

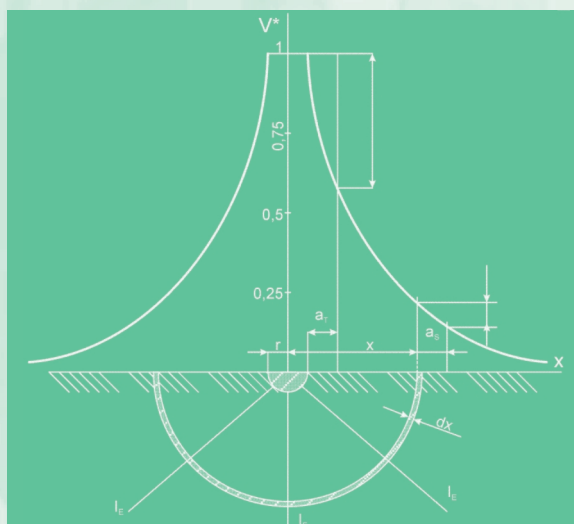
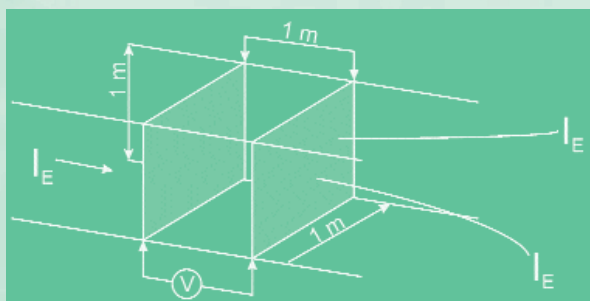
Leitfaden Netzqualität



Leonardo da Vinci — Erdung und elektromagnetische Verträglichkeit

Erdungssysteme – Grundlagen der Berechnung und Auslegung

6.3.1



Erdung und elektromagnetische Verträglichkeit

Erdungssysteme – Grundlagen der Berechnung und Auslegung

Prof. Henryk Markiewicz und Dr. Antoni Klajn, Technische Universität Breslau, Juni 2003

Übersetzung: Deutsches Kupferinstitut, August 2004



Diese Schrift wurde im Rahmen der Leonardo Power Quality Initiative (LPQI) erstellt, eines europäischen Ausbildungs- und Übungsprogramms unter der Schirmherrschaft und mit Unterstützung des Leonardo da Vinci Programms der Europäischen Union und der ICA International Copper Association. Weitere Informationen finden Sie unter: www.lpqi.org.



Deutsches Kupferinstitut (DKI)

Das Deutsche Kupferinstitut wurde 1927 als zentrale technisch-wissenschaftliche Auskunfts- und Beratungsstelle für Kupfer und Kupferlegierungen in Deutschland gegründet. Gegenstand und Anliegen seiner Beratungstätigkeit ist die Verwendung von Kupfer und Kupferlegierungen. Hier geht es um die Erhaltung herkömmlicher und um die Erschließung neuer Anwendungsgebiete.

Das Deutsche Kupferinstitut sammelt und verbreitet zu diesem Zweck alle zugänglichen Informationen aus Wissenschaft, Technologie und Praxis. Sein Ziel ist es, die dort gewonnenen Kenntnisse und Erfahrungen einem breiten Publikum bekannt zu machen und zu erläutern, und somit den allgemeinen Wissensstand und die Wertschätzung von Kupfer und Kupferlegierungen zu fördern und zu festigen.

Das Deutsche Kupferinstitut ist seit 1995 auch im Internet unter www.kupferinstitut.de und bei direkten Fragen per E-mail unter info@kupferinstitut.de zu erreichen. So können Informationen und Daten zum Werkstoff Kupfer und seinen Legierungen rund um die Uhr direkt abgefragt werden.



