoires Verhalten von Erdungen bei periodischen und transienten Vorgängen H. Sauvain	26
Ausführungen und Instandhaltung der Erdungsanlagen von Hochspannungseinrichtungen in der Praxis J. Bouvard	38
Aktuelle Erdungsfragen in Mittelspannungsnetzen Dr. R. Schmid	41
Spezifische Erdungsprobleme bei Bahnanlagen am Beispiel der Neubaustrecke der S-Bahn Zürich M. Lörtscher	47
Literatur zum Thema	55
Teilnehmerliste.....	57

Anforderungen und Vorschriften für Erdungssysteme von Starkstromanlagen

Paul Conrad

Eidgenössisches Starkstrominspektorat (ESTI)
Luppenstr. 1, 8320 Fehraltorf

1. Grundsätzliche Anforderungen an Erdungssysteme von Starkstromanlagen

Die grundsätzlichen Anforderungen an Erdungssysteme sind in Art. 53 der Starkstromverordnung vom 30. März 1994 umschrieben. Ein Erdungssystem hat demnach die Aufgabe, die Gefährdung von Personen durch Berührungs- und Schrittspannungen und von Sachen durch Fehler- oder Erdschlussströme zu vermindern.

Die Erdungsanlagen müssen dabei gemäss Art. 60 so bemessen und angeordnet sein, dass die nach Kurve im Anhang 4 der Verordnung zulässigen Werte nicht überschritten werden. Ausserdem sind Erder und Erdungsleiter so zu dimensionieren, dass sie den dynamischen und thermischen Beanspruchungen, die durch den höchsten am Fehlerort voraussehbaren Strom auftreten, gewachsen sind. Dabei sind auch die Korrosionsprobleme zu beachten.

2. Die gesetzlichen Bestimmungen der Starkstromverordnung (STVO) vom 30. März 1994

Die zulässigen Berührungsspannungen, die bei einem Erdschluss in einer Starkstromanlage auftreten dürfen, sind in Art. 54 festgehalten (siehe Kurve Anhang 1).

Für die Erdung von Tragwerken gelten je nach Standort gewisse Erleichterungen, wobei hierfür die Anwesenheits-Wahrscheinlichkeit berücksichtigt worden ist.

Für Schrittspannungen werden in der neuen STVO keine Grenzwerte vorgeschrieben. In besonderen Fällen sind jedoch Massnahmen zur Beschränkung von Schrittspannungen anzuwenden.

In den weiteren Art. 55 bis 59 werden die speziellen Bedingungen für die Erdung in Niederspannungsanlagen, sowie weitere Details für die Erdung in Hochspannungsanlagen und von Leitungsbestandteilen festgehalten. Die Kontrolle der Erdungsanlagen hat gemäss Art. 61 nach den anerkannten Regeln der Technik zu erfolgen.

3. Vergleich mit den Bestimmungen im Entwurf der EN-Norm 50179/94

Dieser Entwurf ist verglichen mit den schweizerischen Normen SEV 3569-1 bis 3 relativ kompliziert und für den Praktiker eher schwer verständlich. Unsere Normen stehen aber grundsätzlich, abgesehen von Details nicht im Widerspruch zur EN-Norm.

Ein wesentlicher Unterschied besteht allerdings in Bezug auf die zulässigen Berührungsspannungen. Diese liegen beim EN-Entwurf wesentlich höher, d.h. der dauernd zulässige Wert

wurde auf 75 V statt wie bei uns auf 50 V festgelegt. Bei Berücksichtigung von Zusatzwiderständen im Stromkreis wären sogar noch höhere Werte zugelassen.

Die Minimaldimensionen für Erder und Erdungsleiter liegen im EN-Entwurf wesentlich tiefer und die Verschlechterung der Erdungsimpedanz durch Erwärmung des Erdreiches wird nicht berücksichtigt.

Für die Messung von Berührungsspannungen wird ein Strom-Spannungs-Messverfahren vorgeschrieben, was für kleinere Anlagen einen völlig unverhältnismässigen Aufwand bedeuten würde.

Im Gegensatz zur SEV-Norm 3569-3 werden in der EN-Norm auch die komplizierteren Messmethoden für grössere Anlagen beschrieben.

4. Messmethoden zu Überprüfung von Erdungen kleinerer und mittlerer Anlagen in Verteilnetzen gemäss SEV-Norm 3569-3.1986

Erdungen von kleineren und mittleren Anlagen können ohne weiteres mit den handelsüblichen Erdungsmessern überprüft werden, wobei obige Norm als Grundlage dient.

Während in ländlichen Gebieten mit genügend freiem Gelände ohne Probleme die eigentlichen Erdungsimpedanzen bestimmt werden können, ist dies in dicht überbauten Gebieten mit diesen einfachen Mitteln praktisch nicht möglich. In diesen Fällen genügt es jedoch, wenn mittels einer Schleifen-Widerstandsmessung der einwandfreie Leitwert der Erdungsleiter inklusive Anschlussstelle am Erder bestätigt wird.

5. Praktische Hinweise zur Durchführung von Erdungsmessungen an kleineren und mittleren Anlagen

Wichtig ist, dass der Hilferder tatsächlich in "neutralem" Terrain, d.h. weit genug weg von der Anlage gesteckt wird, so dass sich die beiden Spannungstrichter von Erder und Hilferder nicht gegenseitig beeinflussen. Die Spannungskurve dazwischen muss über eine grössere Strecke flach verlaufen, damit die Sonde tatsächlich in diesem flachen Bereich gesteckt werden kann. Die in den meisten Bedienungsanleitungen für Erdungsmesser angegebenen Distanzen von 20 und 40 m zum Stecken von Sonde und Hilferder sind völlig ungenügend.

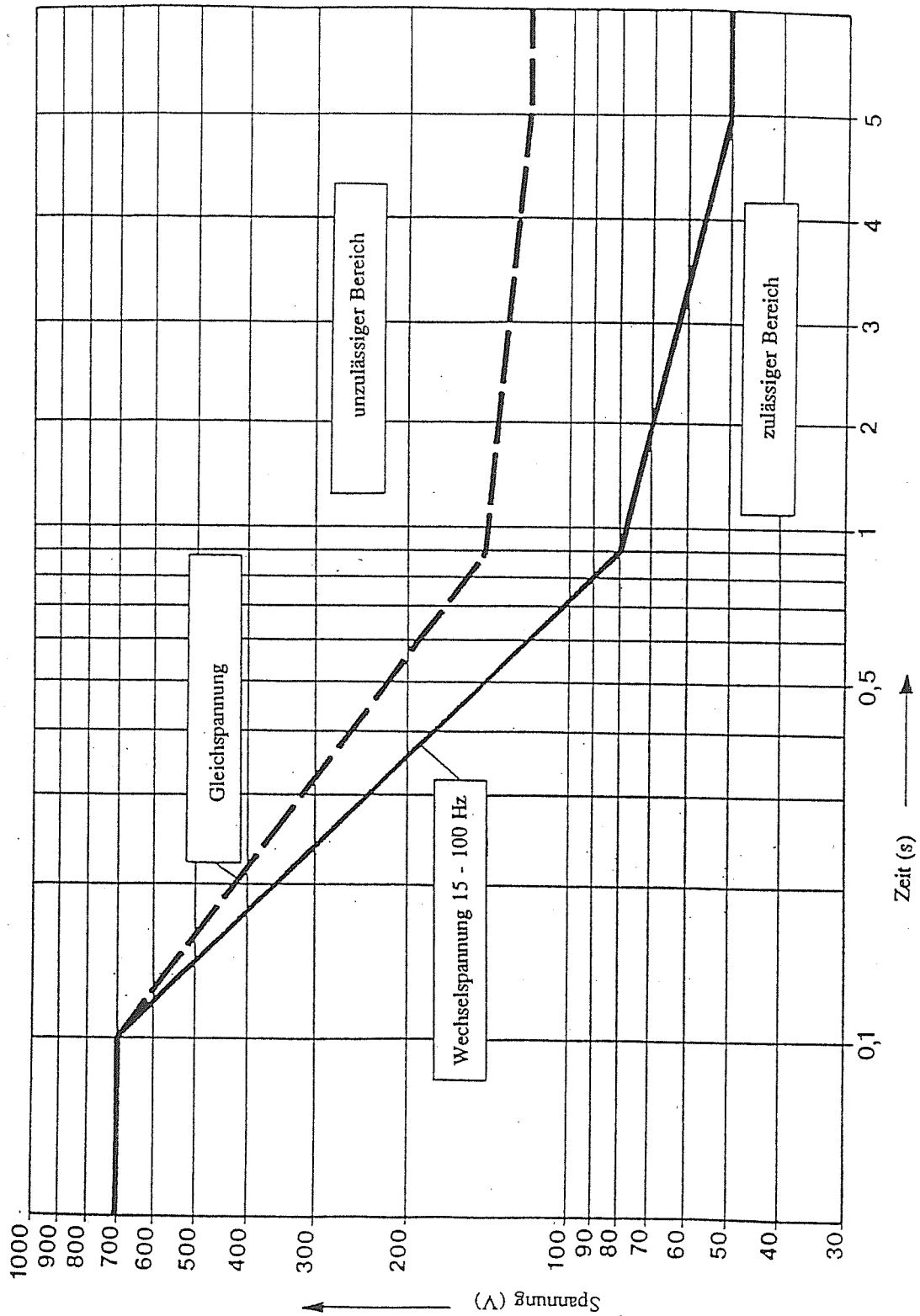
Selbstverständlich muss auch darauf geachtet werden, dass im Bereich von Sonde und Hilferder keine anderen leitenden Objekte im Boden vorhanden sind.

6. Literaturhinweise

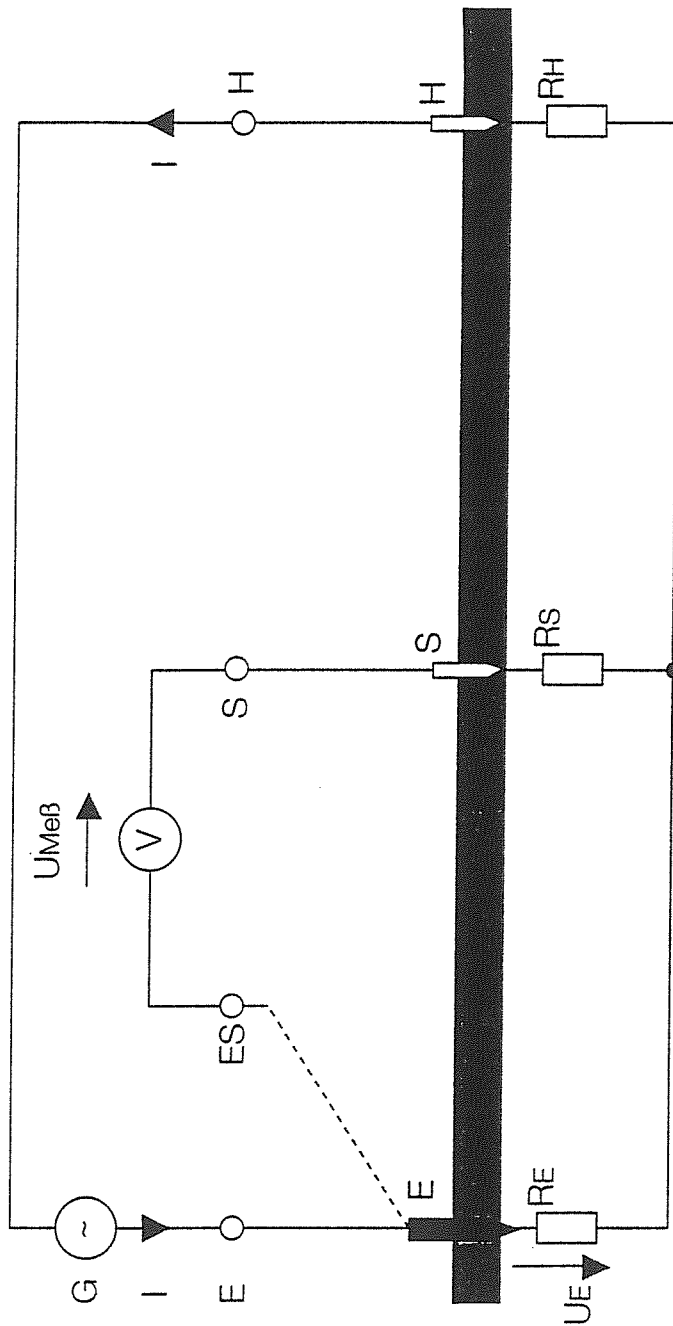
- [1] Starkstromverordnung vom 30. März 1994
- [2] SEV-Normen 3569-1.1985 "Erden als Schutzmassnahme in
 3569-2.1987 elektrischen Starkstromanlagen"
 3569-3.1986
- [3] Entwurf EN-Norm 50179.1994 "Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV"

Anhang 1

Zulässige Berührungsspannungen

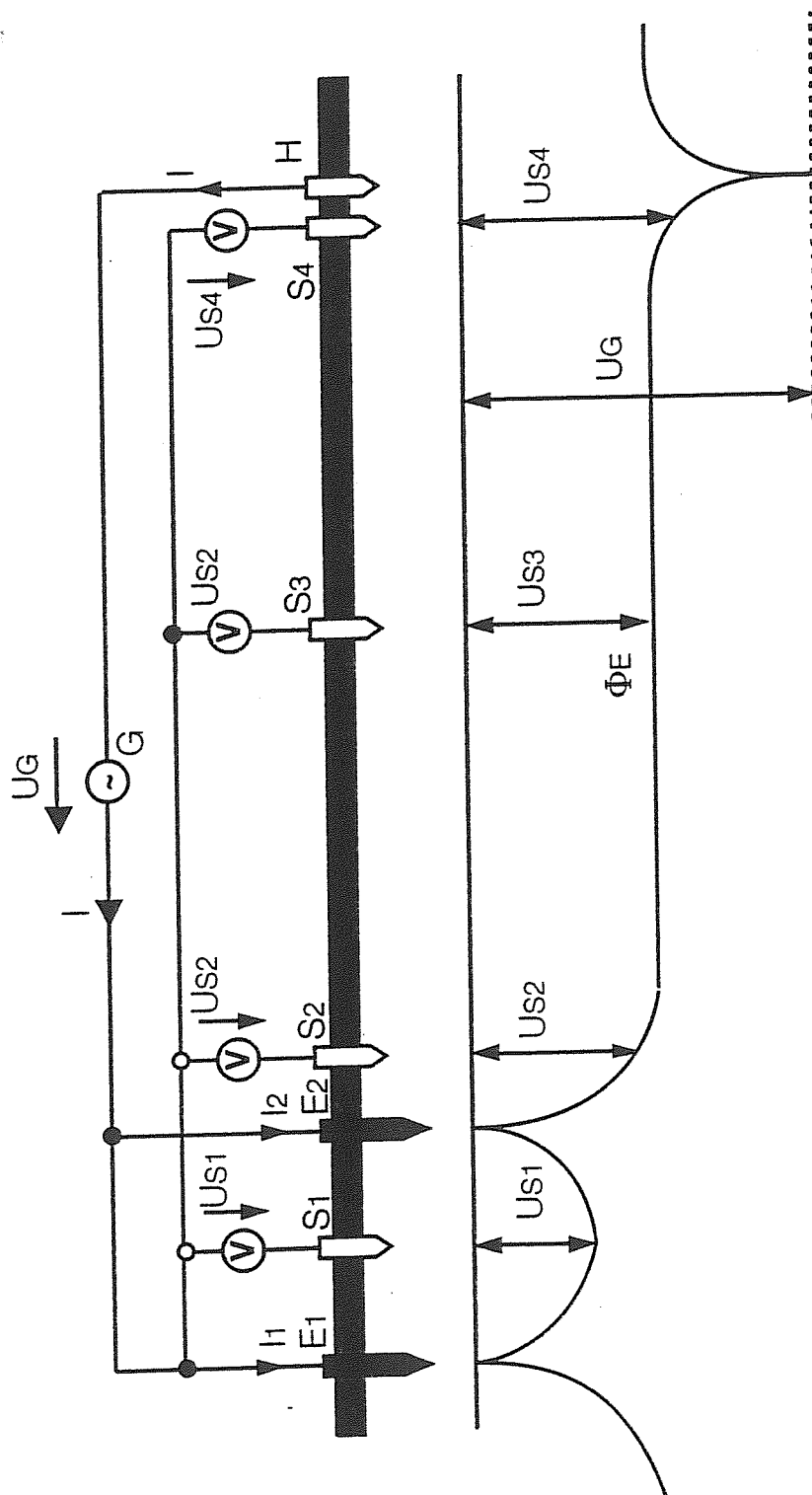


Anhang 2



Messprinzip eines Erdungsmessgerätes

Anhang 3



Einfluss der Spannungstrichter auf die Erdungswiderstandsmessung

Projektierung und Berechnung von Erdungsanlagen

Peter Bircher

BKW Energie AG

Viktoriaplatz 2, 3000 Bern 25

1. Einleitung

Das Referat befasst sich mit der Auslegung und Berechnung von Erdungsanlagen. Das Ziel der optimalen Dimensionierung einer Erdungsanlage ist es, die Beeinflussung der Umwelt durch Erdkurzschlussströme und die dabei auftretenden Einwirkspannungen auf ein erträgliches Mass zu reduzieren. Dabei müssen die Forderungen der Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung) [1] eingehalten werden.

2. Grundlagen für die Berechnung der Erdung von Hochspannungsanlagen

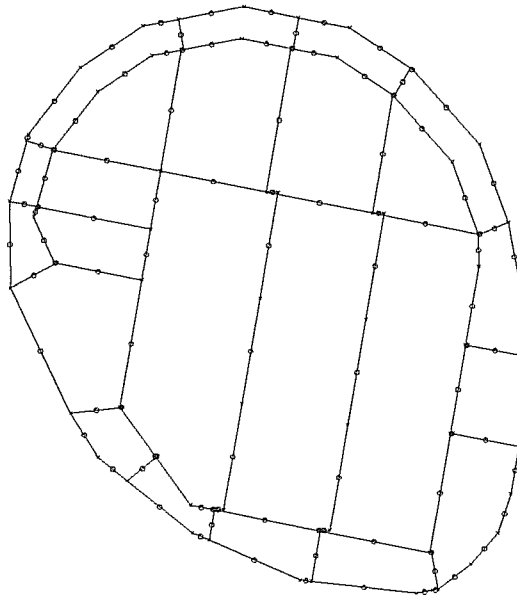
Eine massgebende Grösse für die Beurteilung der Erdung einer Hochspannungsanlage ist der spezifische Erdbodenwiderstand. Er ist von der Bodenzusammensetzung, der Bodenfeuchtigkeit und der Temperatur abhängig und kann in einem weiten Bereich schwanken. Die Messung des spezifischen Erdwiderstandes erfolgt mit einem Erdungsmessgerät. Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Leitfähigkeit des Erdreiches ist die Messung mit dem Schlumberger-Wenner-Verfahren [2]. Zur Auslegung des Erdnetzes wird anhand der Anlagendisposition das Maschenerdnetz mit den Hauptelektroden und den Steuerelektroden festgelegt. Bei schlechten Erdungsverhältnissen und an besonders exponierten Stellen werden noch zusätzlich senkrechte Erderstäbe vorgesehen, welche ins Erdreich eingeschlagen werden und mit den Maschenerdnern verbunden sind. Ausgehend vom einphasigen Erdkurzschlussstrom, welcher mit einer Netzberechnung ermittelt wird, lässt sich der Erderstrom der Anlage im Erdungsschema berechnen.

Beim Engineering der Erdungsanlagen, vom einfachen Leitungsmast bis zum komplexen Maschenerdungsnetz einer Grossanlage, ist als weiteres wichtiges Auslegungskriterium auf eine gute Erdungskonzeption mit klar strukturierten EMV-Grundsätzen zu achten.

3. Das Erdungsberechnungsprogramm der BKW Energie AG

Für die Potentialberechnung stützen sich unsere Grundlagen auf eine WiderstandskoeffizientenMatrix-Betrachtung, welche es erlaubt, nach der Charge-Simulation-Methode in aufgetrennten Erderstäben nach H. Steinbigler [3], den Potentialverlauf zwischen Anlageerdung und Bezugserde zu ermitteln. Dem Programm sind selbstverständlich gewisse Grenzen gesetzt. Diese rühren vor allem von den Modellvorstellungen (Erdleiter- und Maschenerdnetzmodell, Erdbodenmodell), von welchen das vorgestellte Computerprogramm ausgeht, her. Weiter handelt es sich bei den theoretischen Überlegungen um symmetrisch verteilte Erdkurzschluss-Strombetrachtungen und um lineare, statische Potentialfeldberechnungen. Das Programm selbst wurde an der ETH Zürich am Institut für Hochspannungstechnik entwickelt [4]. Durch diverse Optionen konnte das Programm für die Berechnung so ausgelegt werden, dass es heute dem projektierenden Ingenieur ermöglicht, mittels verschiedener Nachkalkulationen, eine Erdungsanlage zu optimieren.

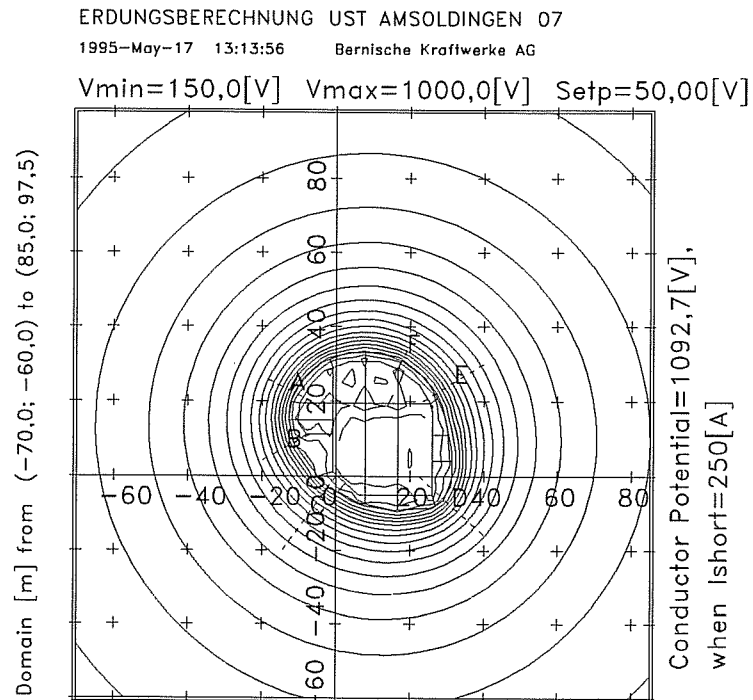
ERDUNGSBERECHNUNG UST AMSOLDINGEN 07
1995-May-17 13:12:01 Bernische Kraftwerke AG



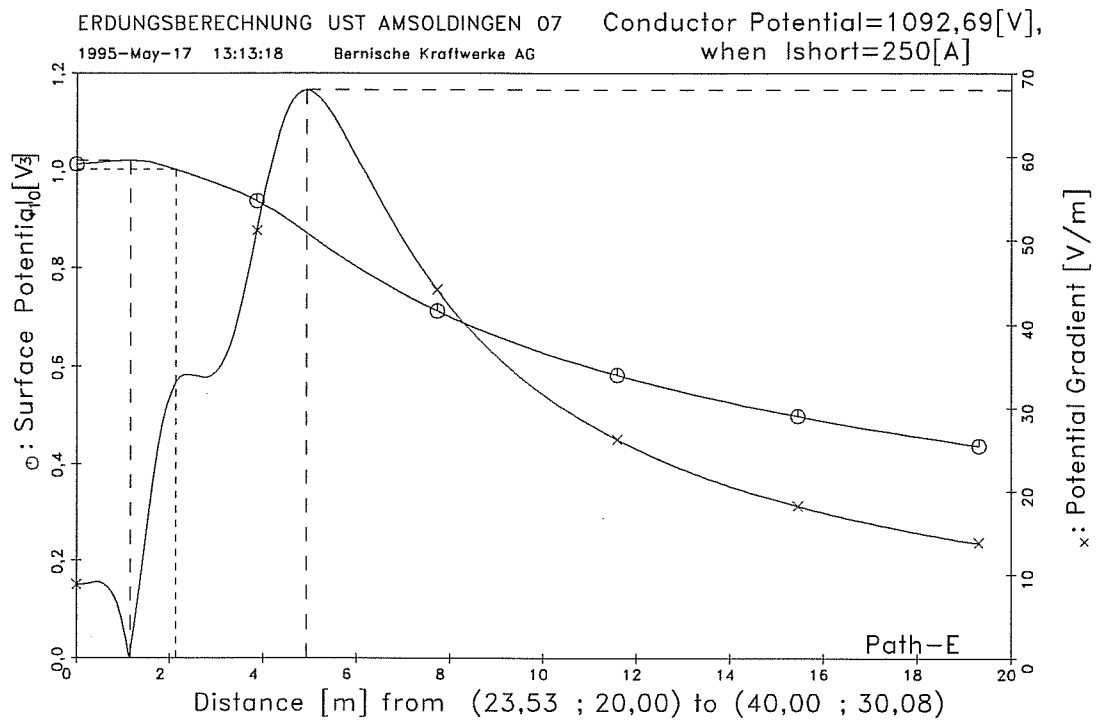
Figur 1: Beispiel eines Maschenerdnetzes einer Unterstation

So können mit dem neuen Programm unter anderem die folgenden Faktoren berücksichtigt werden, welche es erlauben, eine relativ gute Annäherung der Berechnung an die Wirklichkeit und somit eine gute Übereinstimmung mit der nachträglichen Messung zu erreichen:

- Berechnung beliebig fein wählbarer Aequipotentialkurven
- beliebige Zoombarkeit kritischer Stellen
- einstellbare, sehr hohe Rechengenauigkeit
- Möglichkeit der Berechnung eines Maschenerdnetzes mit verschiedenen horizontalen Ebenen
- Eingabe einer beliebigen Anzahl verschieden langer senkrechter Erderstäbe
- Ausgabe einer unbegrenzten Anzahl frei wählbarer Schnitte mit automatischem Eintrag der maximalen Einwirkspannungswerte. Dabei werden die Schrittspannungsverläufe unter der Angabe des Maximalwertes für einen bestimmten Schnitt grafisch angezeigt. Weiter wird der Maximalwert der Berührungsspannung, welcher aus der Differenz zwischen dem Wert des Potentials an der Erdoberfläche und der Erderspannung gebildet wird, berechnet und ebenfalls grafisch dargestellt (siehe dazu Figur 3).
- Möglichkeit der Berücksichtigung von unterschiedlichen spezifischen Widerständen und unterschiedlichen Erdleiterquerschnitten
- Möglichkeit der Berücksichtigung an der Erdung nur indirekt beteiligter, erdfühlicher Anlagen, wie z.B. Gebäudefundamente, metallische Wasser- oder Gasleitungen u.a.m.