European Copper Institute (ECI)

Das Europäische Kupferinstitut ECI wird getragen von Mitgliedswerken der ICA (International Copper Association) und dem IWCC (International Wrought Copper Council, einem Zusammenschluss der Halbzeugwerke). Auf Basis dieser Mitgliedschaft handelt das ECI im Interesse der weltgrößten Kupfer-Erzeuger und der führenden europäischen Halbzeugwerke für den Einsatz von Kupfer. Seit seiner Gründung im Januar 1996 bündelt es die Aktivitäten eines Netzwerks aus 10 nationalen Kupferzentren in Benelux, Deutschland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Italien, Polen, Skandinavien, Spanien und Ungarn und setzt die Aktivitäten fort, die 1959 von der Copper Products Development Association und 1961 von der INCRA (International Copper Research Association) begonnen wurden.

Haftungsausschluss

Der Inhalt dieses Projekts gibt nicht notwendigerweise die Meinung der Europäischen Union wieder, noch zeichnet diese in irgendeiner Weise hierfür verantwortlich.

ECI und DKI übernehmen keine Verantwortung für irgendwelche direkten oder indirekten Folge- oder Zufallsschäden, die aus dem sachgemäßen oder unsachgemäßen Gebrauch der in dieser Veröffentlichung enthaltenen Informationen und Daten entstehen.

Copyright© European Copper Institute und Deutsches Kupferinstitut.

Ungekürzter Nachdruck bei korrekter Angabe der Quelle erlaubt.

LPQI wird in Deutschland durch die Mitglieder der nationalen Partnerschaft unterstützt:



ABB Stotz
Kontakt
GmbH



Amprobe
Europe
GmbH



Berufsbildungsstätte
Westmünsterland GmbH



Fluke
Deutschland
GmbH



Hochschule für
Technik und Wirtschaft
des Saarlandes
University of Applied Sciences
Hochschule
für Technik
und
Wirtschaft
des
Saarlandes



KBR GmbH



UPS SYSTEMS
MGE USV-
Systeme
GmbH

Erdungssysteme – Grundlagen der Berechnung und Auslegung

Einleitung

Band 6.1 dieses Leitfadens gibt einen Überblick über die Anforderungen an ein Erdungssystem und legt die Gründe für die Notwendigkeit systematischen Vorgehens dar, konzentriert auf Aspekte der Gebäude-Installation. Dieser Band behandelt die Auslegung des Erders, während Band 6.5.1 eine Einführung in dessen Gestaltung und Berechnung gibt.

Das Erdungssystem, manchmal einfach „Erdung“ genannt, umfasst die Gesamtheit aller zur Verbindung eines elektrischen Teils mit der Erde erforderlichen Maßnahmen. Das Erdungssystem ist ein wesentlicher Bestandteil sowohl von Hoch- wie Niederspannungsnetzen. Ein gutes Erdungssystem wird benötigt für:

- ◆ Blitzschutz von Gebäuden und Anlagen
- ◆ Sicherheit von Mensch und Tier durch Begrenzung von Schritt- und Berührungsspannungen auf ungefährliche Werte
- ◆ elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), also Begrenzung elektromagnetischer Störungen
- ◆ ordnungsgemäße Funktion der Stromversorgung und Sicherstellung guter Versorgungsqualität.

All diese Aufgaben werden von einem einzigen Erdungssystem wahrgenommen, das diesen Anforderungen entsprechend aufgebaut sein muss. Dabei können Teile des Erdungssystems einem bestimmten Zweck zugedacht sein, sind jedoch nichtsdestoweniger Teile eines einzigen Systems. Die Normen fordern die Verbindung aller geerdeten Teile einer Anlage untereinander, so dass sie ein System bilden.

Grundlegende Definitionen:

Erdung oder Erdungssystem ist die Gesamtheit aller Mittel und Maßnahmen, die der Verbindung eines Punktes im Stromkreis, zugänglicher leitfähiger Teile elektrischer Geräte (berührbare leitfähige Teile) oder leitfähiger Teile in der Nähe elektrischer Anlagen (fremde leitfähige Teile) mit der Erde dienen.

Erdungselektrode ist ein metallischer Leiter oder ein System räumlich unbegrenzter und untereinander verbundener metallener Leiter oder dem selben Zweck dienende andere Metallteile, im Erdreich eingebettet und hiermit in Verbindung stehend oder in Beton eingegossen, der in großflächigem Kontakt zum Erdreich steht (z. B. Fundament eines Gebäudes).

Erdungsleiter ist ein Leiter, der einen Punkt im Stromkreis, berührbares leitfähiges Teil oder fremdes leitfähiges Teil mit der Erde verbindet. Der Erdungsleiter wird außerhalb des Erdreichs verlegt oder zwar im Erdreich vergraben, aber hiervon isoliert.

Erden heißt, ein elektrisch leitfähiges Teil über ein Erdungssystem mit Erde zu verbinden.

Bezugserde ist der außerhalb des Einflussbereichs der betrachteten Erdungselektrode gelegene Teil des Bodens, insbesondere dessen Oberfläche, also dort, wo zwischen zwei beliebigen Punkten keine durch den Erdstrom verursachten Spannungen wahrnehmbar werden. Das Potenzial der Bezugserde wird stets als gleich 0 angenommen.

Erdspannung (Erdpotential) U_E ist die Spannung, die zwischen einem betrachteten Erdungssystem und Bezugserde bei einem bestimmten, durch dieses Erdungssystem fließenden Erdstrom ansteht.

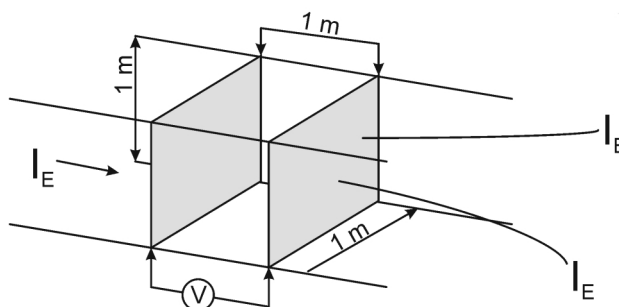


Bild 1: Diagrammskizze zur Darstellung der physikalischen Bedeutung des spezifischen Erdwiderstands ρ .

Erdung und elektromagnetische Verträglichkeit

Spezifischer Erdungswiderstand ρ ist der Widerstand eines Kubikmeters Erdreich von 1m Kantenlänge zwischen zwei gegenüber liegenden Begrenzungsflächen (Bild 1). Der spezifische Erdungswiderstand wird in Ωm ausgedrückt.

Erdoberflächen-Potenzial U_x ist die Spannung zwischen einem Punkt x an der Erdoberfläche und Bezugserde.

Elektrische Eigenschaften des Bodens

Die elektrischen Eigenschaften des Bodens lassen sich durch den spezifischen Widerstand ρ charakterisieren. Trotz obiger, relativ einfacher Definition von ρ ist die Feststellung seines Werts aus zwei Gründen zumeist ein kompliziertes Unterfangen:

- ◆ Der Boden weist keine homogene Beschaffenheit auf, sondern besteht aus verschiedenen Schichten.
- ◆ Der spezifische Widerstand eines bestimmten Bodens variiert in weiten Grenzen (Tabelle 1) und hängt stark vom Feuchtegehalt ab.

Die Berechnung des Erdwiderstands erfordert genaue Kenntnisse der Bodenbeschaffenheit, insbesondere des spezifischen Widerstands ρ .

Bodenbeschaffenheit	Spezifischer Bodenwiderstand ρ [Ωm]	
	Wertebereich	Mittelwert
sumpfiger Boden	2 - 50	30
Ziegelton	2 - 200	40
Schwemmsand und Lehmsandboden, Humus	20 - 260	100
Sand und Sandboden	50 - 3000	200 (feucht)
Torf	> 100	200
Kies (feucht)	50 - 3000	1000 (feucht)
steiniger und felsiger Boden	100 - 8000	2000
Beton: 1 Teil Zement + 3 Teile Sand	50 - 300	150
1 Teil Zement + 5 Teile Kies	100 - 8000	400
1 Teil Zement + 7 Teile Kies	50 - 300	500

Tabelle 1: Spezifische Widerstände verschiedener Böden und von Beton [2, 3].