Figur 2: Beispiel eines Aequipotentialkurvenplanes einer Unterstation



Figur 3: Beispiel eines Schnittes mit dem Potential- und Schrittspannungsverlauf

4. Messung von Erdpotentialfeldern

Mit Hilfe einer Erdungsmessanlage, welche im wesentlichen aus einem Einphasen-Stufentransformator besteht, wird ein Messstrom über eine ausser Betrieb gesetzte Hochspannungsleitung in eine benachbarte Anlage gespeist. Die dreiphasig kurzgeschlossene Hochspannungsleitung wird in dieser benachbarten Gegenstation geerdet. Mit hochohmigen und hochempfindlichen Voltmetern kann nun der Potentialverlauf in verschiedenen von den Hochspannungsanlagen ausgehenden Ebenen der zu messenden Station (und auch derjenige von der Gegenstation) aufgenommen werden. Ferner werden die Berührungsspannungen an metallischen Teilen inner- und ausserhalb der untersuchten Anlage gemessen.

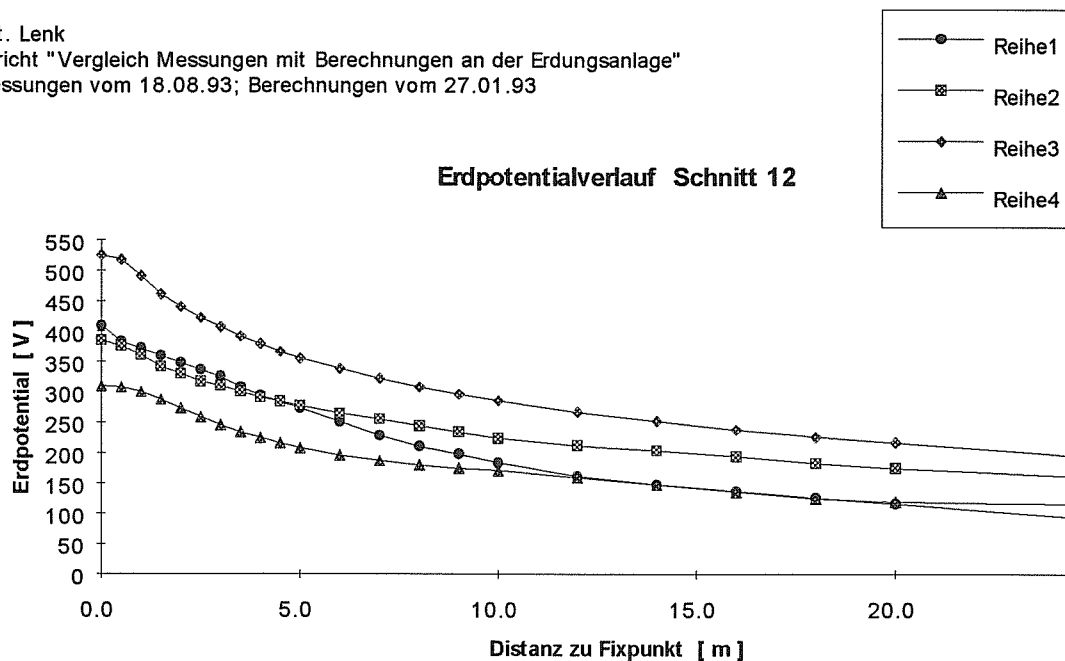
5. Vergleich der Berechnungen mit den Nachmessungen

Dank den diversen Optionen, welche das Erdungsberechnungsprogramm anbietet, kann eine gute Übereinstimmung zwischen den vorausberechneten Werten und den Nachmessungen erreicht werden. Dies kann durch Beispiele belegt werden (siehe dazu Figur 4).

Ust. Lenk

Bericht "Vergleich Messungen mit Berechnungen an der Erdungsanlage"

Messungen vom 18.08.93; Berechnungen vom 27.01.93



Figur 4: Erdpotentialverlauf in einem Schnitt

Vergleich Berechnung mit Nachmessung

Reihe 1: Nachmessung

Reihe 2: Berechnung mit Berücksichtigung eines zweiten spezifischen Erdwiderstandes in der Tiefe

Reihe 3: Berechnung mit Maximalwerten durch Kalenderfaktor

Reihe 4: Berechnung mit Berücksichtigung nur eines spezifischen Erdwiderstandes

Die obige Betrachtung zeigt die Problematik der genauen Kenntnis des Untergrundes.

Weitere mögliche Abweichungen beim Vergleich mit den Messungen können von Nichtlinearitäten (Stromdichteabhängigkeiten der Erdübergangswiderstände) und von Stromverdrängungseffekten herrühren.

6. Schlussfolgerungen

Die Anwendungen des Erdungsberechnungsprogrammes, zusammen mit den Erfahrungen der Auslegung von Erdungsanlagen, erlaubt es dem projektierenden Ingenieur, ein Erdnetz einer elektrischen Anlage bereits im voraus zu optimieren. Damit kann verhindert werden, dass anhand der Resultate von Nachmessungen an der fertigen Anlage allfällig notwendig werdende teure Sanierungsmassnahmen an der Erdungsanlage getätigt werden müssen.

7. Literaturhinweis

- [1] Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung) vom 30. März 1994
- [2] W. Baeckmann: "Messung des spezifischen Bodenwiderstandes nach dem Schlumberger-Wenner-Verfahren". Mitteilungsorgan des Deutschen Verbandes des Gas- und Wasserfaches (GWF), Vol. 101 (1960), Heft 49, S. 1265 - 1273
- [3] H. Singer, H. Steinbigler and P. Weiss: "Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields". IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-93, pp. 1660 - 1668, 1974
- [4] S. Sato, W.S. Zaengl: "Effective Grounding Mesh Calculation Technique". IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, pp. 173-182, 1988

Neue Möglichkeiten zur messtechnischen Überprüfung von Erdungsanlagen

Reinhold Bräunlich

Fachkommission für Hochspannungsfragen, FKH
Voltastr. 9, 8044 Zürich

1. Ziel von Erdungsmessungen

Erdungsmessungen dienen generell dazu, die Wirksamkeit von Erdungsanlagen zu überprüfen. Eine Anlagenerdung gilt dann als wirksam ausgelegt, wenn in ihrem Einflussbereich 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: "Erden als Schutzmassnahme in elektrischen Starkstromanlagen" [1] bzw. in der geltenden Starkstromverordnung (Ausgabe März 1994) [2] im einzelnen formuliert. Neu erstellte oder modifizierte Anlagen müssen diesbezüglich mittels *Erdungsmessungen* überprüft werden. Bei bestehenden Anlagen ist eine Untersuchung der Erdungsanlage alle zehn Jahre zu wiederholen.

Die bei Erdungsmessungen zu überprüfenden Anforderungen an Erdungsanlagen beinhalten daher in erster Linie die gesetzlich geregelte Einhaltung maximaler *Einwirkspannungen* zur Gewährleistung der *Personensicherheit* und zur Einschränkung von Beeinträchtigungen fremder technischer Einrichtungen. Darüber hinaus wünscht der Anlagebetreiber in eigenem Interesse oft noch eine weitergehende Untersuchung der Erdungsanlage. Im Zentrum stehen dabei Abklärungen zur Vermeidung von *Beeinflussungen* bzw. *Überlastungen* eigener Leitungen und Betriebseinrichtungen oder Untersuchungen zur Minimierung von Energieverlusten im Erdungssystem (Fragen des *ökonomischen Betriebs*).

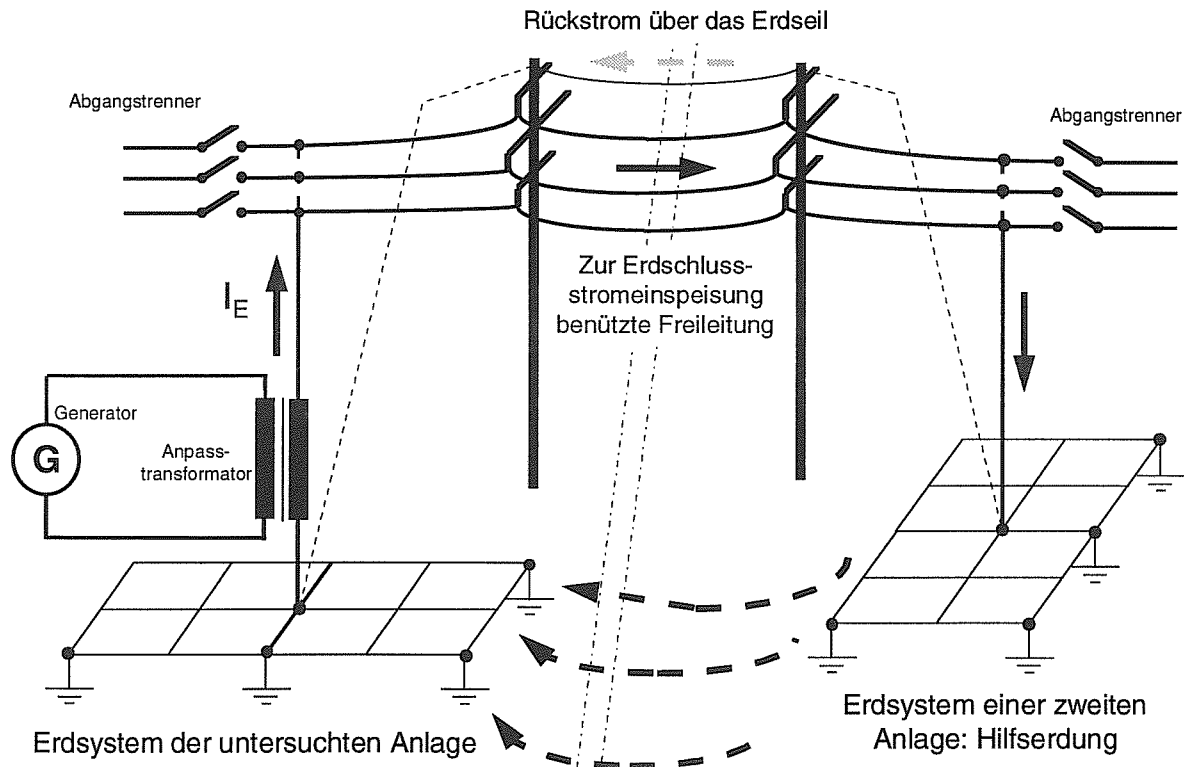
Mit den im folgenden beschriebenen Erdungsmessmethoden können im wesentlichen Erdungsfragen betreffend die *netzfrequenten Vorgänge* untersucht werden. Dazu gehören im weitesten Sinn die Überprüfung der Erdungsanlage im Erdschlussfall aber auch die Behandlung gewisser Beeinflussungsfragen im Bereich der Betriebsfrequenzen. Zur messtechnischen Untersuchung eines Erdsystems ist es erforderlich, an ausgesuchten Orten der Erdungsanlage die durch Erdschlussströme entstehenden *Spannungsabfälle und die Ausgleichsströme* zu erfassen und auszuwerten.

Ein wichtiger und aufwendiger Teil der messtechnischen Untersuchung einer Erdungsanlage ist eine *Analyse* der Erdungssituation aus einer Vielzahl der gemessenen Spannungs- und Stromwerte und die Ausarbeitung von Schlussfolgerungen und *Optimierungsmassnahmen*.

2. Einspeisung des Erdschlussstroms, Bildung der Erdschlussstromschleife

Die messtechnische Untersuchung der Potentialverteilung um eine Erdungsanlage im Erdschlussfall beruht im wesentlichen stets auf einer Strom-Spannungsmethode: Dabei wird ein definierter Erdschluss-Strom I_E (einige A bis einige 100 A) mit einer einphasigen

Wechselstrom- oder Impulsstromquelle erzeugt und in eine definierte Erdschluss-Schleife eingespeist, welche die zu untersuchende Erdungsanlage beinhaltet. Bei grösseren Anlagen wird für die Erdschlusschleife nach Möglichkeit eine ausser Betrieb genommene Freileitung oder Kabelleitung verwendet, welche in einer Gegenstation geerdet wird (vgl. Figur 1). Die Entfernung zwischen den beiden Unterwerken muss ausreichend gross sein, so dass eine gegenseitige Beeinflussung der Erdungssysteme ausgeschlossen werden kann. Um die Erdschluss-Schleifenimpedanz bei den notwendigen Distanzen zu reduzieren, werden die Phasen der Freileitungen oder Kabelleitungen, über welche die Erdschlusseinspeisung erfolgt normalerweise parallel geschaltet.



Figur 1 Erdschluss-Schleife über die Erdsysteme zweier Unterwerke unter Benutzung einer Freileitung.

Durch den Schleifenstrom wird das Potential des untersuchten Erdungssystems um die Erdungsspannung U_E angehoben, die in Form eines **Potentialtrichters** von der äusseren Begrenzung der Erdungsanlage mit zunehmender Entfernung abfällt. Die in diesem Potentialtrichter befindlichen Objekte liegen in einem Spannungsgradienten und weisen somit Spannungsdifferenzen gegenüber der Umgebung auf, welche als **Einwirkspannungen** mit geeigneten Voltmetern gemessen werden können¹⁾.

Die in der versuchsmässig eingerichteten Erdschlusschleife erzeugten Ströme fliessen (wie auch im Erdschlussfall) **nicht ausschliesslich durch das Erdreich** zur Gegenerde zurück, sondern nehmen ihren Weg zu einem wesentlichen Anteil über Erdleiter und Kabelschirme von

1) Auch um das für die Gegenerde (Hilfserde) verwendete Erdsystem bildet sich ein Potentialtrichter aus. Es können somit nach Inbetriebnahme einer Erdschlusschleife beide Erdsysteme gleichermassen untersucht werden.

Leitungsabgängen. Auch andere ausgedehnte leitfähige Strukturen in der Umgebung der Erdungsanlage wie z.B. Rohrleitungen, Bahnanlagen, Telecomleitungen führen Erdungsströme. Die Erfassung dieser leitungsgebundenen Erdungsströme ist ebenfalls Bestandteil einer Erdungsmessung.

Alle Messergebnisse (Einwirkspannungen und Erdleiterströme) werden nachträglich auf den **maximalen Erdschlussstrom** der untersuchten Anlage hochgerechnet. Der maximale Erdkurzschlussstrom einer Hochspannungsschaltanlage entsteht normalerweise bei einem Erdfehler an einer Sammelschiene und ist vom Schaltzustand der Anlage abhängig.

Bei **kleinen Erdungsanlagen**, beispielsweise bei Transformatorenstationen und bei einzelnen Masten, 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.

Bei **grösseren Erdungsanlagen** von Unterwerken und Kraftwerksanlagen wird eine Stromquelle von einigen 10 A bis einigen 100 A benötigt. Die Quelle wird zwischen der untersuchten Anlagenerde und dem Abgang einer ausserbetriebgesetzten Leitung geschaltet, welche in der Gegenstation geerdet wird. Die FKH verwendet dazu ein mobiles 100kVA-Diesel-Aggregat. Der integrierte Asynchrongenerator gibt an den Klemmen eine Ausgangsspannung von ca. 500 V ab. Zur Anpassung an die jeweilige Impedanz der Versuchsleitung wird zwischen Generator und Erdschluss-Einspeisestelle ein Anpasstransformator geschaltet.

3. Methoden zur Eliminierung von Störspannungen

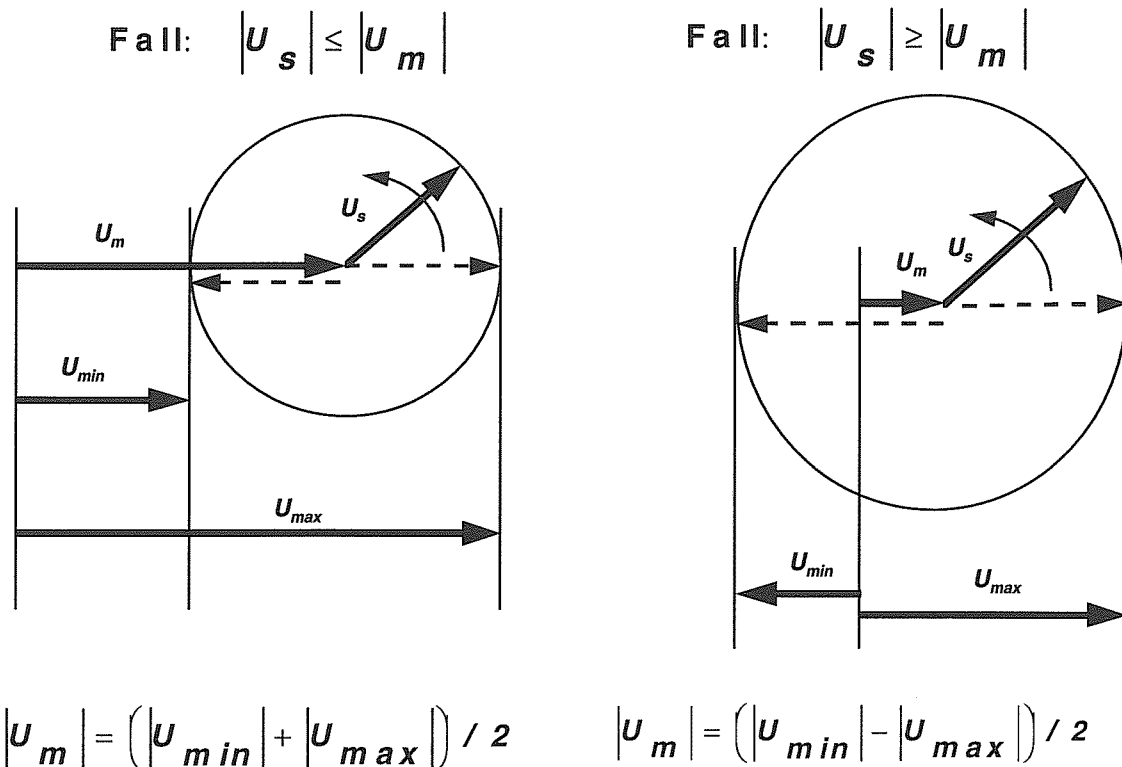
Da Schaltanlagen und Kraftwerkszentralen normalerweise während den Erdungsmessungen in Betrieb stehen, können durch ohmsche oder induktive Kopplung Störspannungen in die Versuchsstromschleife oder die Messschleife eingekoppelt werden. Die Überlagerung solcher Störspannungen führt leicht zu wesentlichen Messwertverfälschungen, wenn sie nicht durch geeignete Massnahmen eliminiert werden [3,4].

Nebst den betriebsfrequenten Störsignalen der Starkstromanlage (50 Hz bzw. $16\frac{2}{3}$ Hz) können auch Netzoberwellen und Gleichströme zu Messfehlern führen.

Als Massnahmen gegen die Störspannungen seien folgende Methoden genannt:

1. Schwebungsmethode
2. Ein/Aus-Methode
3. Umpolmethode
4. Vektordolmeter, Synchronleichrichter, Einfangverstärker
5. Wahl einer von der Netzfrequenz abweichenden Frequenz, Filterung der Störfrequenzen

Bei der **Schwebungsmethode** (Methode 1) 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 Schwebungseffekt, der die Anzeige des Erdungsmessgeräts zwischen einem Maximalwert U_{max} und einem Minimalwert U_{min} schwanken lässt. Die Messspannung errechnet sich aus den Extremwerten des Anzeigeinstruments gemäss Figur 2.

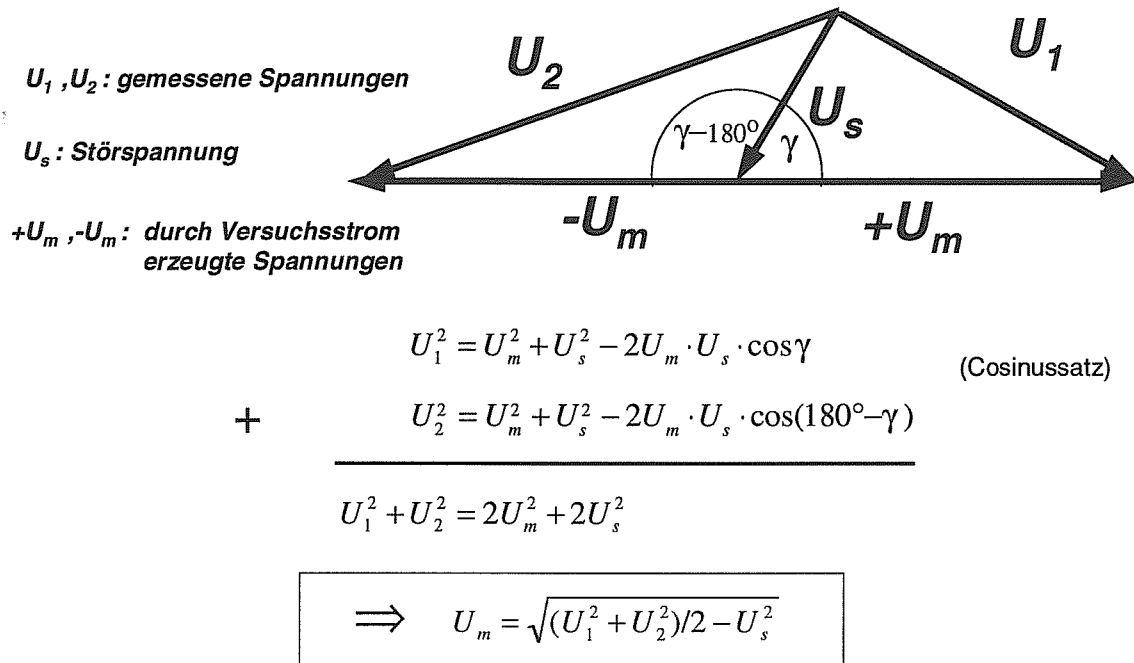


Figur 2 Zeigerdiagramme für die Bestimmung der Messspannung mit der Schwebungsmethode durch Eliminierung von netzfrequenten Störeinkopplungen für den Fall, dass die Messspannung grösser ist als die Störspannung und den Fall, dass die Messspannung kleiner ist als die Störspannung.

Bei der *Ein/Aus-Methode* und der *Umpolmethode* (Methoden 2 und 3) 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 und U_2 bei negativer Polarität).

Während bei der Ein/Aus-Methode und Messung mit Voltmetern nur eine obere Grenze für den Messfehler angegeben werden kann, besteht bei der Umpolmethode eine eindeutige Beziehung zwischen den drei Messwerten und der durch den Versuchsstrom hervorgerufenen Messspannung U_m (siehe Figur 3).

In jüngster Zeit wurde auch eine Ein/Aus-Methode mit Computer-Mess- und Auswertesystem vorgestellt, welches eine wirkungsvolle Eliminierung der Störeinflüsse ermöglicht [5].



Figur 3 Zeigerdiagramme für die Bestimmung der Messspannung bei der Umpolmethode durch Eliminierung von netzfrequenten Störeinkopplungen aus der Störspannung und den Messwerten für die beiden Polaritäten der Versuchsstromquelle.

Die FKH hat in der Vergangenheit mit den Methoden 1,2,4 und 5 einige Erfahrungen gesammelt. In den letzten Jahren hat sich die Methode 5 (Verwendung einer von der Netzfrequenz abweichenden Frequenz für den Versuchsstrom) bestens bewährt. Sie wird in einzelnen Fällen in Kombination mit der Methode 4 (Synchrongleichrichtung) verwendet.

Zur Erzeugung des Versuchsstromes verwendet die FKH einen Asynchrongenerator, welcher bei ca. 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 verwendet die FKH geeignete **hochselektive Filter**, welche eine Beeinflussung der Messresultate durch den 50 Hz-Anlagenbetrieb oder auch durch 16²/3 Hz-Bahnströme ausschliessen.

Zur Messung von Stromverteilungen wurden bei der FKH auch **Einfangverstärker bzw. Synchrongleichrichter** (Methode 4) verwendet, 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.

<i>Methode</i>	<i>Frequenz</i>	<i>Messung</i>	<i>Vorteile</i>	<i>Nachteile</i>
1. Ein/Aus-Methode	beliebig	Zweimalig ohne Filter	Einfachheit	keine Fehlereliminierung, nur Fehlerabschätzung
2. Umpolmethode	Netzfrequenz	Dreimalig ohne Filter	eindeutige Ermittlung von Messspannungen, Messung bei Netzfrequenz	Keine Eliminierung von Oberwellen, dreimalige Messung
3. Schwebungsmethode	Abweichung von der Netzfrequenz < 1 Hz	Messzeit einige Sekunden ohne Filter	Messung bei nahezu Netzfrequenz	Auswertung nicht immer eindeutig
4. Vektorvoltmeter, Empfangverstärker	beliebig	Einmalige Messung mit Spezialmessgerät	Unterdrückung sämtlicher Störungen	Referenzsignal der Versuchsstromquelle nötig
5. Filterung der Störfrequenzen	Abweichung von der Netzfrequenz > 10 Hz	Einmalige Messung mit Filter	Unterdrückung sämtlicher Störungen	Messfrequenz entspricht nicht Netzfrequenz

Tabelle 1 Zusammenstellung der Eigenschaften, der Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden zur Unterdrückung von Störeinkopplungen bei Erdungsmessungen.

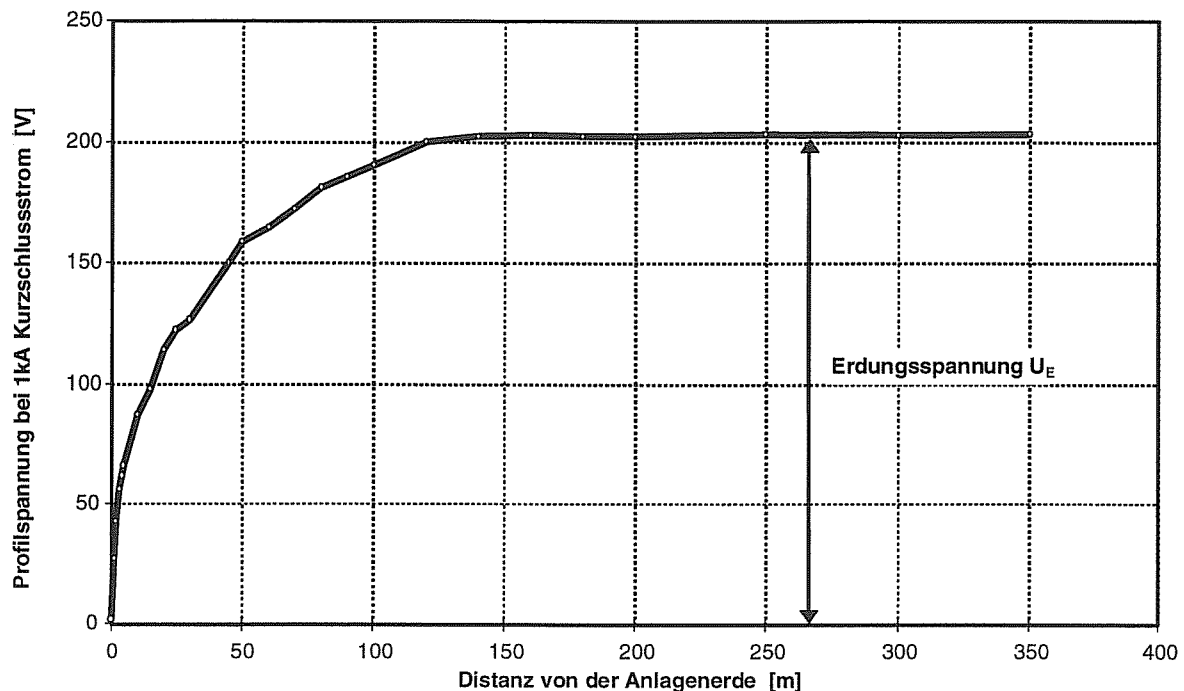
4. Ermittlung von Spannungsprofilen und Erdungsimpedanzen

Zur genaueren Beurteilung von Erdungsanlagen kann der Verlauf von Erdungsspannungsprofilen bzw. von Erdungsspannungstrichtern herangezogen werden. Zur Ermittlung eines Profils des Spannungstrichters werden Spannungsdifferenzen zwischen der Anlagenerde (Referenz) und einer in den Erdboden gesteckten Mess-Sonde an definierten Stellen (z.B. 1 m, 5 m, 10 m, 100 m Distanz zur Anlage) entlang einer vorgegebenen Profil-Richtung gemessen (siehe Figur 4).

Aus dem Verlauf eines Spannungsprofils kann vor allem der Anlagen-Übergangsbereich bzw. die Wirksamkeit von Potentialsteuerungsmassnahmen einer Erdungsanlage beurteilt werden. Insbesondere sind hier die *Spannungs-Gradienten* direkt ersichtlich. Die auftretenden Schritt-Spannungen können als Spannungsdifferenzen aus 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 hervorrufenden Erdungsstrom I_E , bzw. Mess-Strom I_M :

$$Z_E = U_E / I_E$$



Figur 4 Beispiel eines gemessenen Spannungstrichterprofils.

5. Messung von Berührungs-, Schritt- und Differenzspannungen

Bei der Messung von **Berührungs-** und **Schrittspannungen** wird die Spannungsdifferenz in 1 m Abstand zum betrachteten leitfähigen Objekt mit Potential-Sonden bzw. Mess-Kabeln abgegriffen. Als Potential-Sonden für die Kontaktierung im Erdreich dienen ca. 10 bis 20 cm tief in den Boden gesteckte Stahlspieße (Stichel). In bestimmten Fällen wurden auch **Differenzspannungen** zwischen zwei berührbaren, metallisch leitenden Objekten (z.B. zwischen Metallpfosten, Kandelaber) gemessen. Bei diesen Messungen ist der Abstand für den Spannungsabgriff variabel und soll laut Starkstromverordnung bis 1.75 m berücksichtigt werden.

Als Messgerät für die Berührungs-, Differenz- und Schrittspannungen wurde bei der FKH ein selektives Erdungsvoltmeter² entwickelt). Zur Unterdrückung niederfrequenter Störeinflüsse beinhaltet das Messgerät wahlweise einschaltbare Bandsperrfilter für 50 Hz und $16^{2/3}$ Hz. Mit dem Gerät lassen sich direkt Spannungen von 10 mV bis 1000 V digital messen.

Durch die Erdschluss-Stromeinspeisung mit Frequenzen von 60 Hz bis 70 Hz sowie durch die selektive Unterdrückung (ca. 40 dB) von netzfrequenten (50 Hz) Einflüssen oder von Bahnstrom-Störkomponenten ($16^{2/3}$ Hz) können in der Regel selbst kleine Nutzsignale im mV-Bereich zuverlässig erfasst werden.

2 Eine entsprechende Dokumentation des FKH-Erdungsvoltmeters ist verfügbar.

Pro Messpunkt werden jeweils zwei Messungen vorgenommen. In der ersten Messung wird die Spannung direkt über dem hochohmigen Eingangswiderstand des Aktiv-Filters gemessen. In der zweiten Messung wird parallel zum Filter-Eingang ein Widerstand von $2\text{ k}\Omega^3$ geschaltet.

Die erste Messung ergibt die tatsächlich an der Mess-Stelle vorhandene Spannung, während in der zweiten Messung jene Spannung gemessen wird, welche an der Mess-Stelle auftreten würde, falls diese durch den Widerstand des menschlichen Körpers belastet würde. Die mit dieser Belastungsimpedanz gemessenen Spannungen werden deshalb für die Auswertungen herangezogen.

5.1 Auswertung und Konsequenzen von Einwirkspannungsmessungen

Nach Abschluss der Erdungsmessungen müssen die Wirksamkeit der Erdungsanlage und die im Erdschlussfall auftretenden Einwirkspannungen beurteilt und dokumentiert werden.

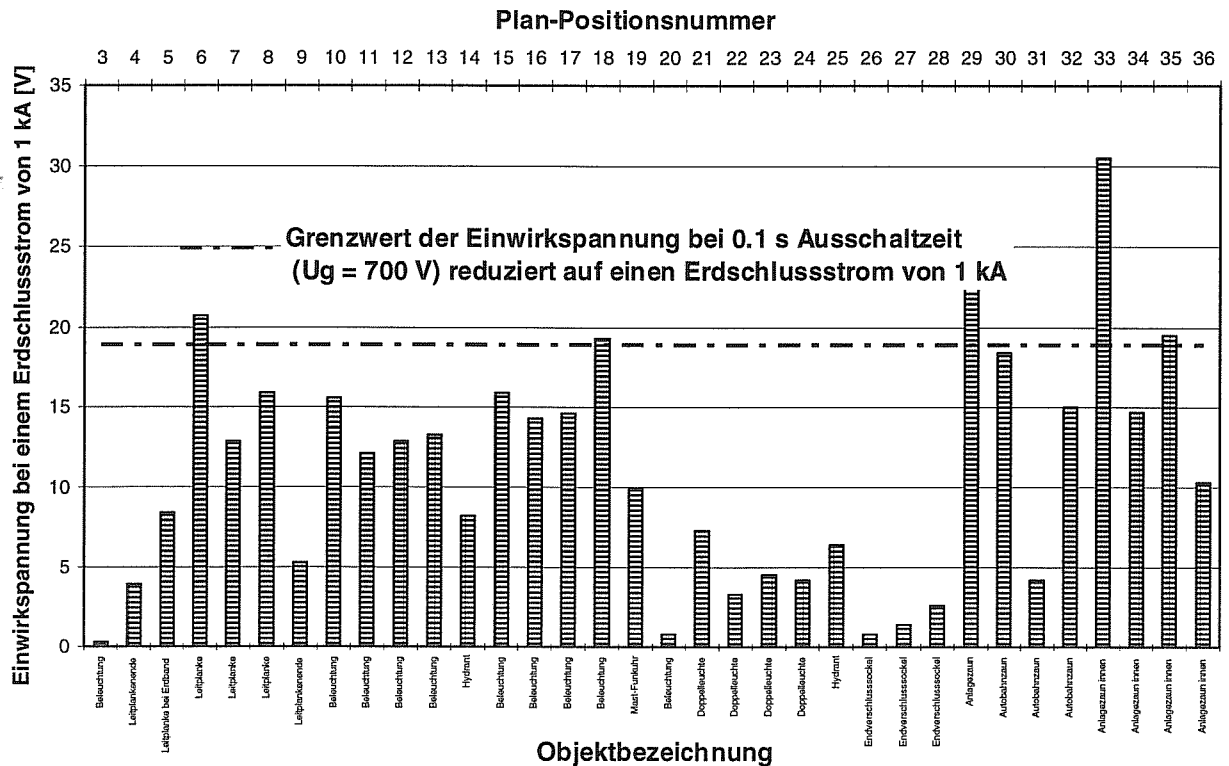
Standardmässig werden Säulendiagramme mit Einwirkspannungen erstellt, wobei die Messwerte auf einen Erdkurzschlussstrom von 1 kA bzw. auf den maximal möglichen Erdschlussstrom hochgerechnet werden (vgl. Figur 5).

Bei unzulässig hohen Berührungs-, Schritt- und Differenzspannungen werden Abhilfemassnahmen vorgeschlagen.

Zur Vermeidung hoher Einwirkspannungen oder zur Verminderung deren Gefahren stehen folgende häufig angewendete Massnahmen zur Verfügung:

- Aufbringen eines isolierenden Bodenbelags (Asphalt, Schotter oder Kies).
- Aussteuerung der Umgebung mit Erdelektroden (Erdbändern).
- Anbringen eines isolierenden Farbanstrichs auf den Freileitungsmasten und geerdeten Anlageteilen.
- Anbringen von Warntafeln.
- Reduktion der Ausschaltzeit von Erdfehlern.

3 Die SEV-Regel 3569-1.1985 schreibt eine Messimpedanz zwischen $2\text{ k}\Omega$ und $20\text{ k}\Omega$ vor.



Figur 5 *Beispiel einer Auswertung von Messungen der Einwirkspannungen in der Umgebung einer Hochspannungsschaltanlage.*

6. Ermittlung der Erdungsstromverteilung

Für die Überprüfung der Wirksamkeit von Erdungssystemen empfiehlt sich eine systematische Ermittlung der Stromverteilung sämtlicher Leiter, welche mit der Anlagenerde in Berührung stehen und die Anlage verlassen bzw. zu deren Erdung dienen. Darunter fallen insbesondere die in Tabelle II aufgeführten Leiterarten.

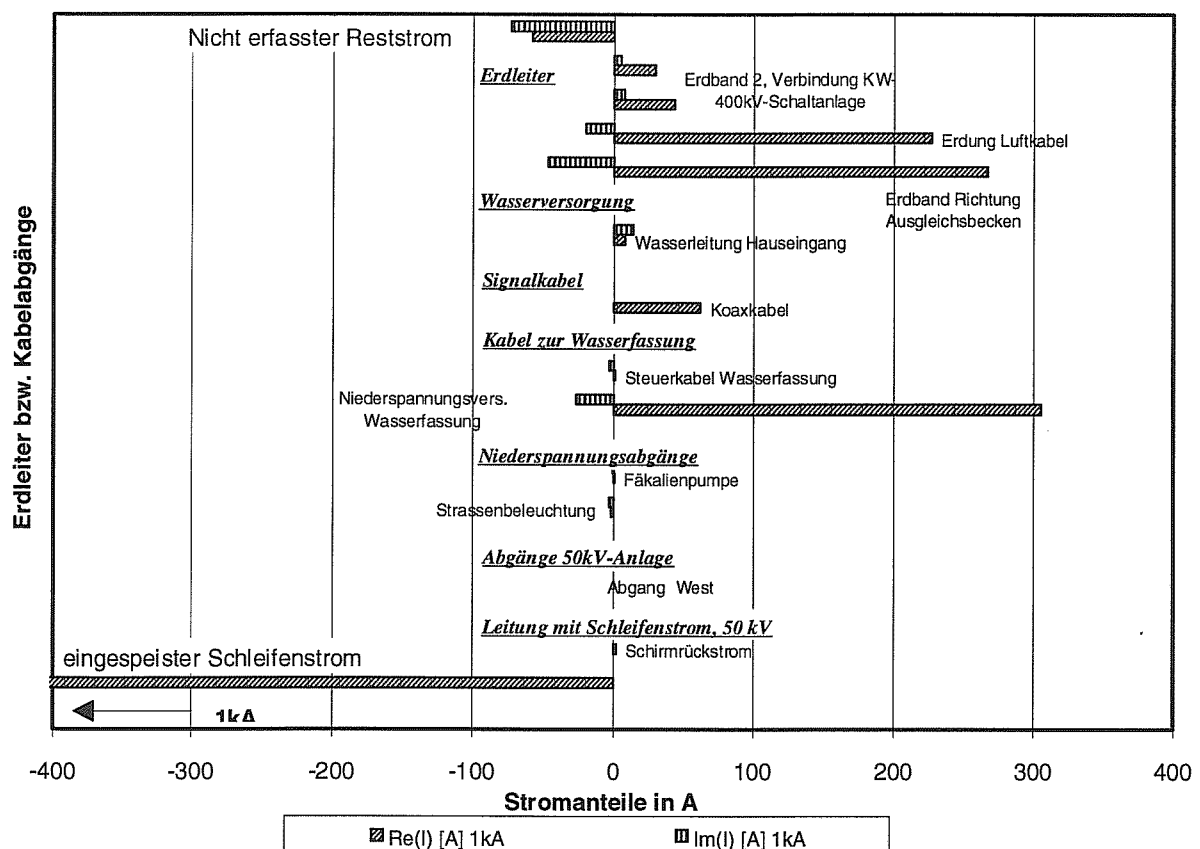
- Verbindungen zu Erdern bzw. geerdeten Strukturen
- Abgehende Erdseile von Freileitungen
- Geerdete Schirme von Hochspannungs- und Mittelspannungskabeln
- Niederspannungsabgänge
- Steuer- und Signalleitungen mit geerdeten Schirmen
- Telephonleitungen
- Metallische Wasser- und Gasleitungen

Tabelle II *Zusammenstellung der bei der Ermittlung der Erdungsstromaufteilung zu überprüfenden Leiterarten und Verbindungen*

Werden die Ströme aller in Tabelle II aufgeführten Leiter in **Betrag und Phase** vollständig erfasst und bestehen keine weiteren Verbindungen zwischen der Umgebungserde 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 Figur 6 dargestellt.

Die Ermittlung der Erdungsstromverteilung dient aber insbesondere der Beantwortung folgender wichtiger Fragen:

- 1) Sind alle Erdverbindungen intakt und genügend niederohmig ausgeführt?
- 2) Gibt es Energie- oder Nachrichtenkabel, die in einem Erdschlussfall unverhältnismässig hoch mit Erdungsströmen belastet werden, wodurch Störungen, Überspannungen oder gar thermische Überlastungen eines Kabels auftreten können?
- 3) Bestehen unerwünschte Verbindungen zwischen isolierten Leitern auf Nullpotential und Erde (offene Kabelschirme, Sondererder etc.)?



Figur 6 Beispiel einer Erdungsstrombilanz. Da zwischen den Erdungsstromanteilen oft wesentliche Phasenverschiebungen vorliegen, ist die Bilanz getrennt mit Real- und Imaginärteil durchzuführen.

Die Messung der einzelnen Stromanteile erfolgt mit geeigneten Zangenstromwandlern oder mit Rogowskispulen, so dass auch Leiter grösseren Querschnitts (z.B. Hochspannungskabel),

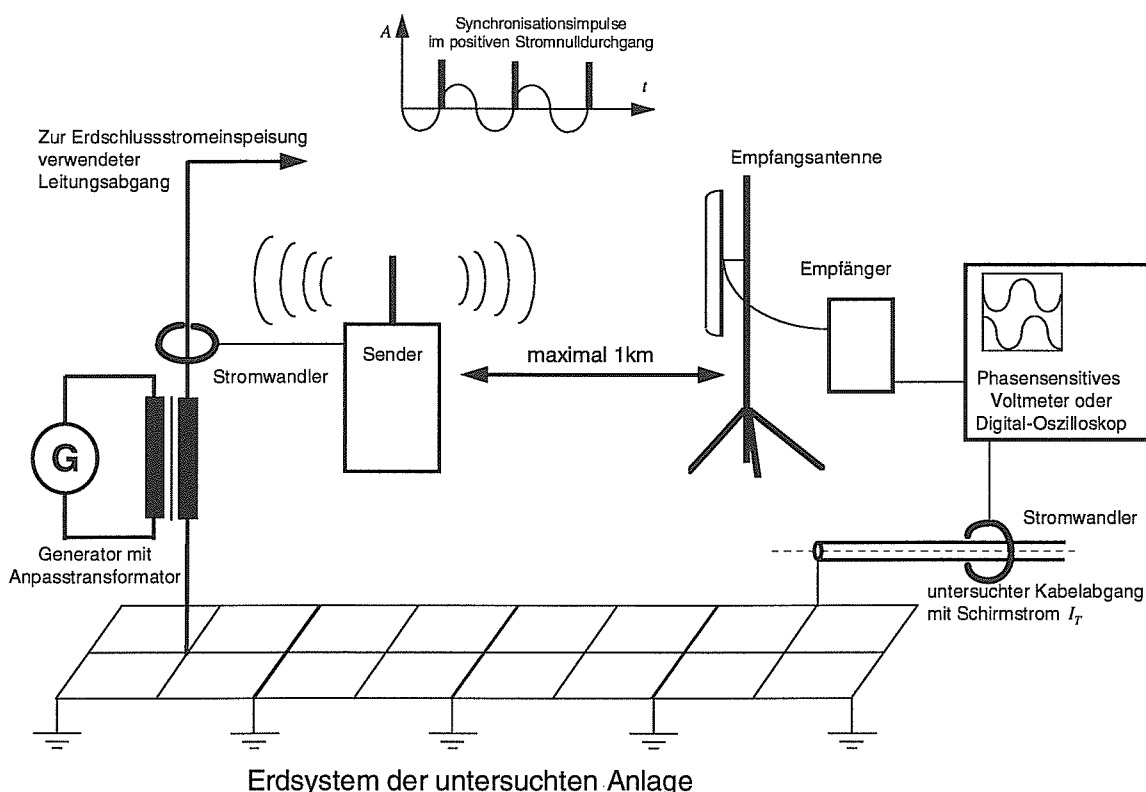
Rohrleitungen und Masten bis zu Durchmessern von über einem Meter umfasst werden können.

Die Bürdenspannungen der Stromwandler werden zur Vermeidung von Störeinkopplungen mit abgeschirmten und verdrehten Signalkabeln zum Messplatz übertragen. Zur Unterdrückung von 50Hz-Betriebsströmen und $16\frac{2}{3}$ Hz-Bahnströmen werden 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 ca. 100 m) kann das Referenzsignal des eingespeisten Erdschlussstroms mit einem bebürdeten Stromwandler erfasst und über eine abgeschirmte und verdrehte Zweidrahtleitung bis zum Messplatz übertragen werden, wo die Phasenverschiebung zwischen dem Referenzstrom und dem gemessenen Teilstrom bestimmt wird.

Bei grösseren Distanzen (bis ca. 1 km) verwendet die FKH eine Referenzsignalübertragung über Funk. 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 (siehe Figur 7).



Figur 7 *Prinzipisches Schema für die Übertragung von Synchronisationssignalen zur Messung von Phasenwinkeln zwischen dem eingespeisten Schleifenstrom (Speisequelle: Generator, links) und dem zu messenden Teilerdungsstrom I_T (rechts).*

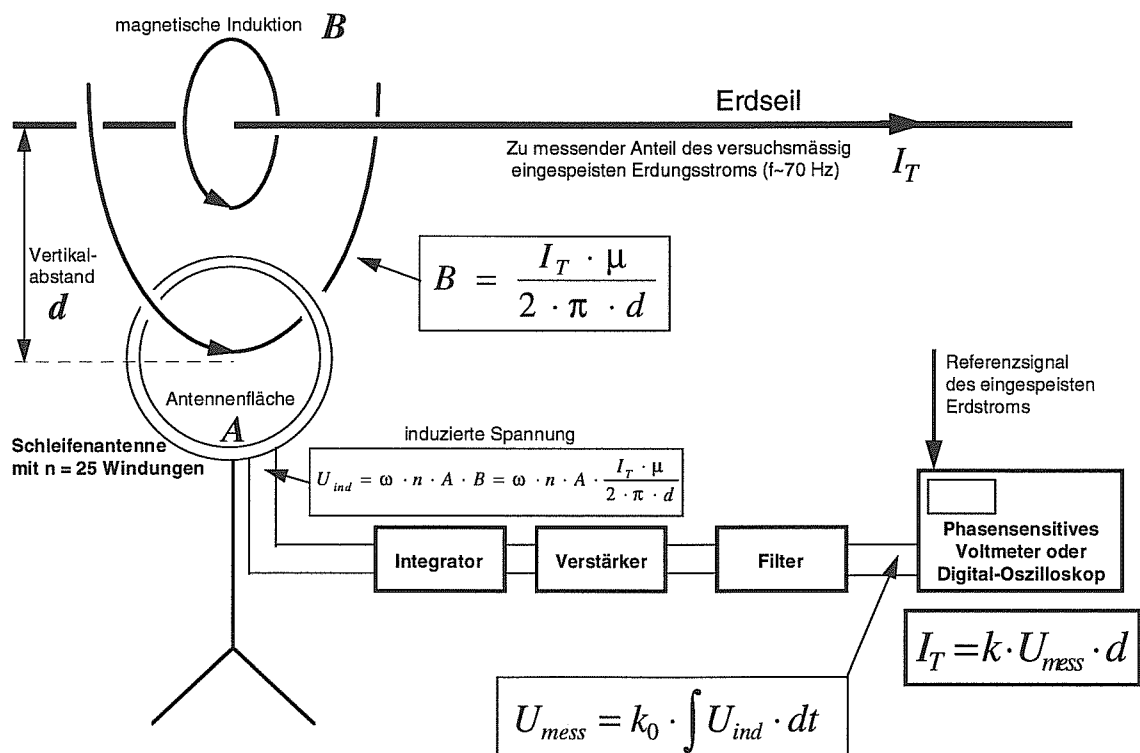
Die Messunsicherheit bei der Bestimmung der Phasenlage liegt bei $\pm 5^\circ$. Voraussetzung hierfür ist, dass vor der Messung ein Phasenabgleich vorgenommen wurde.