Somit werden die starken Schwankungen von ρ zu einem Problem. In der Praxis wird meist eine homogene Bodenbeschaffenheit mit einem Mittelwert von ρ angenommen, der auf Grund von Boden-Analysen oder Messung geschätzt werden muss. Zur Messung des spezifischen Bodenwiderstands haben sich bestimmte Techniken etabliert. Ein wichtiger Punkt ist, dass die zur Messung angewandte Stromverteilung in den Bodenschichten jene im späteren Betrieb der Anlage simulieren sollte. Somit müssen derlei Messungen stets mit Vorsicht interpretiert werden. Wo keine Information zum Wert von ρ zur Verfügung steht, wird normalerweise $\rho = 100 \Omega^*\text{m}$ angenommen. Wie Tabelle 1 zeigt, kann der tatsächliche Wert jedoch sehr unterschiedlich sein, weswegen eine Abnahmeprüfung der fertigen Anlage unter Einbeziehung der Beurteilung wahrscheinlicher Einflussfaktoren, wie Wetterbedingungen und Alterung, durchgeführt werden muss.

Ein weiteres Problem bei der Bestimmung des spezifischen Widerstands des Erdreichs ist der Feuchtegehalt, der in weiten Grenzen variieren kann, abhängig vom Gebiet und den dortigen Wetterbedingungen von wenigen Prozenten für Wüstengebiete bis zu 80% für Sumpflandschaften. Hiervon hängt der spezifische

Widerstand der Erde in entscheidender Weise ab, wie in Bild 2 dargestellt, wo die Beziehung $\rho = f(h)$ für Lehm dargestellt ist. Dort wird deutlich, dass sich ρ für Feuchtwerte über 30% nur sehr langsam und nicht erheblich ändert. Unterhalb von 20% jedoch nimmt der Widerstand stark zu.

In gemäßigten Klimazonen, wie etwa in europäischen Ländern, verändert sich der Erdungswiderstand wegen seiner Abhängigkeit von der Bodenfeuchte jahreszeitlich. In Europa folgt diese Abhängigkeit näherungsweise einer Sinusform mit dem Widerstandsmaximum im Februar und dem Minimum im August. Der Mittelwert tritt im Mai und im November auf. Der Scheitelwert im Februar liegt annähernd 30% über dem Mittelwert, das Minimum im August fast 30% darunter [2].

Dabei muss bedacht werden, dass die Auswirkung von Frost der Austrocknung ähnelt – der spezifische Widerstand nimmt erheblich zu.

Daher lässt sich die Berechnung des Erdungswiderstands und die Planung der Elektroden nur mit mäßiger Genauigkeit durchführen.

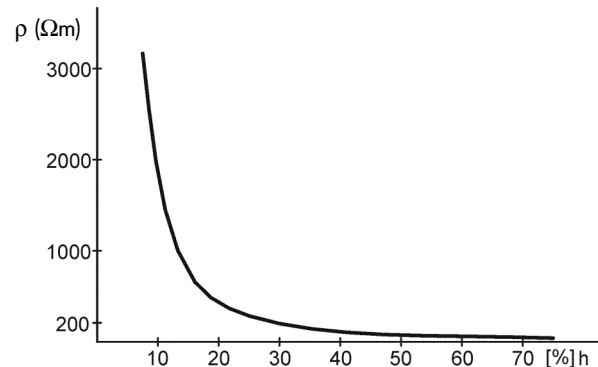


Bild 2: Spezifischer Widerstand ρ von Lehm als Funktion der Bodenfeuchte h

Elektrische Eigenschaften des Erdungssystems

Die elektrischen Eigenschaften des Erdungssystems hängen in entscheidender Weise von zwei Parametern ab:

- ◆ Erdwiderstand,
- ◆ Gestaltung der Erdungselektrode.

Der Erdungswiderstand bestimmt das Verhältnis von Erdspannung U_E zu Erdstrom. Die Gestaltung der Erdungselektrode bestimmt die in Folge Stromflusses im Erdreich auftretende Potenzialverteilung auf der Erdoberfläche. Diese Fragen werden unten kurz erläutert.

Der Erdwiderstand umfasst zwei Bestandteile:

- ◆ Ausbreitungswiderstand R_D , worunter der Widerstand des Erdreichs zwischen der Erdungselektrode und der Bezugserde zu verstehen ist,
- ◆ Widerstand R_L der Metallteile der Erdelektrode und des Erdleiters.

Der Widerstand R_L ist gewöhnlich wesentlich kleiner als der Ausbreitungswiderstand R_D . Daher wird der Erdungswiderstand gewöhnlich als gleich dem Ausbreitungswiderstand R_D gesetzt. In der Literatur wird mit „Erdwiderstand“ gewöhnlich der Ausbreitungswiderstand gemeint.

Jeder vom Stromversorger zur Verfügung gestellte Erdungsanschluss tritt als paralleler Leiter zur örtlichen Erde auf, und man darf hiervon bei Netzfrequenz und ihren Oberschwingungen sehr wohl eine niedrigere Impedanz erwarten. Seine Verfügbarkeit und Eigenschaften entziehen sich jedoch der Kontrolle des Konstrukteurs und sollten daher bei der Auslegung des Erdungssystems, das den hieran gestellten Anforderungen für sich allein gerecht werden muss, außer Betracht bleiben.

Erdungswiderstand und Potenzialverteilung

In Wechselstromkreisen ist die Erdimpedanz Z_E von ausschlaggebender Bedeutung, worunter die Impedanz zwischen dem Erdungssystem und der Bezugserde bei einer bestimmten Frequenz zu verstehen ist. Die Erdungsreaktanz besteht aus der Reaktanz des Erdleiters und der Metallteile der Erdungselektrode. Bei niedrigen Frequenzen – Netzfrequenz und zugehörigen Oberschwingungen – ist die Reaktanz gegenüber

Erdung und elektromagnetische Verträglichkeit

dem Erdungswiderstand gewöhnlich vernachlässigbar, muss bei hohen Frequenzen, wie Blitz-Transienten, jedoch mit eingerechnet werden. Somit wird bei niedrigen Frequenzen die Erdimpedanz Z_E mit dem Übergangswiderstand R_D gleichgesetzt, der wiederum als nahezu gleich dem Erdungswiderstand R angenommen wird:

$$Z_E \approx R_D \approx R \quad (1)$$

Der Erdungswiderstand R einer Erdungselektrode hängt vom spezifischen Widerstand ρ des Erdreichs sowie von der Gestalt der Elektrode ab. Um R niedrig zu halten, sollte die Stromdichte vom Metall zur Erde gering gehalten werden, das durchflossene Erdvolumen also möglichst groß sein. Ist der Strom einmal vom Metall ins Erdreich übergetreten, breitet er sich aus, und die Stromdichte wird somit kleiner. Sind die Abmessungen der Elektrode klein, z. B. punktförmig, so kommt dieser Effekt stark zum Tragen, geht aber bei einer Platte sehr stark zurück, da dort eine Ausbreitung nur am Rand auftritt. Daher haben Stab-, Rohr- oder Bänderder einen weit kleineren Ausbreitungswiderstand als beispielsweise eine Platte von gleicher Oberfläche.