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° verschobene Komponente dar.

6.1 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“ Messmethode hat den Vorteil, dass die Ströme in den oft schwer zugänglichen Erdseilen ohne Mastbesteigungen mittels einer Schleifenantenne auf Bodenniveau bestimmt werden können. Da der eingespeiste Strom sich in der Frequenz (~ 70 Hz) vom Netzbetriebsstrom unterscheidet, können die Magnetfelder, welche der Netzbetriebsstrom verursacht, durch Filterung unterdrückt werden.

Das Prinzip der „indirekten“ Erdleiterstrommessung ist in Figur 8 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.



Figur 8 Prinzipschema für die Messung eines Teilerdungsstroms im Erdseil einer Freileitung mittels Messung der magnetischen Induktion B .

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

$$I_T [A] = U_{mess} [V] \cdot d [100 m]$$

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

7. Nullimpedanz der zur Erdschlusseinspeisung verwendeten Leitung

Mit der Messanordnung gemäss Figur 1 kann im Weiteren auch die Nullimpedanz Z_0 eines Leitungs-Systems ermittelt werden. Dazu werden Betrag und Phase der treibenden Spannung U_0 und des Mess-Stromes I_M bzw. des Erdschluss-Stromes I_E bestimmt. Allgemein ergibt sich die Nullimpedanz pro Phase aus:

$$Z_0 = U_0 / I_0$$

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

$$Z_0 = 3U_0 / I_M$$

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.

8. Grenzen einer Erdungsmessung

Selbst wenn alle messtechnischen Probleme, wie z.B. die Eliminierung von Störspannungen, beherrscht werden, bleiben bei Erdungsmessungen eine Reihe *prinzipieller Probleme* bestehen, welche oft erhebliche Unsicherheit 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 könnten durch eine eigentliche Erdungsmessvorschrift bereinigt werden. 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.
2. Nach einer Neuverlegung von erdfühiligen Leitern findet eine langsame Reduktion des *Erdübergangswiderstands* statt, welche normalerweise über viele Monate andauert.
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 ausser Acht gelassen, dann nimmt die Stromdichte bzw. das resistive elektrische Feld eines Einzelerders zunächst quadratisch mit dem Abstand und weiter aussen nahezu linear dazu ab.

Der Einfachheit halber wird für die folgende Überlegung eine kreisrunde Erdungsanlage angenommen: Mathematisch ausgedrückt ist die Erdungsspannung U_E das Integral der

resistiven Feldstärke von Rand des Erdungssystems ($r=r_0$) bis zu einem unendlich grossen Abstand.

$$U_E = \int_{r_0}^{\infty} E_E(r) dr = \int_{r_0}^{\infty} E_0 \cdot \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-k} dr \quad 1 < k < 2$$

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 am Rand des Erdungssystems [V/m]

Da in der Praxis das Spannungstrichterprofil nicht bis zu einem unendlich grossen Abstand gemessen werden kann, ist die Erdungsspannung und damit auch die Erdungsimpedanz 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.

4. Das unter dem Aspekt 3 beschriebene Problem der unklaren Festlegung der Erdungsimpedanz wird dadurch noch komplizierter, dass es sich bei den Erdschlussströmen um betriebsfrequente Wechselströme handelt, welche den Stromverdrängungseffekten im Erdboden unterworfen sind. Wechselströme 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 zur Gegenerde zurück, sondern sie fliessen in einem engen Korridor von einigen 100 m Breite entlang der erdschlusspeisenden Leitung. Aus diesem Grund entsteht eine stark asymmetrische Erdungsstromverteilung um die untersuchte Erdungsanlage, da der Erdschlussstrom von einer Seite her eingespeist wird.

Mittels der Magnetfeld- bzw. **Stromdichteeindringtiefe** in den Erdboden δ lassen sich quantitative Aussagen über die Ausbreitung von Erdströmen angeben.

$$|\delta| = \sqrt{\frac{\rho}{\omega \mu_0}}$$

δ : Eindringtiefe des Erdrückstroms [m]

ρ : Spezifischer Widerstand des Erdreichs [Ωm]

ω : Kreisfrequenz des Erdstroms [s^{-1}]

μ_0 : Magnetische Permeabilität des Vakuums [$4\pi \times 10^{-7} Vs/Am$]

Bei den in der Praxis vorkommenden spezifischen Erdbodenwiderständen von 10 Ωm bis 1000 Ωm resultieren bei einer Netzfrequenz von 50 Hz Eindringtiefen δ zwischen 150 m und 1500 m vor. 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 der **Frequenz** abhängig ist.

Besonders die Erdungsanlagen grosser elektrischer Anlagen, welche im Durchmesser die Grössenordnung der Stromeindringtiefe δ d.h. einige 100 m erreichen, besitzen deshalb eine Erdungsstromverteilung, die 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 Messerdschlussstrom trägt, abhängig. Dieser Umstand erschwert insbesondere die Beurteilung der Erdungssituation bei Erdungsmessungen grosser Anlagen.

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

Aus den oben aufgeführten Problemaspekten geht klar hervor, dass nur die Erzeugung eines Erdschlussstroms von allen erdschlusspeisenden Leitungen ein richtiges Abbild der Erdschlussituation ergibt. Eine solche Erdungsmessung ist jedoch aus praktischen Gründen wohl nur im Ausnahmefall machbar. Um dennoch zumindest reproduzierbare Erdungsmessungen durchführen zu können, sollten für die Zukunft diesbezüglich zweckmässige *Anweisungen für die Durchführung von Erdungsmessungen an grösseren Erdungsanlagen* geschaffen werden.

9. Literaturangaben

- [1] SEV-Regel 3569-1 (1985) "Erden als Schutzmassnahme in elektrischen Starkstromanlagen", Teil 1 -Teil 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] F. Schwab: „Erdungsmessungen in ausgedehnten Anlagen“; Bull. SEV/VSE Bd. 71, Nr. 4, (Februar 1980).
- [5] R. Hoffmann: „Neues Messverfahren zur Eliminierung von Fremd- und Störspannungen bei Beeinflussungs- und Erdungsmessungen“; Elektrizitätswirtschaft, Jg. 91, Heft 22 (1992).

Comportement des mises à la terre vis-à-vis des phénomènes périodiques et transitoires

Hubert Sauvain

EMC Fribourg SA; CH-1728 Rossens; Tél. ++41 37 31 31 51

Die Erdung wird in einem elektrischen Ersatzschaltbild meist als Widerstand dargestellt. Dies ist für niedere Frequenzen (Gleichstrom, 16 2/3 Hz und 50 Hz) zulässig. Im Bereich der Oberwellen und der Transienten (Schaltvorgänge, Blitz, hochfrequente Störungen) ist diese Vereinfachung jedoch nicht mehr zutreffend.

In diesem Beitrag wird das frequenzabhängige Verhalten einer Erdverbindung erläutert. Hierbei spielen folgende Parameter eine Rolle: Ohmscher Widerstand, Skineffekt, induktiver und kapazitiver Blindwiderstand sowie Potentialausgleich und Antennenwirkung.

Introduction

On définit le plus souvent les performances des mises à la terre à l'aide d'une résistance du point de vue électrique. Cette approche est justifiée dans les basses fréquences (courant continu, 16 2/3 et 50 Hz). Elle n'est par contre plus valable pour les composantes harmoniques et les régimes transitoires (manoeuvres dans les postes, foudre, perturbations électromagnétiques dans les équipements auxiliaires de contrôle-commande).

La présente contribution s'attache à dresser l'évolution du comportement d'une mise à la terre en fonction de la fréquence. On retiendra les paramètres: résistance, effet pelliculaire, inductance, impédance, terre équipotentielle, effet d'antenne.

Mises à la terre dans un poste à haute tension

Le principe général consiste à limiter la tension de pas et la tension de toucher pour protéger le personnel exploitant. On considère comme référence le court-circuit à la terre donnant le courant maximum de défaut. La tension maximale admissible de pas ou de toucher est inversement proportionnelle à la racine carrée du temps de défaut. On a donc intérêt à couper au plus vite le courant de défaut.

Le plus souvent on fait appel à une longue expérience pour disposer les conducteurs de mises à la terre dans le sol, sous la forme de mailles, piquets ou ceintures. On procède ensuite à la mise en service à des mesures de vérification avec injection de courant à 50 Hz. La dissociation entre la partie projet et la partie contrôle final défavorise cette méthode, bien qu'elle ait toute sa valeur en reposant sur une longue expérience.

Calcul d'un système généralisé de mise à la terre d'un poste à haute tension

On peut calculer des configurations très simples de mises à la terre à l'aide de relations analytiques [1]. La forme la plus simple de mise à la terre calculable est l'électrode hémisphérique. C'est une solution théorique et non utilisée dans la pratique (Fig. 1).

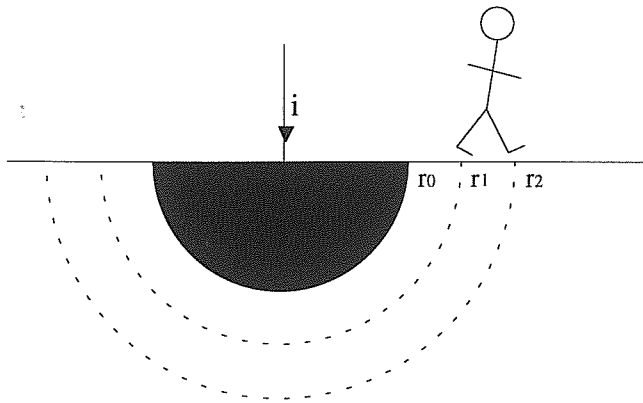


Fig. 1: Prise de terre hémisphérique

Cette électrode se calcule à l'aide de la relation analytique suivante:

$$U = I \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho}{2\pi r^2} dr = \frac{I\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right]$$

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\rho}{2\pi r_0}$$

- ρ : résistivité du sol (Ωm), valeur typique 100 à 1000;
- r : distance (m) depuis le centre de la prise de terre; valeur typique pour la tension de pas 1 m;
- r_0 : rayon de l'hémisphère
- R : résistance de la prise de terre générant une tension efficace U pour un courant de défaut efficace I

Une autre configuration relativement simple à calculer et très utilisée dans la pratique est le piquet de terre (Fig. 2). Cette relation repose sur une intégrale définie cylindrique. Selon ANSI/IEEE Std 80-1986, la valeur limite d'intégration, soit le rayon du cylindre fictif, est basée sur la longueur du piquet:

$$R = \frac{\rho}{4\pi l} \ln \left[\frac{2l}{d/2} \right]$$

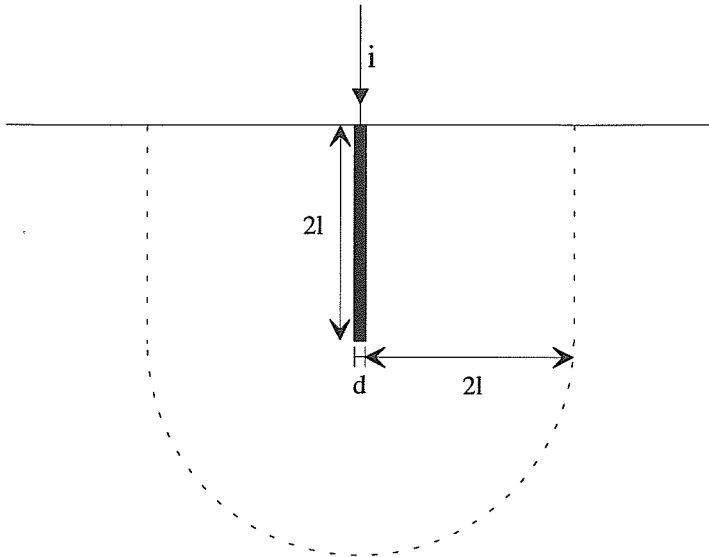


Fig. 2: Piquet de terre vertical à fleur de sol

On remarque très rapidement la limite des solutions analytiques pour des configurations complexes (prises de terre sous forme de réseaux maillés, juxtaposition de mailles avec des piquets et des ceintures, utilisation de sols à plusieurs couches).

On recourt dans ce cas à la méthode des éléments finis et du potentiel vecteur. On définit en r' une source de courant linéique j (partie d'un tronçon de courant) et on calcule pour un référentiel (x,y,z) donné le potentiel en un point r (Fig. 3). Le potentiel vecteur en régime statique s'obtient par la relation:

$$V = \frac{1}{4\pi\sigma} \int_c \frac{jdl}{|r - r'|}$$

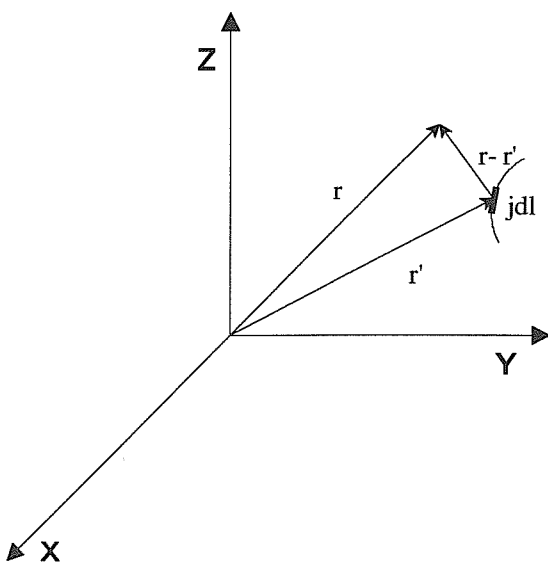


Fig. 3: Potentiel vecteur produit par un tronçon de courant

Un programme de calcul développé pour ce genre d'applications permet de calculer des configurations complexes et mixtes, intégrant différentes prises de terre (mailles, piquets, ceintures) dans les 3 dimensions, avec 2 couches différentes de sol, représentant par exemple le terrain standard et un lit de cailloux au-dessus ou une couche d'asphalte. Les résultats comprennent les tensions de pas et de toucher en valeur relative ou absolue et la résistance globale de la prise de terre. L'exemple d'application ci-après présente le système de mise à la terre d'un poste de dimensions 50x50 m avec des mailles de 10x10 m et une profondeur de $t=0.5$ m dans un sol à une couche où $\rho_1=\rho_2$ et sans piquets ni ceinture C (Fig. 4). Les résultats (Fig. 5) présentent la tension de pas U_p (10.8 % de la tension de la prise de terre lors du défaut) et la tension de toucher U_t au point a auprès d'une barrière B pouvant être mise à la terre (17.6 % de la tension de la prise de terre lors du défaut) ou laissée flottante.

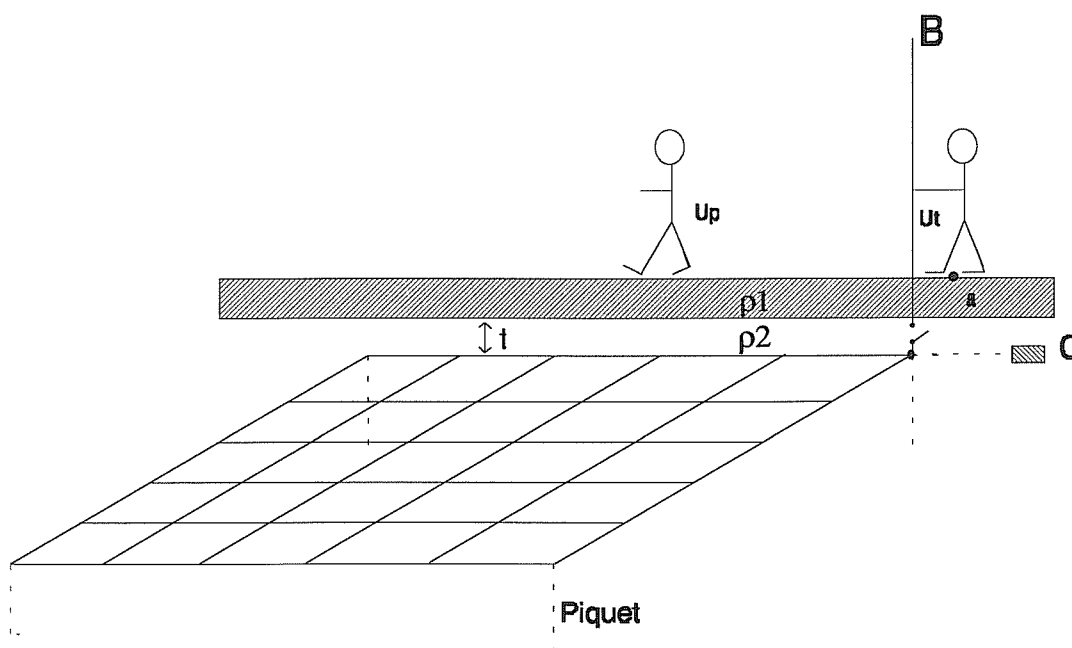


Fig. 4: Réseau de mise à la terre, situation globale

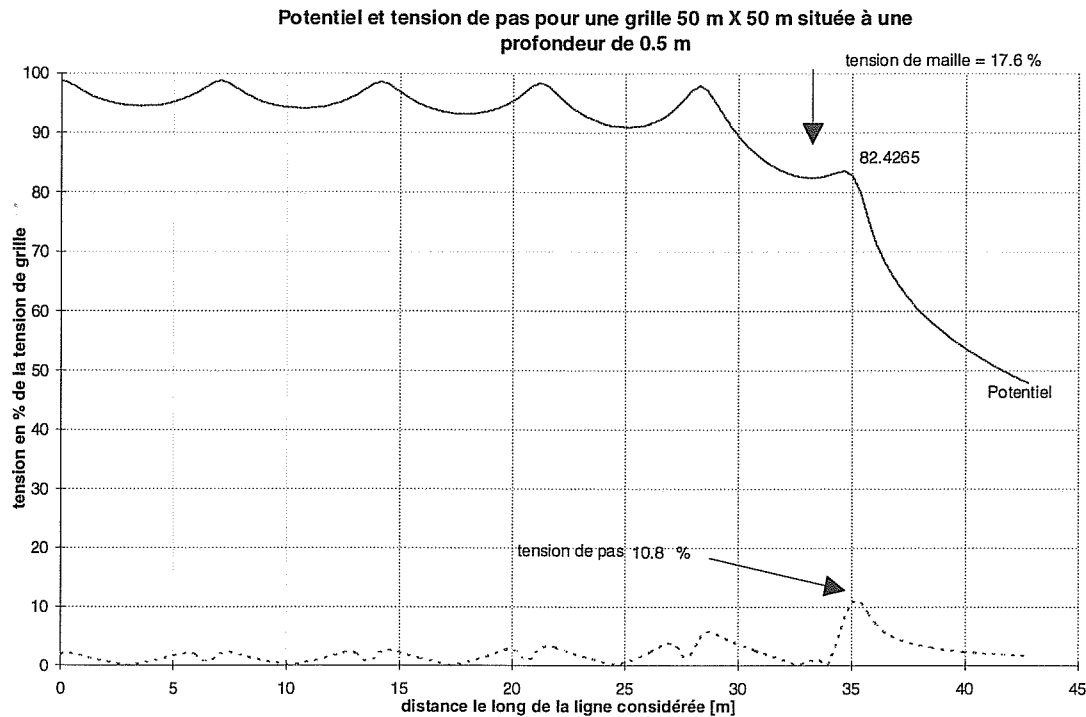


Fig. 5: Performances d'un réseau de mise à la terre déterminées à l'aide d'un calcul par éléments finis. Situation sans piquets, une couche

Cette méthode de calcul, bien que limitée au régime statique permet de définir à l'avance lors du projet les performances d'une prise de terre de configuration complexe. Elle représente l'avantage de renforcer la qualité du dossier de mise à l'enquête et d'éviter une mise à la terre trop ou pas assez élaborée. Elle a été appliquée à ce jour à plusieurs postes à haute tension en campagne ou en ville, à une ou deux couches de terrain, avec des configurations relativement compliquées.

Besoin d'une caractérisation des paramètres des prises de terre en fonction de la fréquence

On considère par exemple un piquet de terre de 2 m de long et de 1 cm de diamètre, planté verticalement dans un sol de résistivité 1000 Ωm . Sa résistance est de 476 Ω et son inductance est estimée à 2 μH . Le courant injecté a successivement une fréquence correspondante de 0 Hz (courant continu), 50 Hz (fréquence fondamentale), 150 Hz (harmonique 3), 30 kHz (fréquence supérieure du spectre d'une source de courant provenant d'une manoeuvre de sectionneur ou disjoncteur), 365 kHz (fréquence supérieure du spectre d'une source de courant provenant de la foudre (Fig. 6)), 50 MHz (fréquence supérieure du spectre d'une source de courant provenant d'une manoeuvre de sectionneur ou disjoncteur dans un poste isolé au gaz SF_6).

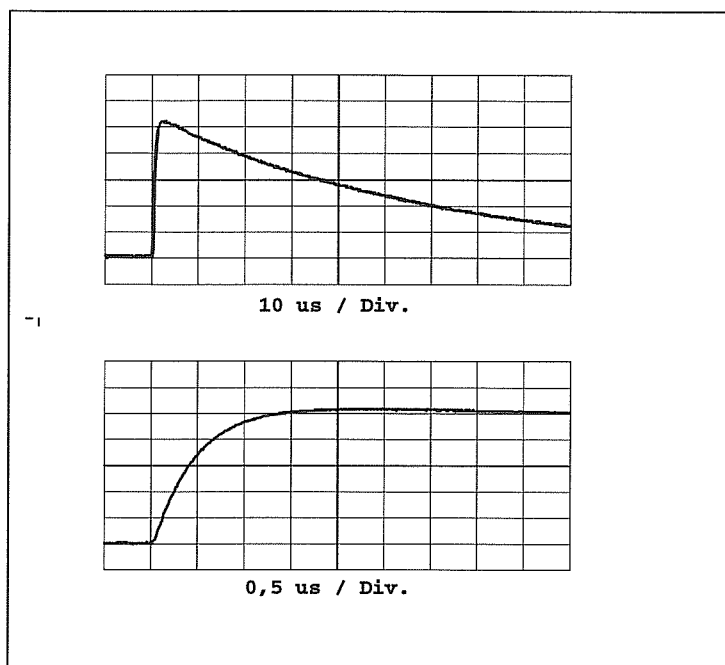


Fig. 6: Impulsion de courant de foudre (cas à haute impédance)

Courbe du haut: 10 μ s/div.

Courbe du bas: 0.5 μ s/div. (loupe)

Le tableau I présente:

- la profondeur de pénétration (en mm) du courant dans le piquet en fonction de la fréquence, pénétration freinée par l'effet pelliculaire [2];
- la réactance X (en Ω) pour un régime sinusoïdal et en admettant une inductance constante de 2 μ H;
- le temps de montée dt d'une source de courant transitoire;
- la composante Ldi/dt pour un accroissement de courant di/dt et une variation de courant de 1 $\hat{A}$;

				manoeuvre	foudre	SF6
fréquence	0 Hz	50 Hz	150 Hz	30 kHz	365 kHz	50 MHz
pénétration mm	∞	10	5.8	0.4	0.12	0.01
X	0 m Ω	0.63 m Ω	1.9 m Ω	0.38 Ω	4.6 Ω	628 Ω
dt	-	-	-	10 μ s	1.2 μ s	6.3 ns
Ldi/dt V	-	-	-	0.2	1.7	317

Tableau I

On remarque pour le cas du piquet de terre:

- La profondeur de pénétration a des conséquences importantes pour les phénomènes transitoires. Mais ce frein est diminué par la diffusion du courant dans le sol. L'inductance diminue également avec l'effet pelliculaire.
- La réactance n'est pas importante, sauf dans le cas d'une manoeuvre dans le poste SF₆. La réactance deviendrait importante pour une autre configuration qu'un piquet où la résistance de 476 Ω diminuerait (ceinture, grille).
- La variation de tension due à la partie inductive n'est pas importante, sauf dans le cas d'une manoeuvre dans le poste SF₆.

Méthodologies de mesures

Les méthodes de mesure au pont de résistivité du sol et de la résistance de la prise de terre par 4 et 3 électrodes sont connues. La méthode d'injection d'un courant à 50 Hz présente des inconvénients, bien qu'elle soit la plus réaliste:

- Nécessite une source de courant importante.
- Risque de confusion entre les tensions générées par la source auxiliaire et les tensions déjà présentes.
- Ne donne pas l'influence de la fréquence.

On peut palier à cet inconvénient en injectant un courant tronqué (Fig. 7) qui génère un spectre dans le domaine des premiers harmoniques (typiquement 50 à 1000 Hz).