Die Berechnung des Erdungswiderstands erfolgt gewöhnlich unter der Annahme eines grenzenlosen, homogenen Bodens eines bestimmten spezifischen Widerstands ρ . Es lassen sich exakte Gleichungen zur Bestimmung des Erdungswiderstands herleiten, die sich jedoch in der Praxis als nicht sonderlich gebrauchstauglich erweisen, insbesondere bei komplexen und vermaschten Erdungssystemen, bei denen die mathematischen Beziehungen bis hin zur Unbrauchbarkeit kompliziert werden. Darüber hinaus beeinflusst schon eine geringe Ungenauigkeit des spezifischen Widerstands ρ den tatsächlichen Erdungswiderstand vermaschter Erdungselektroden erheblich, und die Bestimmung des spezifischen Erdwiderstands mit der erforderlichen Genauigkeit ist oft schwierig. Daher werden exakte theoretische Gleichungen zur Ermittlung des Erdungswiderstands gewöhnlich nur bei einfachen Elektrodenstrukturen eingesetzt, um den Zusammenhang zwischen Erdspannung, Erdpotentialverteilung und Erdstrom erklärbar zu machen. Für weitläufige und vermaschte Erdelektroden setzt man für den Erdungswiderstand Näherungswerte ein.

Als Grundmodell der Erdelektroden-Anordnung zur Beschreibung der grundlegenden elektrischen Eigenschaften eignet sich eine unter der Erdoberfläche eingebrachte Halbkugel (Bild 3). Der in eine solche Erdelektrode fließende Erdstrom wird als radial ins Erdreich fließend angenommen. Die Oberfläche der Halbkugel, ebenso wie alle Halbkugel-Querschnitte d_x des Bodens, werden als äquipotenzial angenommen, und die Stromlinien stehen daher senkrecht auf diesen Oberflächen. Unter diesen Bedingungen lassen sich die Dicke d_x des Halbkugel-Erde-Mantels und der Radius x wie folgt ausdrücken (mit ρ als konstant angenommen):

$$dR = \frac{\rho}{2\pi \cdot x^2} dx \quad (2)$$

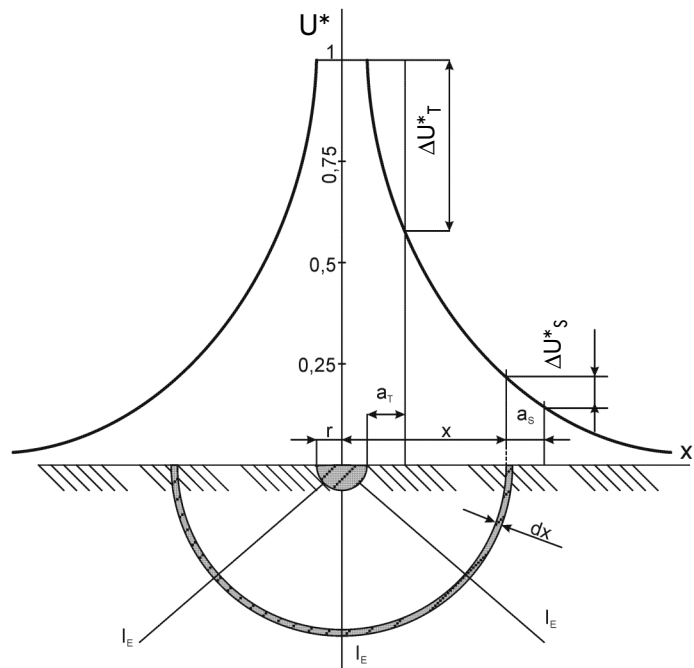


Bild 3: Darstellung einer halbkugelförmigen Erdungselektrode mit den notwendigen Parametern zur Berechnung des Erdungswiderstands und der Potentialverteilung an der Erdoberfläche (mit $\rho = const$).

- r Elektrodenradius
- x Ziel, von der Elektrodenmitte aus
- a_T, a_S Berührungs- bzw. Schrittweiten
- U^* relativer Wert der Potentialverteilung
- $\Delta U^*_B, \Delta U^*_S$ Berührungs- bzw. Schrittspannungen.