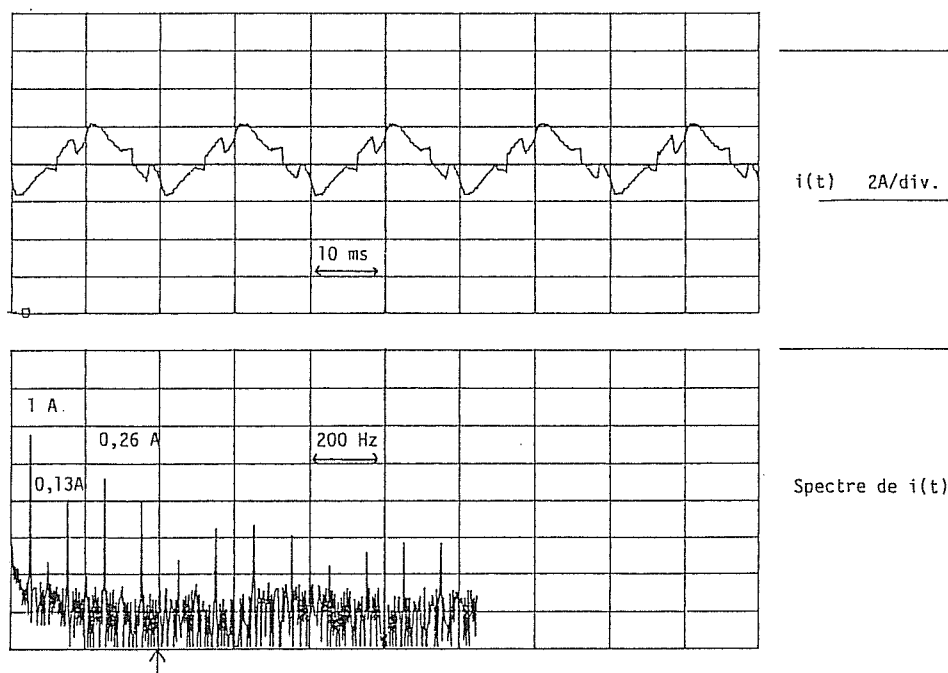


Fig. 7: Courant tronqué injecté dans une prise de terre d'un poste en ville

Un corollaire consiste à utiliser une fréquence différente de la fréquence fondamentale 50 Hz.

On peut également injecter une impulsion de courant et déterminer par traitement de signal les parties résistance et réactance de la prise de terre (Fig. 8). On utilise à ce propos un générateur de choc à haute tension de plus ou moins grande énergie. On trouve alors le comportement de la prise de terre en régime transitoire pour une gamme de fréquences déterminée en fonction du générateur choisi, par exemple le domaine de la foudre. Un autre avantage est la possibilité d'analyser plus profondément des électrodes partiellement rongées par la corrosion.

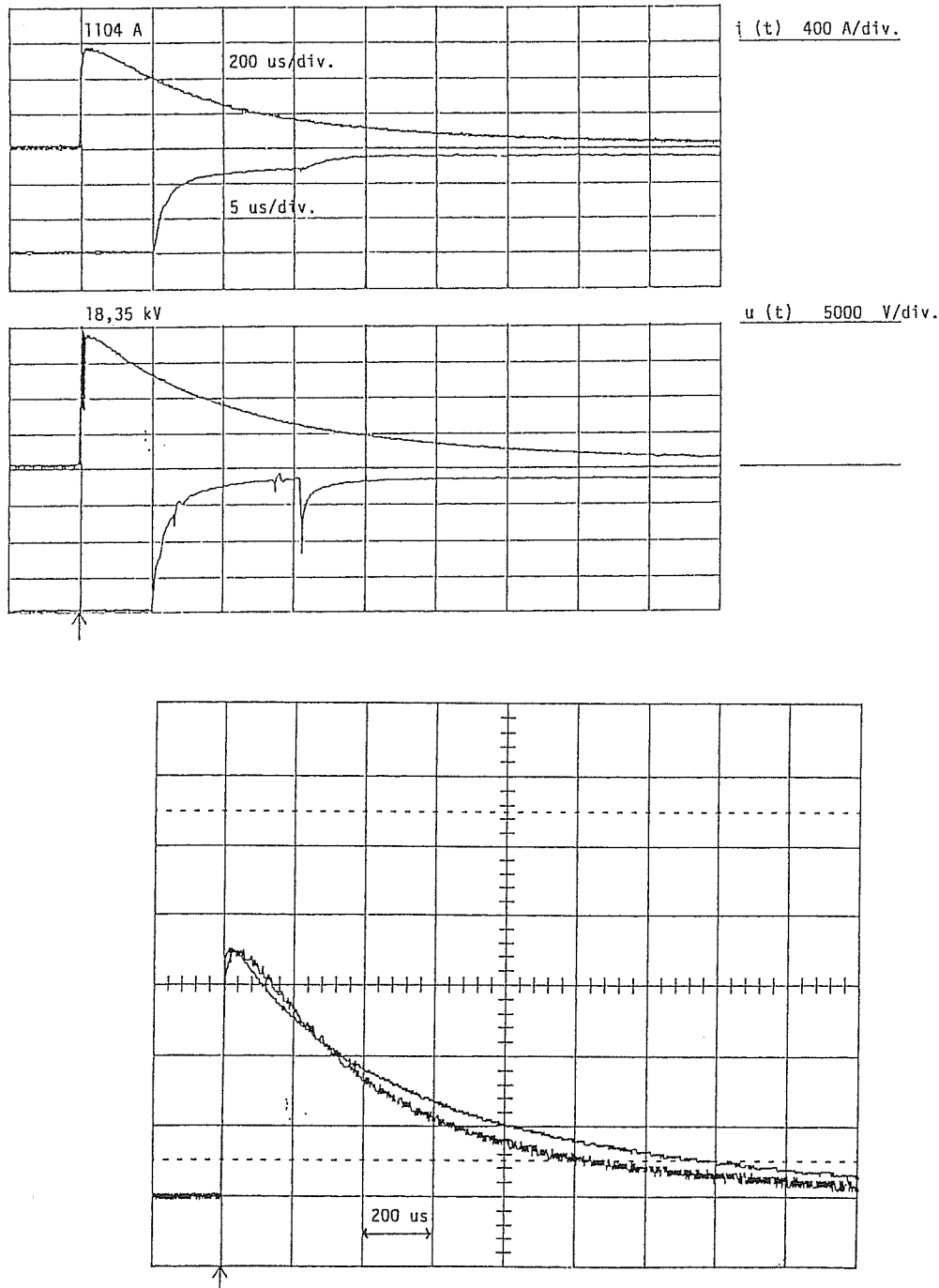


Fig. 8: Réponses à une impulsion de courant injectée dans une mise à la terre d'un mât d'antenne, constituée de piquets (a:valeurs absolues; b:valeurs relatives).

Ces deux méthodes nécessitent cependant une attention particulière pour éviter les tensions induites parasites dans les circuits de mesure.

Mises à la terre des postes isolés au gaz SF₆

Pour un poste isolé au gaz SF₆, il faut non seulement assurer l'écoulement du courant de défaut par les méthodes expliquées précédemment, mais aussi assurer une équipotentielle entre les différents systèmes [3]. Cette deuxième partie s'applique avant tout pour la protection électromagnétique des équipements de contrôle-commande. En effet, les tensions transitoires sont moins dangereuses pour le personnel exploitant, sauf bien sûr le cas de la foudre.

Lors d'une manoeuvre d'un sectionneur ou d'un disjoncteur dans le gaz SF₆, une onde se propage dans le tube et réfléchit à chaque endroit où l'impédance caractéristique $Z = \sqrt{L/C}$ change. C'est le cas spécialement vers les têtes de câbles (Fig. 9).

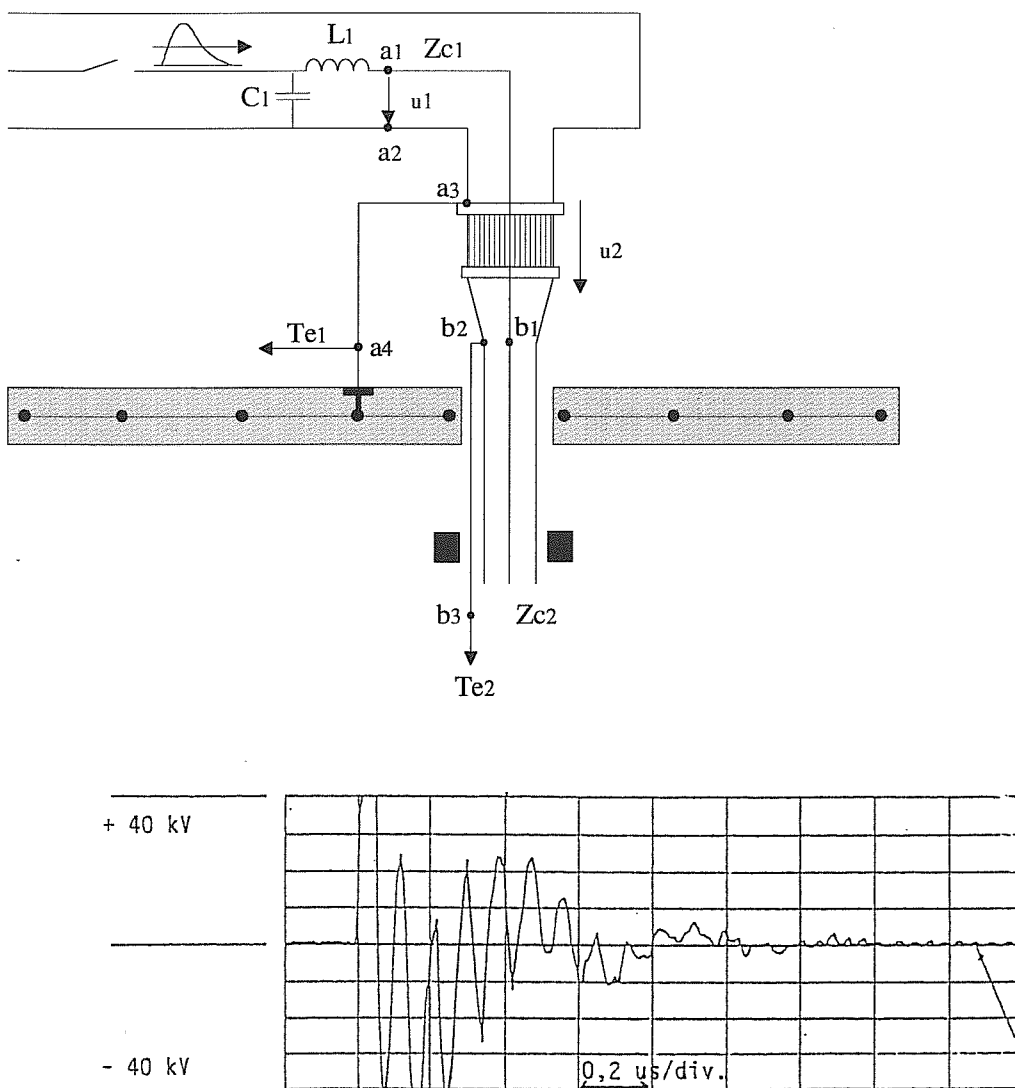


Fig. 9: Surtension u_2 apparaissant aux bornes de la couronne isolante des têtes de câbles (a:schéma équivalent; b: résultat de mesure).

On mesure typiquement des tensions entre 2 points de terre allant jusqu'à 50 % de la tension fondamentale (Fig. 9). On peut alors voir apparaître des effluves. Elles témoignent de ces surtensions à hautes fréquences. Les conducteurs de terre a_3 - a_4 et b_2 - b_3 ont en effet des composantes R_i et $L di/dt$ très importantes, si bien que l'on obtient plusieurs dizaines de kV entre deux points. Il est alors important de réaliser une terre équipotentielle, par exemple en utilisant les fers à béton [3].

Effet d'antenne

Dans les réseaux à très haute tension, les équipements peuvent être élevés. Les disjoncteurs à chambre SF_6 pour postes à l'air libre ou les disjoncteurs sous enveloppe SF_6 pour postes blindés ont des performances de coupure de plus en plus élevées. Le temps d'établissement de la tension peut être inférieur à 5 ns [4]. On arrive donc à des situations où une longueur de conducteur de terre est un multiple du quart d'onde ($n\lambda/4$) de la perturbation selon la relation:

$$f = \frac{1}{\pi\tau} = \frac{1}{5\pi * 10^{-9}} = 63 \text{ MHz}$$

$$\lambda / 4 = \frac{3 * 10^8}{4 * 63 * 10^6} = 1.2 \text{ m}$$

Le conducteur de terre ne peut plus être simulé par une résistance, ni par une impédance (R,L,C), mais doit être considéré comme une antenne (Fig. 10).

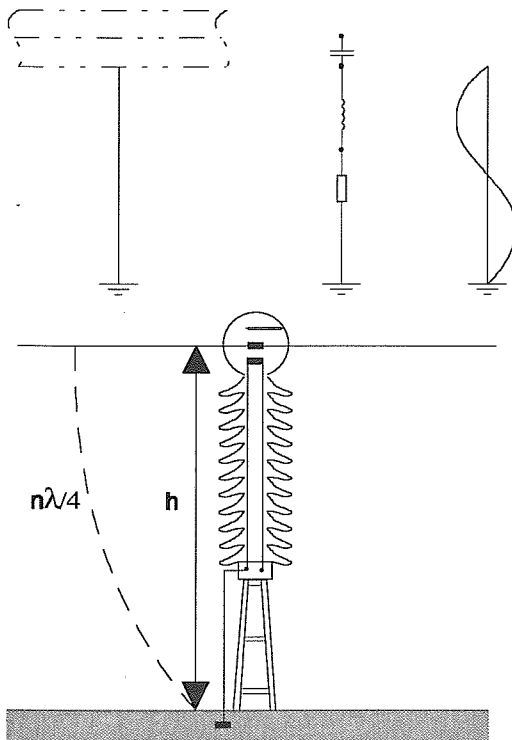


Fig. 10: Schéma équivalent d'un conducteur de mise à la terre en fonction de la fréquence du courant (a: évolution du schéma équivalent; b: cas simplifié d'un transformateur de courant)

Cela signifie:

- Le courant (respectivement la tension) a des noeuds et des ventres le long du conducteur.
- Le courant instantané (respectivement la tension) n'est pas constant sur la longueur du conducteur. Le point de mesure doit être défini. Un point à tension nulle à une extrémité du conducteur ne correspond pas nécessairement à une tension nulle à l'autre extrémité.

En cas de mesures d'investigation sur un équipement on doit faire appel à des couplages par structure coaxiale (Fig. 11) ou à l'aide de cellules TEM (Transfert Electromagnetic Mode). Les liaisons entre les points de mesure doivent en partie être exécutées à l'aide de fibres optiques pour ne pas modifier les couplages induits et rayonnés [5].

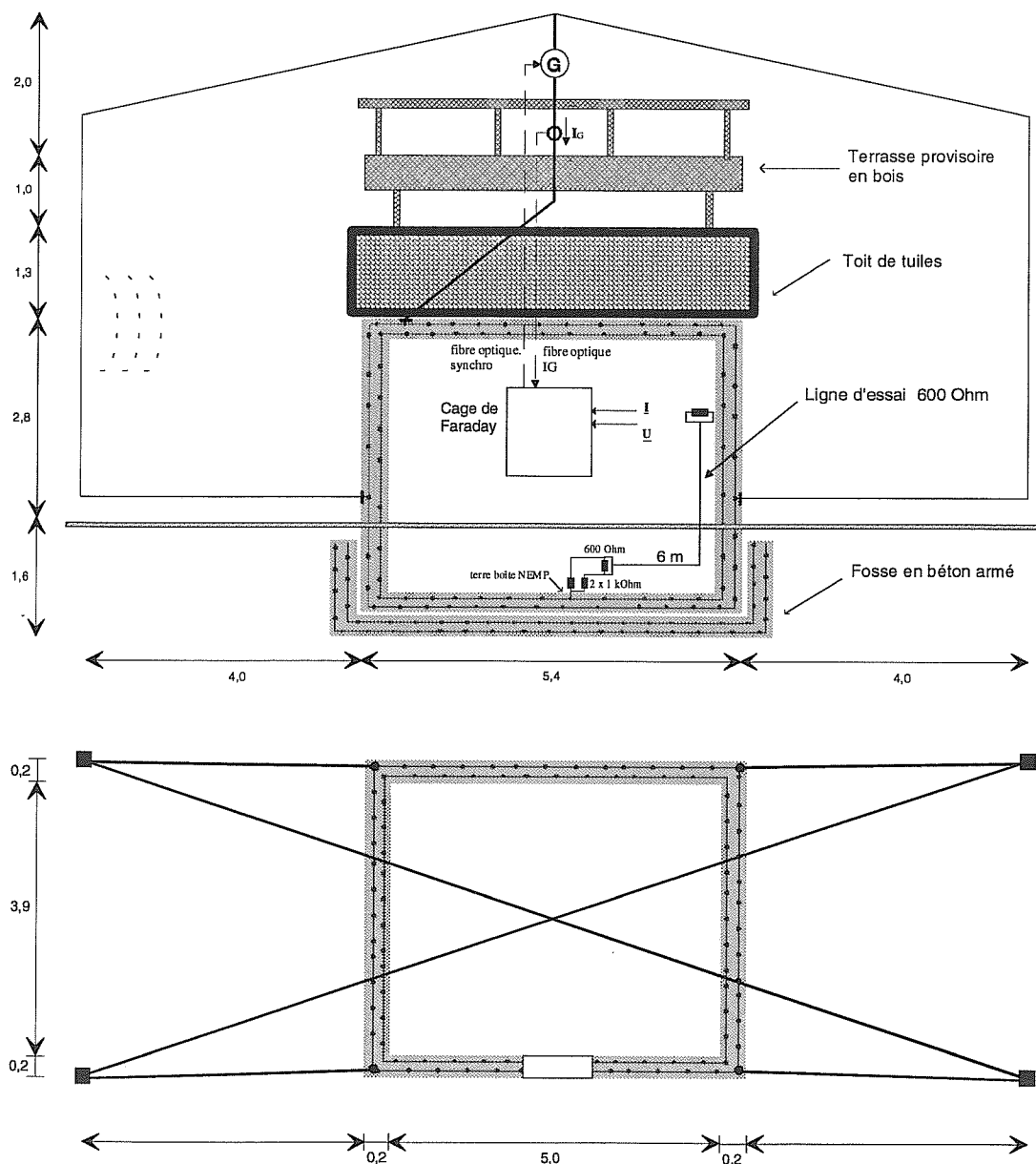


Fig. 11: Simulation du foudroiement d'un bâtiment par l'injection d'une impulsion de courant, à l'aide d'un couplage en structure coaxiale (les liaisons entre le toit et le rez sont effectuées par fibre optique)

Conclusion

Le concept d'une mise à la terre doit tenir compte absolument des sollicitations auxquelles la mise à la terre est soumise. Un conducteur de terre traditionnel jaune-vert devient un circuit ouvert à haute fréquence. Il peut également agir comme une antenne d'émission et générer des perturbations sur un appareil de contrôle-commande situé à quelques mètres.

Le principe de la terre équipotentielle permet de répondre à la plupart des problèmes.

Les méthodes de calcul par éléments finis donnent une solution optimale pour la protection des personnes à la fréquence fondamentale.

Remerciements

Nous remercions M. Dr. Sergueï Tkatchenko (RDI Moscou) et MM. les Prof. Georges Costache (Université d'Ottawa) et Michel Ianoz (EPFL) pour leur contribution au projet "mises à la terre" d'EMC Fribourg SA.

Littérature

- [1] M. Aguet et M. Ianovici: Perturbations électromagnétiques de manoeuvre et de foudre. Dans: M. Ianovici et J.-J. Morf (Ed.): Compatibilité électromagnétique; Ecoles polytechniques fédérales de Lausanne et de Zürich; Presses polytechniques romandes, 1985.
- [2] M. Aguet et J.-J. Morf: Traité d'Electricité, Volume XII: Energie Electrique. Edition Georgi, 1981.
- [3] F. Chevalley et H. Sauvain: Protection des micro-calculateurs de contrôle-commande distribués dans les postes blindés SF₆ contre les perturbations électromagnétiques. Cigré 1988 Session, Papier 36-05, 1988.
- [4] U. Marti, H. Sauvain et H. Baumgartner: Mesure des transitoires rapides dans un poste 110/16 kV. Papier 500/03, Cigré Symposium, Lausanne, 1993.
- [5] F. Gassmann, A.K. Skrivervik et D.D. Hall: Photonic field sensor for simultaneous and fully passive isotropic electric and magnetic field measurements up to 1 GHz. 11th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, Paper 90N6, 1995.

Ausführung und Instandhaltung der Erdungsanlagen von Hochspannungseinrichtungen in der Praxis

Jules Bouvard

Nordostschweizerische Kraftwerke
Parkstr. 23, 5401 Baden

1. Allgemeines

Einleitend werden die Hochspannungseinrichtungen als Übertragungsnetze und Anlagen mit Betriebsspannungen von 50 kV und mehr definiert.

Einen wesentlichen Faktor für die Dimensionierung von Erdungsanlagen bilden die einpoligen Fehlerströme, die wiederum von der Behandlung der Transformatorensternpunkte bestimmt werden.

Es wird auf den Unterschied zwischen den Netzen mit wirksamer und nicht wirksamer Erdung hingewiesen und es werden einige Richtwerte für die einpoligen Fehlerströme und deren Einwirkzeiten angegeben.

2. Voruntersuchungen

Die Kenntnis der Bodenbeschaffenheiten ist ein gutes Hilfsmittel für die Vorausbestimmung einer Erdungsanlage. Die Möglichkeit für die Messung der elektrischen Bodenwiderstände wird erklärt. Dabei ist zu beachten, dass der erfasste Tiefenbereich nicht in allen Fällen dem Messwert entspricht. Trotzdem können bessere Bodenschichten erkannt und bei Bedarf genutzt werden.

3. Richtlinien

In diesem Abschnitt wird auf die spezifischen Weisungen und Richtlinien unserer Unternehmung hingewiesen. Die zwei angewendeten Erdungskonzepte werden begründet. Bei Anlagen mit wirksam geerdeten Transformatorensternpunkten (220/380 kV) wird eine galvanische Trennung zwischen der Anlagenerdung und den in die Anlage eingeführten Objekten angestrebt. Die Umzäunungen werden im allgemeinen von der Anlagenerdung getrennt und mit einer separaten Erdung und Potentialsteuerung ausgerüstet. Das steile Potentialgefälle liegt dadurch innerhalb des Werkbereiches.

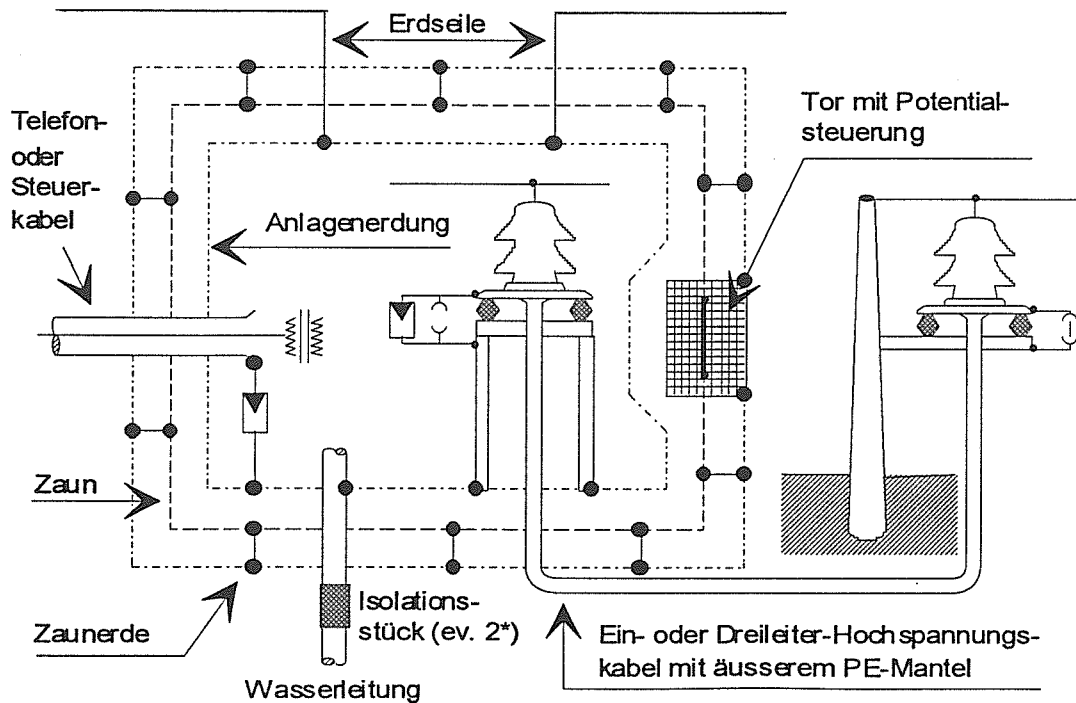


Fig. 1: Potentialtrennung

Für die Spannungsebenen 50/110 kV mit geringerem Fehlerstrom erachten wir die Vermaschung aller Erder als die günstigste Lösung. Ausgenommen von der Vermaschung werden Einleiterkabelanlagen, die nicht im Crossbonding-System verlegt sind.

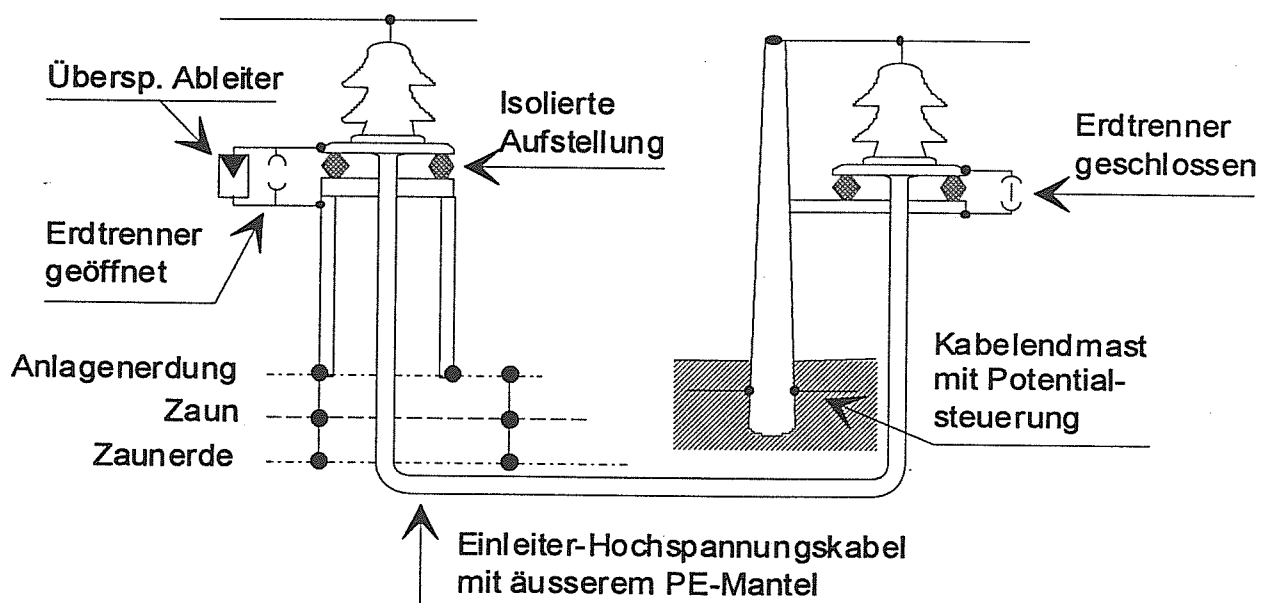


Fig. 2: Ausnahmen der Vermaschung

Hingegen führen die Erdseile von Freileitungen, die in beiden Konzepten mit der Anlagenerdung verbunden werden, zu wesentlichen Verbesserungen der Erdungs- und Stromverteilungsverhältnisse.

4. Ausführung der Anlagenerdungen

Bei der Ausführung von Anlagenerdungen bestehen Unterschiede zwischen einer Erdung für konventionelle Freiluftschaltanlagen und SF₆-Anlagen.

Neben den gesetzlichen Forderungen sind den hochfrequenten Beanspruchungen durch transiente Überspannungen Beachtung zu schenken.

In den Freiluftschaltanlagen werden Kupferbänder als Maschennetze im Boden verlegt. Die Erdungsanschlüsse von Messwandlern, Transformatoren und Schaltgeräten müssen Bestandteil einer Masche sein. Sticherder von mehr als 1 m Länge sind zu vermeiden.

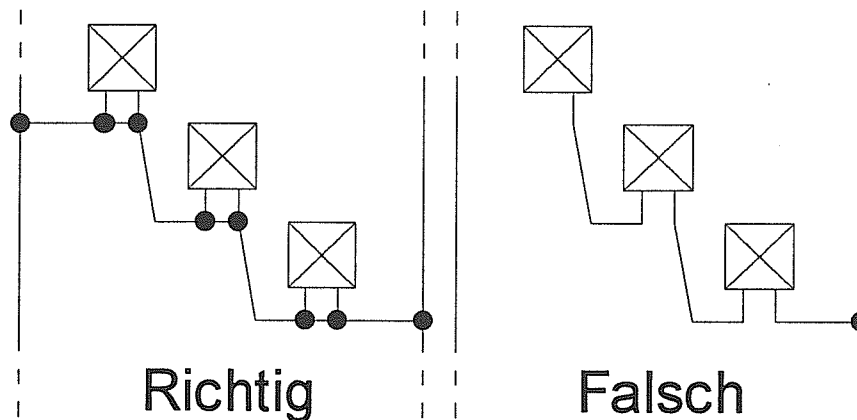


Fig. 3: Anschluss an eine Masche

Es werden weitere Möglichkeiten erwähnt, die zu einer Reduktion der transienten Überspannung beitragen.

In SF₆-Anlagen treten Transientenbeanspruchungen im MHz Bereich auf. Zum Schutze von Leittechnikkomponenten werden Stahldrahtnetze mit geringer Maschenweite zusätzlich auf die Armierungen aufgelegt. Um die Beeinflussungen zu reduzieren ist eine enge Vermaschung mit dem übrigen Erdsystem erforderlich.

5. Prüfungen

Der Nachweis, dass die Erdungsanlagen die gesetzlichen Bestimmungen erfüllen, ist nur durch Erdungsmessungen möglich. Bei den vorliegenden Ausdehnungen der Erdungsanlagen kann nur die Strom-Spannungsmethode zum Erfolg führen.

Die von uns angewendete Messmethode mit einem netzfrequenten Versuchsstrom wird erklärt.

Bei ungünstigen Beeinflussungen durch Fremdströme werden die Erderspannungen vektoriell und selektiv gemessen.

6. Unterhalt

Die Anlagenerdung ist sicher der Teil einer Hochspannungseinrichtung die keine grosse Wartung beansprucht.

Trotzdem sind neben den gesetzlich vorgeschriebenen Kontrollen visuelle Überwachungen bezüglich Anschlüssen und Korrosionen notwendig.

Aktuelle Erdungsfragen in Mittelspannungsnetzen

Dr. R. Schmid

ABB Network Partner AG
5300 Turgi

Dieser Beitrag hat zum Ziel, die häufigsten Erdungsfragen im Zusammenhang mit Mittelspannungsanlagen zu behandeln und mögliche Fehlerursachen aufzuzeigen:

1. Kabelumbauwandler und Erdung der Kabelendverschlüsse

Kabelumbau- bzw. Durchsteckstromwandler werden einerseits als Summenstromwandler für die Erdschlusserfassung und andererseits aus Kostengründen als Leiterstromwandler bei Kunststoffkabeln eingesetzt. Dabei stellt die Erdung des Kabelmantels des öfteren ein Problem dar:

Sowohl beim Summenstromwandler als auch beim Einzel-Stromwandler muss der Kabelmantel-Erdanschlussleiter durch den Stromwandler zurückgeführt werden. Dies deshalb, weil nur der Nullstrom bzw. der Leiterstrom und nicht die Summe aus Nullstrom/Leiterstrom und Kabelmantelstrom erfasst werden soll.

2. Erdungsquerschnitte in Mittelspannungszellen

Es ist denkbar, dass ausgehend von einem einpoligen Erdschluss (z. B. Kabelendverschluss in Phase L1) ein Folgefehler in einer weiteren Phase als zweiter Erdschluss (z. B. Überslag Stützisolator Phase L2) resultiert und somit ein zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung resultiert. Abhängig davon, ob eine Erdschlusserfassung vorhanden ist und mit welcher Abschaltzeit ein Erdschluss bereinigt wird, kann es sein, dass der zweipolige Kurzschluss mit Erdberührung erst als Kurzschluss mit der entsprechenden Verzögerungszeit abgeschaltet wird. Der zweipolige Kurzschlussstrom liegt in der Grössenordnung von 85% des dreipoligen Fehlerstromes. In Schaltfeldern ist es deshalb erforderlich, dass die Querschnitte des Schaltfeld-Erdungssystems für diese Fehlersituation genügend gross dimensioniert sind. Den formelmässigen Zusammenhang zeigt Figur 1. Ein Querschnitt von 50 mm² Cu wird nicht in allen Fällen genügen, wie folgendes Beispiel zeigen soll: Schaltanlage in Unterwerksnähe mit einem dreipoligen Kurzschlussstrom von 25 kA und Abschaltzeit von 1,5 sec: eine Dimensionierung der Erdungsleiterquerschnitte auf 140 mm² Cu ist erforderlich.

Ziel: Beim Auftreten des Fehlerstromes I_F während der Dauer t_F tritt keine Entfestigung des Materials auf.

Für die Querschnittbestimmung gilt

$$A = I_F \cdot \frac{\sqrt{t_F}}{k} ,$$

wobei der Materialbeiwert k für Kupfer wie folgt bestimmt werden kann:

$$k = 226 \cdot \sqrt{\ln \left(1 + \frac{t_e - t_a}{234,5^\circ \text{C} + t_a} \right)} \quad [A \cdot \sqrt{s} / \text{mm}^2]$$

mit t_e = zulässige Endtemperatur,
 t_a = zulässige Endtemperatur in $^\circ\text{C}$.

t_e : nach VDE: 300 $^\circ\text{C}$

nach IEC: 500 $^\circ\text{C}$

Für sichtbare Leiter in nicht allg. zugänglichen Anlageteilen kann Brandgefahr ausgeschlossen werden.

200 $^\circ\text{C}$ allg. zugängliche Anlageteile.

Figur 1: Bemessung von Erdungsleitungen

3. Erdung der Sekundärschutzgeräte

Grundsätzlich erstellt jeder Lieferant seine eigenen Vorschriften über die Erdung seiner Schutzgeräte.

Die Erfahrungen von ABB zeigen jedoch: die Erdung hat sinnvollerweise mit einem verzinnnten Kupferlitzenband mit minimaler Breite von 20 mm und mit möglichst geringer Länge zu erfolgen.

Es ist darauf zu achten, dass die metallischen Oberflächen korrosionsfest und elektrisch gut leitend sind. Beim Anschluss an Aluminiumoberflächen muss zwischen Kupferband und Aluminium aus Korrosionsgründen eine sog. Cupalscheibe (kupferplattiertes Aluminium) montiert werden.

4. Leitungsführung bei Sekundärschutzgeräten

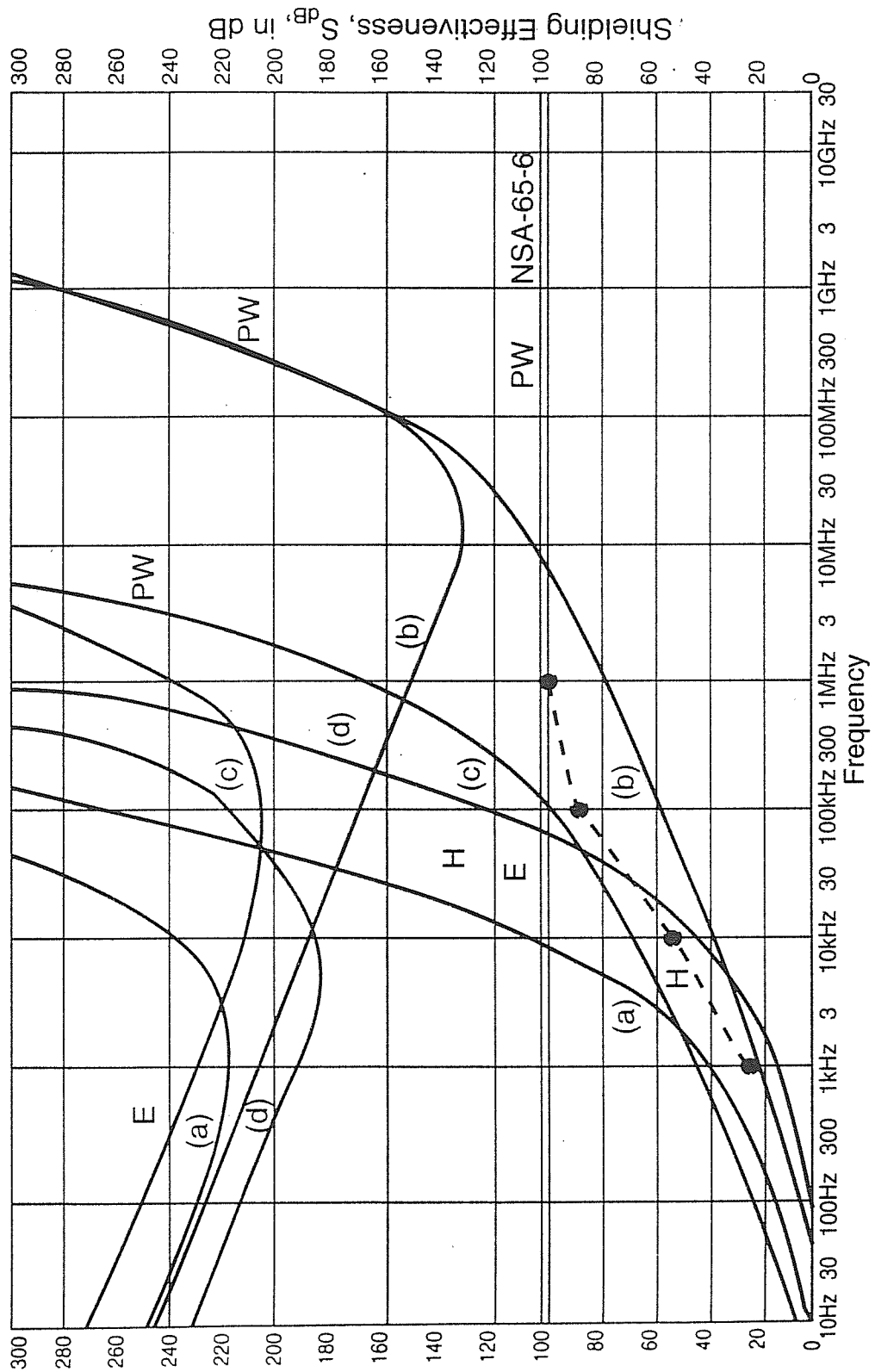
Die Signal- und Wandlerzuleitungen können für das Sekundärschutzgerät wie Antennen für Störungen wirken. Störungen können galvanisch, induktiv oder kapazitiv eingekoppelt werden.

Diese Störungen können unterschiedlicher Herkunft sein: atmosphärische Überspannungen, Lasttrennerschaltungen in gasisolierten Anlagen oder Störungen aufgrund von Kurzschlussströmen und deren Abschalten.

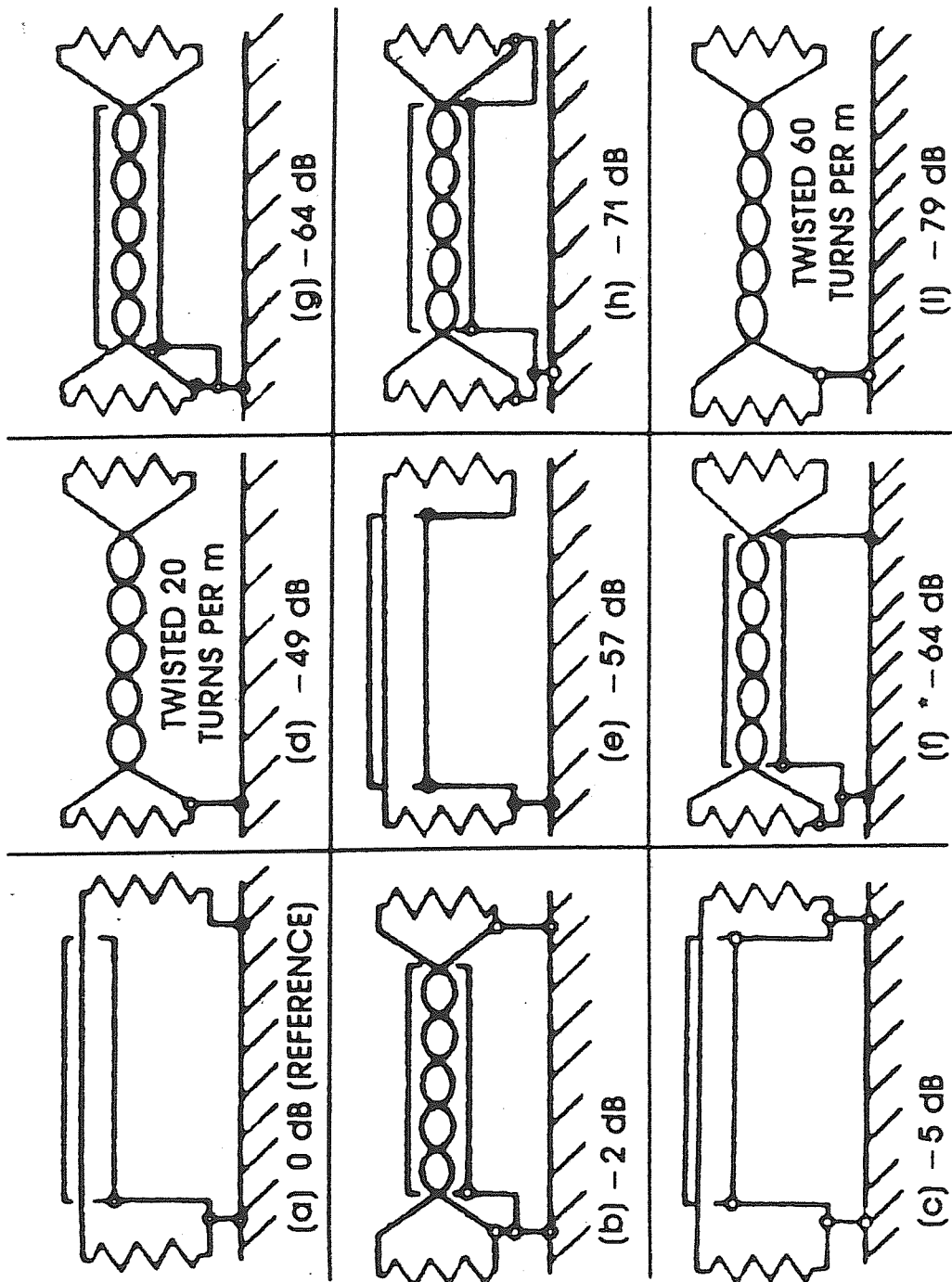
Figur 2 zeigt, dass im 50-Hz-Bereich unterschiedliche Materialien für das elektrische (E) und das magnetische (H)-Feld unterschiedliche Schirmwirkung aufweisen. Die Schirmwirkung gegen magnetische Felder bei 50 Hz ist relativ schwach. Die Auswirkungen unterschiedlicher Leiter-/Schirm-Anordnungen auf die Dämpfung zeigt Figur 3.

Eine optimale Verdrahtung erreicht man, wenn

- der Signalleitungsstrang und der Wandlerzuleitungsstrang getrennt mit möglichst grossem Abstand geführt werden und Parallelführungen auf ein absolutes Minimum im Bereich der Klemmen reduziert werden. Kreuzungen der beiden Stränge sind rechtwinklig vorzunehmen.
- Die Leiter werden verdreht, um die Einkopplung zu reduzieren
- Die Leiterstränge werden in einem metallischen Rohr geführt oder werden als Kabelbaum mit Kupfergeflechtmantel ausgeführt
- Die Erdung des Rohres bzw. des Geflechtmantels erfolgt an beiden Enden möglichst nahe am Kabelende. Es ist darauf zu achten, dass möglichst der volle Umfang des Mantels kontaktiert wird. Das Rohr- bzw. Mantelende liegt dabei möglichst nahe bei den Anschlussklemmen. Optimal ist die Verwendung von Anschlusssteckern mit metallischem bzw. metallisiertem Gehäuse.



Figur 2: The shielding effectiveness of common sheet metals, 1 m separation.
a: 26-gauge steel; b: 3-oz. copper foil; c: 0.030-in. aluminum sheet; d: 0.003-in. Permalloy
(aus „The Electrical Engineering Handbook“, CRC Press)



*PREFERRED CIRCUIT FOR HIGH FREQUENCIES

Figur 3: Shield termination is critical on transmission lines
(aus „The Electrical Engineering Handbook“, CRC Press)

5. Kabelmantelerdung

Im Mittelspannungs-Verteilnetz werden in der Regel die Kabelmäntel beidseitig geerdet. Dies führt zusammen mit den Niederspannungskabeln zu einem möglichst tiefen Erdungswiderstand der einzelnen Schaltanlagen.

Die Kabel werden jedoch nur einseitig geerdet, wenn

- mit Potentialverschleppungen gerechnet werden muss, z.B. im Bereich von Unterwerken bei Erdschluss auf der 110-kV-Ebene
- die induzierten Kabelmantelströme zu Kabelmantelverlusten führen, die höher als ca. 5% der gesamten Leitungsverluste sind. Dies ist bei Einleiterkabeln dann der Fall, wenn sie nicht als Quasi-Dreileiterkabel in einem Rohr (d.h. in einzelnen Rohren distanziert) verlegt werden oder wenn der Leiterquerschnitt $240 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ übersteigt.

Bei nur einseitiger Kabelmantelerdung muss das „offene“ Ende über einen Überspannungsableiter mit parallel angebrachtem Überbrückungstrenner angeschlossen werden. Bei der Dimensionierung des Ableiters ist darauf zu achten, dass die Restspannung tiefer als die Durchschlagspannung der Kabelmantel-Isolation liegt.

6. Anschluss von Überspannungsableitern

Ziel ist es, die Überspannungsableiter möglichst nahe beim zu schützenden Objekt anzuordnen und die Anschlussverbindung so auszuführen, dass sie möglichst induktivitätsarm ist, d. h. möglichst kurz, mit möglichst kleiner Schleifenfläche und mit Kupferband anstelle Kupfer-Rundleiter.

7. Erdung von Trafostationen

Es ist heute Stand der Technik, dass beim Bau von neuen Trafostationen das Fundament mit Armierungen versehen wird und als Fundamenterde benutzt wird. Zu beachten dabei ist, dass die Armierungsnetze durchgehend verschweisst sind, das Gitter eine Maschenweite kleiner 15 cm aufweist und der Stabdurchmesser grösser gleich 10 mm dimensioniert ist. Das Gitter ist doppelt anzuschliessen mit einem Querschnitt von mindestens $50 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$.

Beim Bau von Trafostationen wird in der Regel ein Aushub vorgenommen, der die Verlegung eines Ringerders ohne grossen Aufwand erlaubt. Dieser wird in der Regel im Abstand von ca. 1 m vom Gebäude in einer Tiefe von ca. 0,7 m verlegt. Dafür verwendet man in der Regel Kupferband mit den Dimensionen 30 mm x 3 mm. Dieser Ringerder ist ebenfalls doppelt anzuschliessen.

Detaillierte Erläuterungen zu den Erdungsvorschriften sind im ETG-Tagungsband Nr. 1d (1987) „Die neuen Erdungsvorschriften für Starkstromanlagen“ wiedergegeben.

8. Erdung des Sternpunktes des Mittelspannungsnetzes

Die Frage der Sternpunktterdung, die damit in Zusammenhang stehenden betrieblichen, schutztechnischen und geräte technischen Fragen werden ausführlich an der Tagung SEV/VDE/SEE „Sternpunktbehandlung in Verteilungsnetzen, Zukunftsaussichten“ vom 7./8. November 1995 in Mulhouse dargelegt. Auf eine Betrachtung wird deshalb hier verzichtet.

Spezifische Erdungsprobleme bei Bahnanlagen am Beispiel der Neubaustrecke der S-Bahn Zürich

Manfred Lörtscher

Schweizerische Bundesbahnen

Postfach, 8021 Zürich

1. Einleitung und Grundlagen

In der seit dem 5. Dezember 1994 neu in Kraft getretenen Verordnung über elektrische Anlagen von Bahnen (VEAB) [1] sind im Artikel 39 die Grundsätze der Erdungsvorschriften bei Bahnen und im Artikel 40 das Verhalten beim Zusammentreffen von Erdungssystemen festgehalten. Artikel 40 verlangt schlicht, dass keine unzulässigen Berührungs- oder Schrittspannungen auftreten dürfen. Ob die Erdungssysteme zu trennen oder zusammenzuschliessen sind - beide Möglichkeiten werden erwähnt - wird den Betriebsinhabern überlassen. Sogar der Gesetzgeber erkennt hierin die Problematik dieses Fachgebietes und lässt die beiden sehr gegenläufigen Lösungen zu. Die europäischen Bahnen - wobei hier noch die verschiedenen Bahnstromsysteme zu beachten sind - kennen keine weitergehenden Vorschriften im Erdungsbereich. Dies gilt auch innerhalb den SBB; die Lösungen beruhen grundsätzlich auf den Artikeln der VEAB. Für die maximal zulässigen Berührungs- und Schrittspannungen gelten auch für die Bahnen die Werte in Anhang 3 der Starkstromverordnung. Im Kurzschlussfall rechnen wir mit einer gesicherten Abschaltzeit von 120 ms.

Am konkreten Beispiel der Neubaustrecke der S-Bahn Zürich werden Probleme und Lösungen gezeigt, welche den heutigen Stand der Technik recht gut wiedergeben. Dabei werden die Erfahrungen aus Planung und Betrieb sowie die Ergebnisse der umfangreichen Simulationen und Messungen dargestellt. Messmethode und Simulationsmodell wurden zusätzlich an einer einfachen, einspurigen Tunnelstrecke in wenig überbautem Gebiet überprüft.

Die 12 km lange S-Bahn-Neubaustrecke besteht grösstenteils aus Kunstbauten. Davon verlaufen 8,5 km im Hirschengraben- und Zürichbergtunnel und 1,5 km auf den Neugutviadukten. Bei den Tunnel werden bestehende Gebäude teilweise nur knapp unterfahren, was zu elektrischen und mechanischen Beeinflussungsfragen führte. Umfangreiche 15-kV-Mittelspannungskabelanlagen in den Tunnel, Massnahmen gegen Lärm und Erschütterungen, Streuströme der Strassenbahn sowie der Schutz der Bauwerke gegen Korrosion stellen besondere Anforderungen an die Bahnerdung und Bahnstromrückführung. Dies führte zu einem stark vermaschten Bahnerdesystem.

2. Elemente der Bahnerdung und Bahnstromrückführung (Bild 1)

2.1 Rückstromführung über die Gleise

Im Bereich der Neubaustrecke wurden die Gleisstromkreise als Frequenz-Ton-Gleisstromkreise (FTGS) ohne Isolierstösse ausgeführt. Somit stehen für die Rückstromführung jeweils beide Schienen pro Gleis zur Verfügung. Über die FTGS-Schienenverbinder fliessen Traktionsausgleichsströme zwischen der isolierten und der geerdeten Schiene.

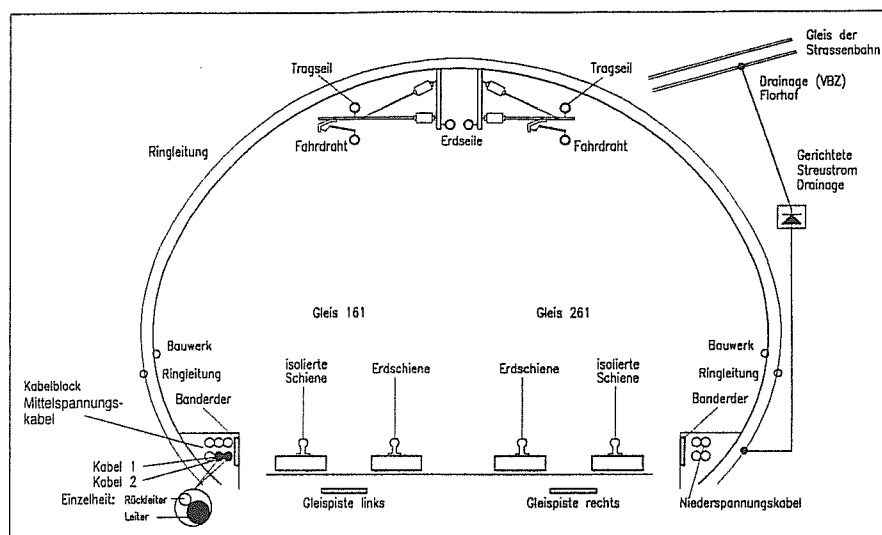


Bild 1: Übersicht der Elemente der Bahnerdung und Bahnstromrückführung im Hirschengrabentunnel (S-Bahn Zürich)

2.2 Erdseile und Verbindungen der Tragwerkerde mit dem Gleis

Alle Fahrleistungsstützpunkte werden einheitlich pro Streckengleis mit einem Erdseil aus 95 mm² Kupfer verbunden. Die Stützpunkte werden auf der freien Strecke alle 250 m und in Tunnel mit Ringleitungen alle 100 m mit der geerdeten Schiene des Gleises verbunden. Bei Doppelspurstrecken werden zusätzlich die beiden geerdeten Schienen miteinander verbunden.

2.3 Einbezug der Bauwerkserde und Streustrom-Drainagen

Besondere Erdungsmassnahmen wurden dort erforderlich, wo starke Gefährdungen der tragenden Strukturen von Bauwerken durch Gleichstromstreuströme zu erwarten sind. Durch die Lage des Strassenbahnnetzes (VBZ) und der zugehörigen Gleichrichterstationen mit einer Gleichspannung von 600 V liegen die Kunstbauten der Bahnhöfe Zürich-Museumstrasse und Stadelhofen sowie der dazwischenliegende Hirschengrabentunnel im ungünstigen Bereich der austretenden Streuströme. Je nach Ausführungsart der Aussen- und Innenschale in den einzelnen Bauwerksabschnitten wurden ausgewählte Armierungseisen in Längs- und Querrichtung gezielt verschraubt oder verschweisst und durch den Einbau von Erdungsbrücken an die Oberfläche geführt und mit den vorher erwähnten Ringleitungen der Bahnerde verbunden. Durch diese Massnahmen entstand eine starke Vermaschung der Bahn- und Bauwerkserde. Um die Streuströme gezielt aus dem vermaschten Erdungssystem herauszuführen, wurden an fünf Orten Verbindungen von der kombinierten Bahn-/Bauwerkserde an die Gleise der Strassenbahn hergestellt [2].

2.4 Massnahmen gegen Lärm und Erschütterungen

An verschiedenen Stellen wurden besondere Massnahmen zur Dämpfung von Lärm und Erschütterungen [3] getroffen. Das Material der Unterschottermatten (USM) und die Federelemente der Masse-Feder-Systeme (MFS) sind elektrisch nicht leitend. Insbesondere wurden die Elemente der MFS mit besonderen Erdverbindungen untereinander und mit der Bahnerde verbunden.

2.5 Erdung der 15-kV-Mittelspannungskabel

Die Speisung der Neubaustrecke und der angrenzenden Strecken erfolgt auf der Seite Zürich mit zwei getrennten Leitungen ab je einem Speisepunkt (1002 und 1003) im Unterwerk Zürich. Zusammen mit den Umgehungsleitungen der Stationen Museumstrasse und Stadelhofen wurden total 25 km Mittelspannungskabel verlegt. Mehrheitlich wurden Kabel mit einem Leiter-Querschnitt von 630 mm^2 und Schirm von 70 mm^2 verlegt. Die Schirme der Kabel werden aus Gründen des Personenschutzes und der Spannungsbeanspruchung an beiden Enden geerdet. Der längste Kabelabschnitt ist 2310 m lang. Zur Entlastung der Schirme wurden zusätzliche Kabel zur Stromrückleitung neben den Hinleitern verlegt: Hier wurden T-Seile mit einem Querschnitt von 240 mm^2 eingesetzt.

3 Vergleiche auf der Strecke Birmensdorf - Bonstetten (Tunnel Landikon)

Um die wesentlichsten Einflüsse auf die Rückstromverteilung zu ermitteln, wurden vorerst Messungen und Simulationen auf einer Einspurstrecke mit Hilfsleitung, welche wie die Neubaustrecke ebenfalls mit der Fahrleitung Typ R-Fl ausgerüstet ist, durchgeführt. Im 483 m langen Landikoner-Tunnel wird die Hilfsleitung als Kabelstrecke mit $2 \times 400 \text{ mm}^2$ Mittelspannungskabel und je einem Rückleiter von 150 mm^2 geführt.

4 Versuche und Messungen

Zur Überprüfung der Kabeldimensionierung und der Rückstromverhältnisse wurden während den nächtlichen Betriebspausen auf der Strecke Museumstrasse - Stadelhofen einerseits wie auch im Landikoner-Tunnel umfangreiche Messungen an den verschiedenen Hin- und Rückleitern durchgeführt. Der "Triebfahrzeugort" wurde dabei gut reproduzierbar mit Erdungsstangen an genau definierten Stellen im Netz nachgebildet. Über eine aufwendige Versuchsschaltung (Übertragungsleitungen, Unterwerkstrafos) wurden ab einem Frequenzumformer im Unterwerk Seebach konstante Ströme von 400 A dauernd zur Verfügung gestellt.

5 Simulationsprogramm SIMNET

SIMNET - ein Simulationsprogramm für PC - berechnet die Ströme und Spannungen in einem Netzwerk mit parallel verlaufenden Leitern, also auf einer Bahntrasse mit Fahrdrabt, Trageil, Schienen, Mittelspannungskabel, Fernmeldekabel und weiteren leitenden Strukturen. Sowohl die Anordnungen im Bereich Hirschengrabentunnel/ Stadelhofen wie auch beim Landikoner-Tunnel wurden mit SIMNET simuliert. Mit diesem Programm können Stromverteilungen in komplexen Leiteranordnungen, Fahrleitungsimpedanzen, elektromagnetische Beeinflussungen sowie Berührungs- und Schrittspannungen berechnet werden.

6 Ergebnisse

6.1 Rückstromverteilung

6.1.1 Tunnel Landikon

- Etwas mehr als die Hälfte des Stromes wird durch die vorhandenen Rückleiter (Schiene, Erdseile, Kabelmäntel, Parallelrückleiter) zurückgeführt. Der restliche Rückstrom konnte nicht gemessen werden (Erdreich).
- Der Rückstrom in den Kabelschirmen und den Parallelrückleitern beträgt gesamthaft 60 bis 80% des in den beiden Kabeln fliessenden Hinstromes; in den Schirmen allein fliessen 17 bis 21%.
- Die geerdete Schiene führt rund 15% des Laststromes als Rückstrom.
- Die zwei Erdseile im Tunnel führen maximal je 15% des in der Fahrleitung fliessenden Stromes, im Minimum etwa je 5% des gesamten speisenden Stromes.

6.1.2 Hirschengrabentunnel

Die Rückstromverteilung ist hier im Vergleich zum Tunnel in Landikon viel komplexer. Die Hinströme, die von der Schaltung abhängig sind, bilden den wesentlichsten Einfluss auf die Rückstromverteilung: Bild 2a zeigt die Verteilung der Ströme an den beiden Messstellen Florhof und Pumpenschacht im Hirschengrabentunnel bei Speisung über die Oberleitung mit 400 A.

Bild 2b zeigt die Verhältnisse bei Speisung über die Hochspannungskabel. Eingespeister Strom und Kurzschlussort waren dabei unverändert. Im einzelnen ist zu erkennen:

- Bei parallelen Kabeln, die beide Strom führen, ist der Anteil des durch die beiden Schirme und Rückleiter fliessenden Rückstromes im Hirschengrabentunnel etwa gleich gross wie in Landikon, nämlich ca. 60 bis 80% des im Kabel fliessenden Hinstromes. Im 100jährigen Riesbachtunnel (von Stadelhofen südwärts) ist dieser Anteil mit 82 bis 93% wesentlich höher. Der Grund liegt darin, dass im Riesbachtunnel weniger andere Rückleiter vorhanden sind.
- Die 4 Schienen führen in den Querschnitten Florhof und Pumpe insgesamt 4 bis 30% des speisenden Stromes als Rückstrom. Eine einzelne Schiene kommt auf max. 12,5% im Vergleich zu 15% in Landikon.
- Die Erdseile führen im Hirschengrabentunnel je nach Schaltung 15 bis 30% des speisenden Stromes zurück.

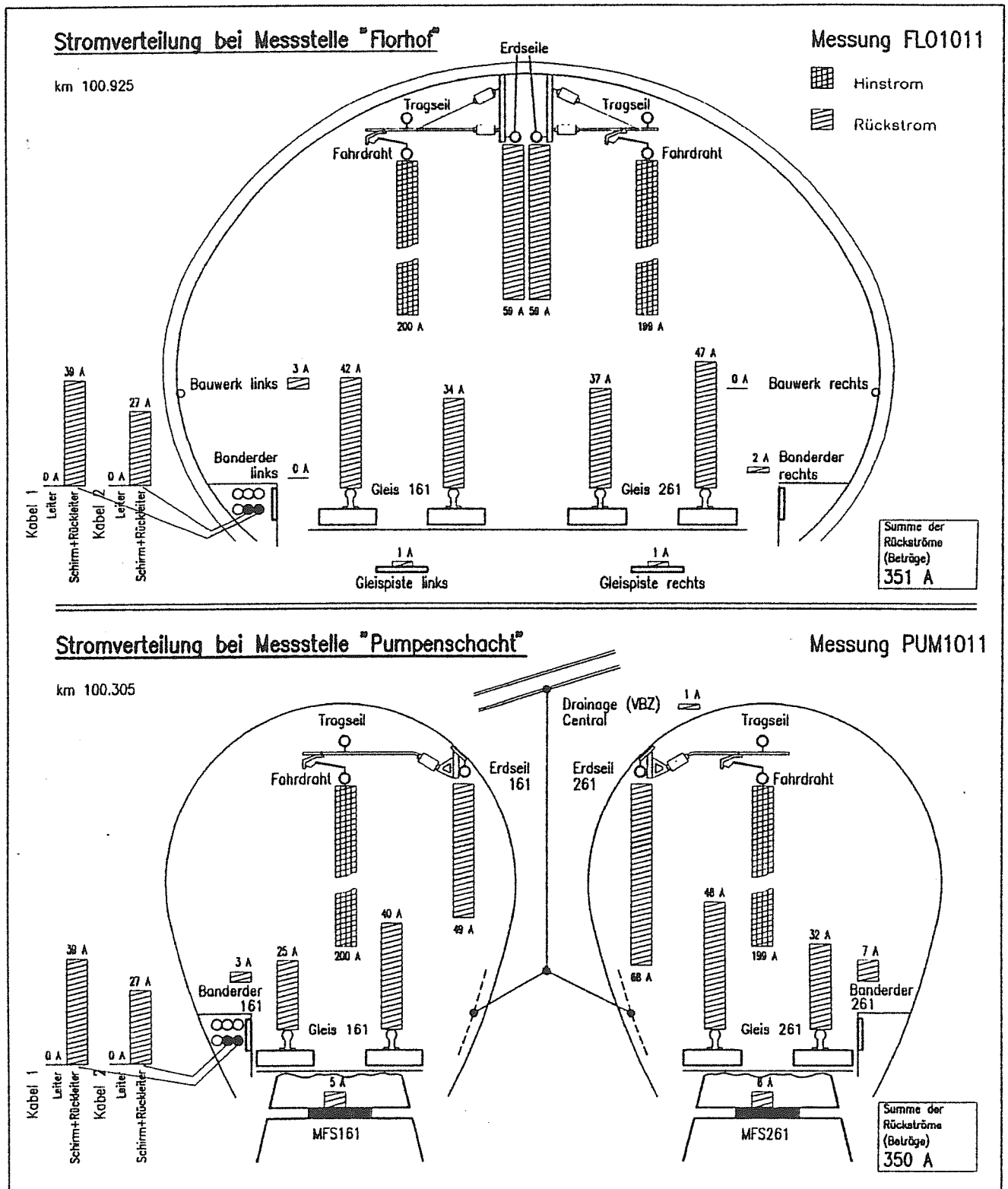


Bild 2a: Gemessene Stromverteilung im Hirschengrabentunnel mit ausgeschalteten Mittelspannungskabeln / Speisung über die Fahrleitung mit 400 A.

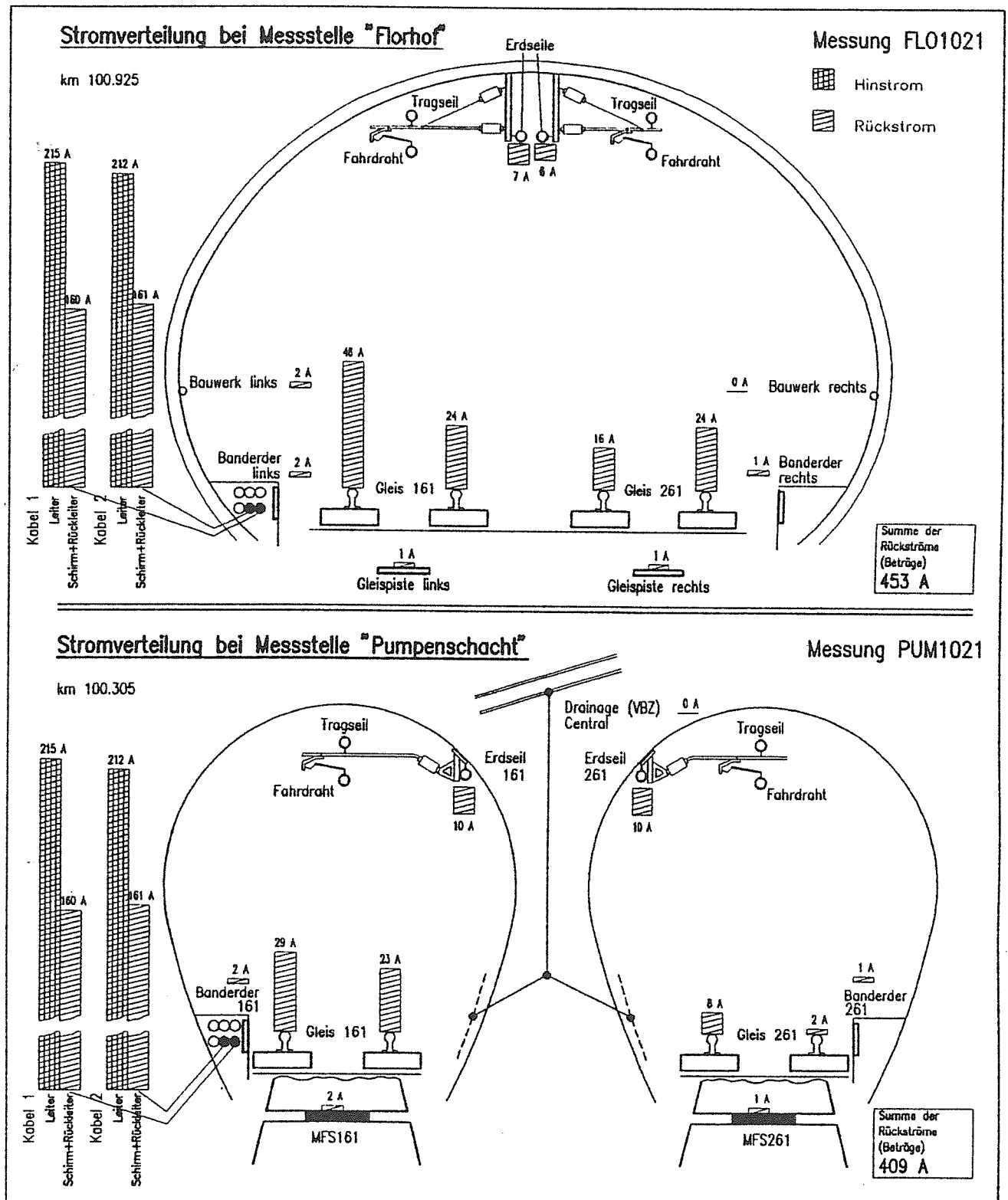


Bild 2b: Gemessene Stromverteilung im Hirschengrabentunnel mit eingeschalteten Mittelspannungskabeln / Speisung über die Kabel mit 400 A.

6.2 Simulationen mit SIMNET

- Mit den Simulationen auf dem Abschnitt Birmensdorf - Bonstetten - Mettmenstetten konnten weitgehend die in der Literatur dokumentierten Verläufe von Erd- und Rückleiterströmen gefunden werden. Bild 3 zeigt den sowohl vom Kurzschlussort zum Unterwerk zurückfliessenden wie auch den in entgegengesetzter Richtung fliessenden Strom. Die ungefähr gleichmässige Aufteilung des Rückstromes auf die hauptsächlichsten Rückleiter Schiene, Erdseil und Erde ist hier gut erkennbar. Im Bild 4 ist zu sehen, dass sich die Ausgleichsströme und der Aufbau des Erdstromes über mehrere Kilometer erstrecken. Die Aussagen dieser Simulationen können als sehr gut beurteilt werden, da die im Tunnelbereich gemessenen Werte im Bereich von einigen Ampere übereinstimmen und die Veränderungen der Messparameter auch bei der Simulation gleich reagieren.
- Ganz im Gegensatz dazu zeigt die Simulation auf dem Abschnitt Zürich-Museumstrasse - Stadelhofen völlig andere Verhältnisse: nämlich die abrupten Änderungen der Rückstromverteilung bei den Übergängen Freileitung - Kabel und Fahrleitung - Kabel. Der Anteil des Erdstromes ist vergleichsweise klein und ändert über die betrachtete Tunnelstrecke wenig. Der Grund liegt einerseits in der geringen Erdfähigkeit des Bauwerkes und andererseits in der guten Längsleitfähigkeit der stark vermaschten Bahn- und Bauwerkserde.

Vergleich von Messungen und Simulationen zeigen eine klare und erfreulich genaue Übereinstimmung.

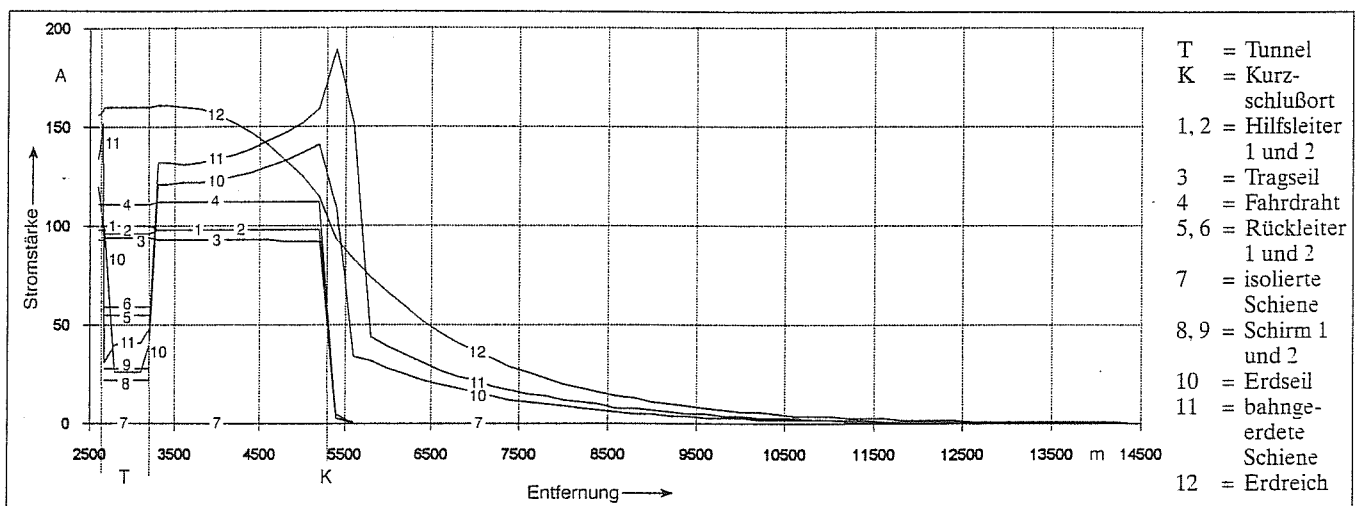


Bild 3: Mit SIMNET berechnete Stromverteilung auf dem Abschnitt Birmensdorf - Bonstetten- Mettmenstetten / Kurzschlussort 2 km vom Messort entfernt / Speisung mit 400 A

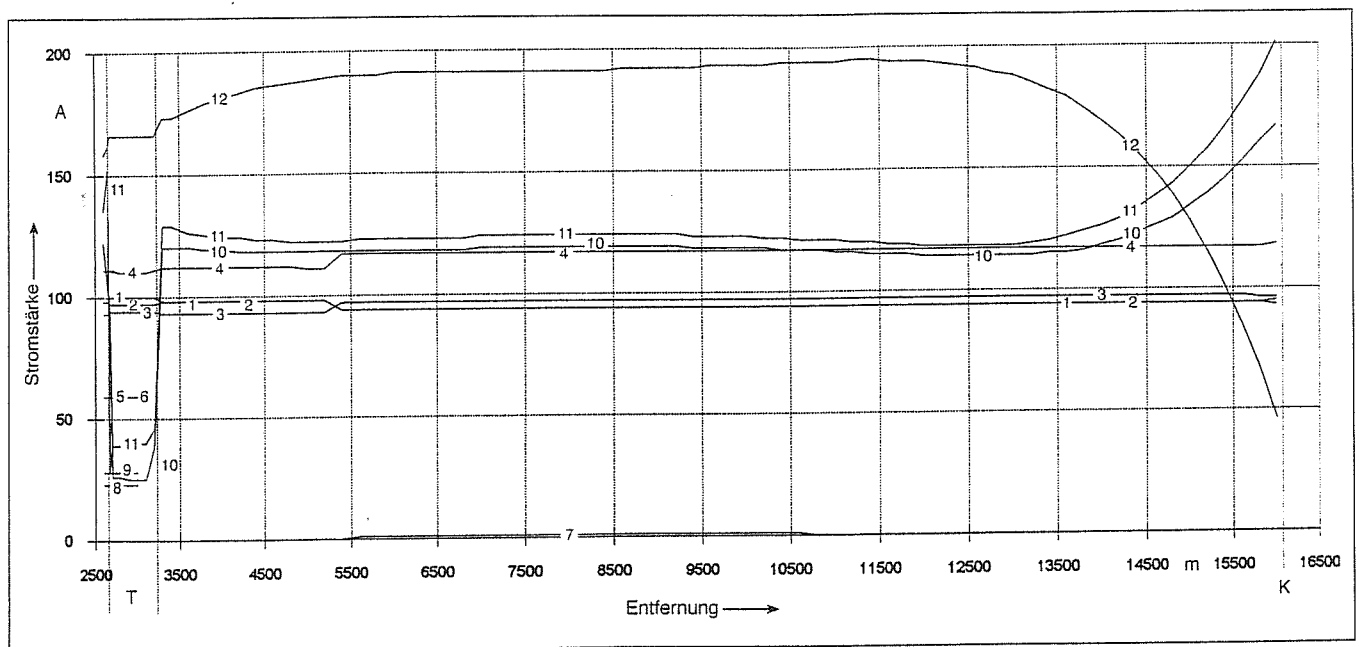


Bild 4: Mit SIMNET berechnete Stromverteilung auf dem Abschnitt Birmensdorf - Bonstetten- Mettmensstetten / Kurzschlussort 12.5 km vom Messort entfernt / Speisung mit 400 A

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Das Einhalten der Erdungsgrundsätze in der VEAB in Bezug auf Trennung oder Zusammenschluss von benachbarten Erdungssystemen führt oft bei Teilproblemkreisen zu kontroversen Forderungen. Eine rechtzeitige konstruktive Zusammenarbeit zwischen energielieferndem Werk und Bahn führten uns bis heute immer zu brauchbaren Lösungen. Wir hoffen mit diesen Ausführungen zum gegenseitigen Verständnis in diesem in der Praxis recht komplexen Problemkreis beitragen zu können.

Literaturverzeichnis

- [1] Verordnung über Elektrische Anlagen von Bahnen vom 5. Dezember 1994
- [2] Richtlinien zum Schutz gegen Korrosion durch Streuströme von Gleichstromanlagen, SEV-Korrosionskommission, Dok C3 d, Ausgabe 1981
- [3] Hejda, G.; Kleiner, P.; Rubi, H.P.; Rutishauser, G.: S-Bahn-Technik: Gleisoberbau und Körperschallschutzmassnahmen. In: Schweizer Ingenieur und Architekt. Jg 109 (1991), H. 29, S. 701-706

Literatur zum Thema

Tagungsunterlage

- ETG Die neuen Erdungsvorschriften für Starkstromanlagen ETG-Informationstagung, Reihe ETG: Band 1d. Schweizerischer Elektrotechnischer Verein, Zürich, 1987.

Bücher

- Biegelmeier, G. Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere. Lehrbuch der Elektropathologie. VDE-Verlag GmbH, 1986.
- Feist, K.-H. Starkstrom-Beeinflussungen: Bestimmungen, Grundlagen und Erkenntnisse. u. a. Expert Verlag, Sindelfingen, 1986.
- Funk, G. Der Kurzschluss im Drehstromnetz. Verlag Oldenbourg, 1962.
- Happoldt, H. Elektrische Kraftwerke und Netze. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 5. Auflage, 1978.
- Oeding, D.
- Hochrainer, A. Symmetrische Komponenten in Drehstromsystemen. Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1957.
- IEEE IEEE-Guide for Safety in AC Substation Grounding. John Wiley and Sons, Chichester, 1987.
- Koch, W. Erdungen in Wechselstromanlagen über 1 kV. Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 1961.
- Ollendorff, F. Erdströme. Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart, 1969.
- VDEW Erdungen in Starkstromnetzen. Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke—VDEW—e.V. Verlags- und Wirtschaftsgemeinschaft der Elektrizitätswerke m.b.H.—VWEW, Frankfurt am Main; 3. Auflage, 1992.
- Wiesinger, J. Handbuch für Blitzschutz und Erdung. Hasse, P. Pflaum Verlag, München, 4. Auflage, 1993.
- Wilhelm, R. Das Erdungsproblem in Hochspannungsnetzen. Springer-Verlag, Berlin, 1936.

Aufsätze

- Berger, K. Das Verhalten von Erdungen unter hohen Stossströmen. SEV-Bulletin, Bd. 37, Nr. 8, S. 197-211, 1946.
- Feist, K.H. Zone of Influence of Earth Potential Rise. Electra, No. 60, p. 57, 1978.
- Funk, G. Strom- und Spannungsbeanspruchungen von Hochspannungsnetzen je nach Art der Sternpunktterdung. ETZ-A, Bd. 79, No. 2, S. 46-52, 1958.
- Funk, G. Erdungsanlagen für Netze mit starrer Sternpunktterdung. AEG-Mitteilungen, Nr. 8/9, S. 11-19, 1958.
- Homberger, E. Das Erden als Schutzmassnahme in Hoch- und Niederspannungsanlagen. Bull. SEV/VSE, Bd. 60, Nr. 10, S. 436-441, 1969.
- Schwab, F. Erdungsmessungen in ausgedehnten Anlagen. Bull. SEV/VSE, Bd. 71, Nr. 4, S. 174-177, 1980.

Normen und Bestimmungen

- STVO Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung) vom 30. März 1994.
- SEV Erden als Schutzmassnahme in elektrischen Starkstromanlagen. SEV-Regel 3569-1 (1985), 3569-2 (1987), 3569-3 (1986).
- SEV Fundamenterder. Leitsätze des SEV (SEV 4113), 1989.
- Korrosionskom. Richtlinien zum Korrosionsschutz erdverlegter metallischer Anlagen bei Bauwerken und anderen Installationen mit Fundamentarmierungen oder Fundamenterdern. Korrosionskommission, C2 d, 1984.
- VEAB Verordnung über Elektrische Anlagen von Bahnen vom 5. Dezember 1994.
- DIN DIN VDE 0141: Erdungen für Starkstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV, 1989.

Teilnehmerliste

Name	Vorname	Firma	Adresse
Abächerli	Peter	St. W. Baden	5401 Baden
Ackermann	Martin	EGL	5080 Laufenburg
Aegerter	Christian	Elektra Birseck	4142 Münchenstein
Ammann	Kurt	GW Rüti ZH	8630 Rüti
Ammann	Michel	EOS	1001 Lausanne
Arnold	Robi	EW Altdorf	6460 Altdorf
Arnold	Walter	EW Altdorf	6460 Altdorf
Dr. Aschwanden	Thomas	FKH	8044 Zürich
Bachmann	Georges	AEW	5001 Aarau
Bachmann	René	KW Birsfelden	4127 Birsfelden
Bachmann	Walter	SEFAG AG	6102 Malters
Bachofer	Walter	ABB	5401 Baden
Balmer	Edwin	EWB	3001 Bern
Bauer	Thomas	TB Weinfelden	8570 Weinfelden
Baumann	Ruedi	EW Altdorf	6460 Altdorf
Baumgartner	Richard	St. W. Baden	5401 Baden
Bernet	Guido	EWZ	8050 Zürich
Bertoli	Marco	Verzasca	6900 Lugano
Berz	Roland	Sandoz	4002 Basel
Besold	Franz	ABB	8050 Zürich
Dr. Bieler	Kaspar	Atel	4601 Olten
Binz	Hugo	ehem. FKH	5443 Niederrohrdorf
Bircher	Peter	BKW, Elektr. Anl.	3000 Bern 25
Bless	Hans	WEW Walenstadt	8880 Walenstadt
Bösch	Ernst	EW Schwanden	8762 Schwanden
Bossart	Werner	EW Altdorf	6460 Altdorf
Bosshard	Heinz	El.- u. Wasservers.	3270 Aarberg
Bouvard	Jules	NOK	5401 Baden
Dr. Bräunlich	Reinhold	FKH	8044 Zürich
Brazerol	Arnold	EW Davos	7270 Davos-Platz
Brodbeck	Frank	Moser-Glaser	4132 MuttENZ
Brügger	Hanspeter	WEW Niederurnen	8867 Niederurnen
Bruhin	Josef	ESTI	8320 Fehraltorf
Brunner	David	ETH	8092 Zürich
Bühler	Hans-Rudolf	EWZ	8050 Zürich
Buob	Max	Colenco	5405 Baden
Burkard	Heinz	IBW	5610 Wohlen
Burkart	Edgar	GW Arth	6415 Arth
Burkhard	Bruno	Wasser- & EW	6312 Steinhausen
Dr. Büsch	Werner	GEC ALSTHOM	5036 Oberentfelden

Camponovo	Flavio	Indeltrag	6500 Bellinzona
Castelli	Giovanni	AEW	5001 Aarau
Cavelti	Giusep	EW Bündner Oberland	7130 Ilanz
Chatelain	Michel	ESTI	8320 Fehraltorf
Christen	Hugo	Wasserwerke Zug	6301 Zug
Christen	Peter	IUB	3000 Bern 6
Christof	Kuenzi	Schneider Electric	8810 Horgen
Connor	Theodor	Siemens	D-91050 Erlangen
Conrad	Guido	KW Hinterrhein	7430 Thusis
Conrad	Paul	ESTI	8320 Fehraltorf
Da Silva	Humberto A. P.	FKH	8044 Zürich
Dalbert	Roman	KW Hinterrhein	7430 Thusis
De Cia	Dino	Bakoplan	8600 Dübendorf
Deringer	Hugo	NOK	5401 Baden
Deuschle	Alfred	SBB	3052 Zollikofen
Diethelm	Peter	EVK	9533 Kirchberg
Dietrich	Ralph	Wasserwerke Zug	6301 Zug
Dietschi	Jürg	Elektra Untergäu	4616 Kappel
Doessegger	Hugo	Stationenbau	5612 Villmergen
Domenig	Max	AG Bündner KW	7250 Klosters
Doswald	Karl	EV Altendorf	8852 Altendorf
Durrer	Rudolf	ESTI	8320 Fehraltorf
Eggnauer	René	Elektra Birseck	4142 Münchenstein
Ender	Peter	KVA	5300 Turgi
Ender	Peter	AEW	5001 Aarau
Ernst	Claude	Elektra Birseck	4142 Münchenstein
Ettlin	Peter	Elektra Sissach	4450 Sissach
Federspiel	Egon	EVV-Beratung	9327 Tübach
Fehr	Werner	St.W. Winterthur	8402 Winterthur
Felber	Franz	CKW	6003 Luzern
Feldmann	Peter	GW Beckenried	6375 Beckenried
Ferrari	Roberto	KW Brusio	7742 Poschiavo
Feser	Eduard	Colenco	5405 Baden
Fessler	Peter	EWZ	8050 Zürich
Feusi	Theo	SBB	8600 Dübendorf
Fink	Otto	Dorfkorporation	9642 Ebnat-Kappel
Fischer	Kari	Elektro Fischer	6207 Nottwil
Föhn	Ralph	EW Schwyz	6430 Schwyz
Frehner	Martin	IBA	5001 Aarau
Frei	Reinhard	St.W	4800 Zofingen
Frei	Walter	Elektrobau Huser	9572 Busswil
Frey	Herbert	Frey Ing.-Büro	8804 Au ZH
Frey	Peter	Siemens-Albis	8047 Zürich
Friedrich	Roman	St.W. Winterthur	8402 Winterthur
Funk	Walter	EWZ	8050 Zürich

Galezia	René	KW Brusio	7742 Poschiavo
Gasche	Franz	SEV	8320 Fehraltorf
Gasser	Elmar	WEG	3930 Visp
Gehrig	Urs	Elektra Baselland	4410 Liestal
Geiser	Rudolf	EW Wynau	4900 Langenthal
Geisser	Carl	Weidmüller	8117 Fällanden
Gerhard	Paul	G + B AG	5036 Oberentfelden
Girod	Jean Pierre	IBA	5001 Aarau
Guérig	Adrien	NOK	5401 Baden
Gughelmetti	Armando	EW Massagno	6900 Massagno
Günther	Peter	ABB HS	8050 Zürich
Gut	Hermann	SBB	8600 Dübendorf
Gwerder	Franz	CKW	6003 Luzern
Haab	Rudolf	CKW	6002 Luzern
Häberli	Hans-Peter	EKZ	8004 Zürich
Haerri	Franz	Elektra Birseck	4142 Münchenstein
Hak	Jaromir	IWB	4008 Basel
Hälg	Roberto	Engadiner KW	7530 Zernez
Halter	Max	AG EW Tamins	7015 Tamins
Hard	Josef	EW Muri	5630 Muri
Hässig	Martin	FKH	8044 Zürich
Hayn	Uwe	Moser-Glaser	4132 Muttenz
Hediger	Josef	EW Schwyz	6430 Schwyz
Heimberg	Erich	IWB	4008 Basel
Heinemann	Thomas	GEC ALSTHOM	5036 Oberentfelden
Heinrich	Bernhard	EW St. Moritz	7500 St. Moritz
Dr. Heizmann	Thomas	FKH	8044 Zürich
Herbert	Georg	EWZ	8050 Zürich
Herbert	Mayrhofer	Ing. Büro Mayrhofer	5033 Buchs
Hew	Florian	Engadiner KW	7530 Zernez
Huber	Urs	SEV	8320 Fehraltorf
Hug	Roman	Colenco	5405 Baden
Hurni	Jakob	GD PTT	3030 Bern
Hüssy	Kurt	EKZ	8022 Zürich
Huwylser	Jörg	KW Vorderrhein	7162 Tavanasa
Imfeld	Peter	GEC ALSTHOM	5036 Oberentfelden
Indemini	Lorenzo	OFIMA	6601 Locarno
Isenegger	Andreas	Elektra Birseck	4142 Münchenstein
Item	Werner	EW Schwyz	6430 Schwyz
Iten	Konrad	Wasserwerke Zug	6301 Zug
Iten	Ulrich	EWZ	8050 Zürich
Jäger	Manfred	EKZ	8022 Zürich
Jaques	Stefan	Basler & Partner	8702 Zollikon
Jauslin	Reto	Suiselectra	4002 Basel
Jörimann	Christian	EW Wattwil	9630 Wattwil
Jossen	Paul	EW Brig-Naters	3900 Brig

Kammermann	Werner	SEV	8320 Fehraltorf
Kaptan	Cumhur	GW Meilen	8706 Meilen
Karrer	Klaus	EW Müllheim	8555 Müllheim
Kaufmann	Beda	EWZ	8050 Zürich
Keller	Fritz	SBB	3030 Bern
Keller	Willy	IBA	5001 Aarau
Kesseli	Robert	ABB HS	8050 Zürich
Kierzek	Beat	EW Müllheim	8555 Müllheim
Klaus	Anton	Basler & Partner	8032 Zürich
Kolp	Andreas	EKZ	8022 Zürich
Köppl	Georg	KOEPL	5242 Lupfig
Kostovic	Jadran	ABB	8050 Zürich
Krauss	Helmut	FKH	8044 Zürich
Krische	Gerhart	Colenco	5405 Baden
Kroiss	Heinz	ABB	8050 Zürich
Kronig	Heinz-Herbert	Kronig	3920 Zermatt
Krüsi	Enrico	ATEL	6743 Bodio
Krüsi	Kurt	IBG	9006 St. Gallen
Kuhn	Reinhard	Elektra Birseck	4142 Münchenstein
Kündig	Rudolf	IBW	5610 Wohlen
Kuster	Josef	St. W. Luzern	6002 Luzern
Kyriakidis	Evri	Ing. Büro Brüniger	7007 Chur
Lausset	Friedrich	Von Roll	4563 Gerlafingen
Lautanio	Gian Franco	St. W Lenzburg	5600 Lenzburg
Lehner	Markus	EWZ	8050 Zürich
Lehner	Walter	Stationenbau	5612 Villmergen
Lörtscher	Manfred	SBB	8021 Zürich
Losa	Edy	OFIMA	6601 Locarno
Loser	Hans	EW St. Moritz	7500 St. Moritz
Luder	Heinrich	EV	3454 Sumiswald
Luterbacher	Urs	BKW	3000 Bern 25
Luternauer	Hansruedi	EWZ	8050 Zürich
Lüthi	Peter	GD PTT	3030 Bern
Maiocchi	Luca	ETH	8092 Zürich
Manser	Paul	Schneider Electric	9053 Teufen
Marbach	Paul	BKW	3000 Bern 25
Marti	Roland	FKH	8044 Zürich
Massera	Fabio	El. Sopracenerina	6600 Locarno
Mathis	Peter	SBB	3052 Zollikofen
Meier	Felix	NOK	5401 Baden
Meier	Karl	KKW Gösgen	4658 Däniken
Meier	Rudolf	Brugg Kabel	5200 Brugg
Meier	Walter	EW St. Schaffhausen	8201 Schaffhausen
Menzi	Hans-Rudolf	EW Kt. TG	9320 Arbon
Meyer	Roland	EKZ	8004 Zürich
Dr. Minkner	Ruthard	Heafely	4028 Basel
Modolo	Bruno	EWZ	8050 Zürich
Molinari	Onelio	HESO	6963 Pregassona

Monney	Claude	GD PTT	3030 Bern
Mook	Dieter	St.Galler St.W.	9001 St. Gallen
Morosi	Alessandro	El. Sopracenerina	6600 Locarno
Moser	Paul	EW Vilters-Wangs	7323 Wangs
Motschmann	Richard	EWZ	8050 Zürich
Müller	Guido	EW Azmoos	9478 Azmoos
Müller	Hans-Peter	IBA	5001 Aarau
Müller	René	KKW Gösgen	4658 Däniken
Müller	Rudolf	GW Küsnacht	8700 Küsnacht
Müller	Willi	GEC ALSTHOM	5034 Suhr
Muster	Alfred	Bakoplan	8600 Dübendorf
Nafzger	Martin	G + B AG	5036 Oberentfelden
Neuhaus	Martin	ITECO	8910 Affoltern a. A.
Nünlist	René	AEW	5001 Aarau
Dr. Papailiou	Konstantin	SEFAG	6102 Malters
Pargäzti	Ernst	par-MELTEC	7206 Igis
Pedersen	Mogens	Brugg Kabel	5200 Brugg
Pfluger	Werner	EWB	3001 Bern
Pronini	Roberto	ETH	8092 Zürich
Rahm	Rudolf	AEW	5001 Aarau
Rais	Gustav	VSE	8023 Zürich
Dr. Reichelt	Dieter	NOK	5401 Baden
Reinhard	Hans-Rudolf	EWB	3001 Bern
Reinhardt	Rudolf	SBB	3052 Zollikofen
Renner	Gustavo	Kull AG	4552 Derendingen
Rezzonico	Angelo	HESO	6963 Pregassona
Richard	Yves	KW Birsfelden	4127 Birsfelden
Richli	Rudolf	IBA	5001 Aarau
Richner	Fritz	Holderbank	5113 Holderbank
Richter	Max	W- & EW Arbon	9320 Arbon
Ried	Kurt	Elektra Baselland	4410 Liestal
Ritter	Luigi	EWZ	8050 Zürich
Ritz	Gervas	EW Ernen-Mühlebach	3995 Ernen
Roffler	Christian	Ing. Büro Brüniger	7007 Chur
Rohrer	Richard	ABB HST	8050 Zürich
Rosser	Alexander	NOK	5401 Baden
Röthlisberger	Roman	Colenco	5405 Baden
Rothmann	Thomas	KW Ryburg-Schwörstadt	4310 Rheinfelden
Rubitschon	Urs	Wasserwerke Zug	6301 Zug
Ruf	Walter	EV Murgenthal	4853 Murgenthal
Rupp	Helmuth	St. Betr. Olten	4603 Olten
Rütschi	Heidi	FKH	8044 Zürich
Sarbach	Ewald	Studer Kabel	4658 Däniken
Sauer	H.V.	B + E	8305 Dietlikon
Sauvain	Hubert	EMC	1728 Rossens
Savary	Etienne	Condis	1728 Rossens
Saxer	Peter	SAK	9001 St. Gallen

Schäfer	Claus	Colenco	5405 Baden
Schällebaum	Willy	St. Betr. Olten	4603 Olten
Schauenberg	Rudolf	EWB	3001 Bern
Schauelberger	Jost	FOB	3900 Brig
Scheidegger	Marcel	Keller Ing.büro	8600 Dübendorf
Schenk	Heinz	Verb.Aarg. Stromkons.	5201 Brugg
Schett	George	ABB HST	8050 Zürich
Schibli	Josef	KWL	5080 Laufenburg
Schlatter	Alfred	Bakoplan	8600 Dübendorf
Schlegel	Christian	Weber	6020 Emmenbrücke
Schmid	Adrian	St. Werke Baden	5401 Baden
Schmid	Gaudenz	EW Trogenerbahn	9042 Speicher
Schmid	Heinrich	El.-u. Wasservers.	3270 Aarberg
Schmid	Johannes	Roche	4334 Sisseln
Schmid	Kurt	Kull AG	4552 Derendingen
Dr. Schmid	Roland	ABB	5300 Turgi
Schmid	Roland	SAK	9001 St. Gallen
Schmid	Roland	SAK	9220 Bischofszell
Schmutz	Peter	GEC ALSTHOM	5034 Suhr
Schneeberger	Hans Ulrich	EW Windisch	5200 Windisch
Schneider	Moritz	GEC ALSTHOM	5034 Suhr
Schneider	Rudolf	BKW	3000 Bern 25
Schnyder	Gilbert	Schnyder & Brüniger	3945 Gampel
Schnyder	Hermann	KW Wägital	8854 Siebnen
Schönbächler	Peter	EKZ	8022 Zürich
Schönbächler	Walter	GW Brüttisellen	8306 Brüttisellen
Schuler	Walter	SEFAG AG	6102 Malters
Schuhmacher	Willy	TGB	9220 Bischofszell
Dr. Schwab	Fred	Atel	4601 Olten
Schweizer	Christoph	Bakoplan	8600 Dübendorf
Schwery	Michel	Alusuisse	3930 Visp
Scoglio	Erwin	AEK	4502 Solothurn
Senn	Rudolf	EV Sevelen	9475 Sevelen
Siegrist	Hans	EV	4853 Murgenthal
Sigg	Max	SBB	3052 Zollikofen
Silva	Miguel	EKZ	8022 Zürich
Singer	Rolf	EKS	8200 Schaffhausen
Soland	René	ATEL	4601 Olten
Soltermann	Peter	EV Strengelbach	4802 Strengelbach
Sonderegger	Gallus	NOK	5401 Baden
Sprecher	Johannes	EW Wynau	4900 Langenthal
Stadler	Dionys	EW Kt. TG	9320 Arbon
Steiner	Walter	IBH	4950 Huttwil
Storf	Günther	FKH	8044 Zürich
Strauss	Peter	AEW	5001 Aarau
Strebel	Sepp	AEW	5630 Muri
Strickler	Otto	EW Opfikon	8152 Opfikon
Strittmatter	Hubert	KW Ryburg-Schwörstadt	4310 Rheinfelden
Stuber	Kurt	Holderbank	5113 Holderbank

Taufenecker	Rudolf	BKW	4705 Wangen a.A.
Treuthardt	Paul	NOK	5401 Baden
Trinkler	Bruno	EWZ	8050 Zürich
Tscherfinger	Bernhard	EW Bad Ragaz	7310 Bad Ragaz
Tschirschwitz	Thomas	Studer	4658 Däniken
Tschupperd	Benno	St. W Luzern	6002 Luzern
Tunesi	Rodolfo	BKW	3000 Bern 25
Umbricht	Christoph	Stationenbau	5612 Villmergen
Virchaux	Stéphane	EOS	1001 Lausanne
Vogelsang	Hans	GW Villmergen	5612 Villmergen
Volken	Alphons	St.W. Kloten	8302 Kloten
Vollenweider	Hans-J.	VSEI	8031 Zürich
von Arx	Stephan	Schneider Electric	8810 Horgen
Vontobel	Felix	KW Brusio	7742 Poschiavo
Voss	Eberhard	NOK	5401 Baden
Waldis	Edi	EW Schwyz	6430 Schwyz
Walker	Paolo	Az. Municip.	6500 Bellinzona
Wartenweiler	Hans-Peter	Städt. Werke	2540 Grenchen
Weber	Hans-Jürg	ETH	8092 Zürich
Dr. Werlen	Karl	ETH	8092 Zürich
Werren	Peter	Elektrow. Reichenbach	3860 Meiringen
Westhauser	Jürgen	Moser-Glaser	4132 Muttenz
Wettstein	Heinz	Burkhalter	8048 Zürich
Widmann	Peter	Roche	4334 Sisseln
Widmer	Andreas	CKW	6003 Luzern
Widmer	Markus	EW Obwalden	6064 Kerns
Wiederkehr	Peter	EW Neuenhof	5432 Neuenhof
Wiggenhauser	Martin	St.Galler St.W	9001 St. Gallen
Willi	Andreas	AG EW Tamins	7015 Tamins
Wirth	Peter	SEV/ESTI	8320 Fehraltorf
Wolf	Hans	EW Küsnacht	8700 Küsnacht
Wueger	Ulrich	Soc. Rom. d'El.	1800 Vevey
Zeder	Adrian	EKZ	8022 Zürich
Zeller	Martin	EW Flums	8890 Flums
Ziegler	Richard	Planungsbüro	9556 Affeltrangen
Zimmermann	François	Cleuson-Dix.	1951 Sion
Dr. Zimmermann	Heinrich	ATEL	4601 Olten
Züger	Alfred	NOK	8730 Uznach
Zürcher	René	SEFAG	1796 Courcevaux