Erdung und elektromagnetische Verträglichkeit

Der Widerstand der Halbkugel-Erde-Elektrode ist:

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \int_r^{\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho}{2\pi r} \quad (3)$$

Der Erdungswiderstand hängt in erheblichem Maß von der Tiefe der Erdungselektrode im Boden ab. Dies liegt an dem in größeren Tiefen höheren und konstanteren Feuchtegehalt des Bodens. Oberflächenschichten unterliegen stärker den jahreszeitlichen und kurzzeitigen Witterungseinflüssen und dem Frost. Dieses Problem ist in Bild 4 für einen Staberder dargestellt, wo die erhebliche Abnahme des Erdungswiderstands mit zunehmender Tiefe ersichtlich wird. Es ist jedoch aus geologischen Gründen nicht immer möglich, die Erder in der gewünschten Tiefe einzubringen, entweder wegen felsigen Bodens, sonstiger oberflächennaher Hindernisse im Untergrund oder weiträumiger Ausdehnung des Erdungssystems. Es lassen sich daher zwei Elektrodentypen unterscheiden:

- ◆ *Oberflächenerder* – sind allgemein in geringer Tiefe bis etwa 1 m eingebrachte Erder. Sie bestehen üblicherweise aus Band oder Draht, angelegt als Radial-, Ring- oder Maschenelektroden oder einer Kombination hieraus.
- ◆ *Tiefenerder* – sind gewöhnlich zur Erreichung größerer Tiefen senkrecht in den Boden eingebrachte Staberder von etwa 3 m bis 30 m Länge oder mehr. Sie können als Rohr oder Stab, zum Einschlagen oder Eingraben ausgeführt sein. Eine Vielzahl senkrecht angeordneter Staberder lassen sich zusätzlich zur Bildung eines gemeinsamen Tiefenerders in geringer Tiefe mit Draht oder Band untereinander verbinden.

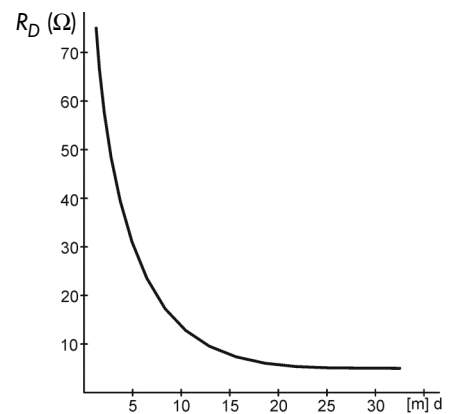


Bild 4: Beispiel des Ausbreitungswiderstands R_D eines Tiefenerders in Abhängigkeit von der zunehmenden Tiefe d

Andererseits lassen sich Tiefenerder nur bei bestimmten Bodenbeschaffenheiten einbringen, und einfache Tiefenerder haben an der Erdoberfläche eine extrem nachteilige Potenzialverteilung. Die Feldsteuerung und die sich ergebenden Schritt- und Berührungsspannungen sind wichtige Auslegungskriterien für das Erdungssystem.

Zu den typischen Elektroden-Anordnungen gehören:

- ◆ *Einfache Oberflächenerder* in Form horizontal verlegter Bänder oder Drähte, entweder mit freiem Ende oder als Ring.
- ◆ *Vermaschte Elektroden*, als horizontales Netz in geringer Tiefe.
- ◆ Kabel mit blankem Metallschirm oder Armierung mit ähnlichem Verhalten wie ein Bänderder.
- ◆ *Fundamenterder* aus elektrisch leitfähigen mechanischen Bauteilen, eingebettet im Betonfundament mit großflächigem Kontakt zum umgebenden Erdreich.
- ◆ *Staberder* von beliebiger hinreichender Tiefe zur Durchdringung von Erdschichten unterschiedlicher Leitfähigkeit; sie sind besonders dort nützlich, wo die oberen Schichten schlecht leiten oder wo die Grundstücksfläche zur Anlage eines Erdungssystems ansonsten zu beengt ist.

Detailliertere Angaben und grundlegende Gleichungen bezüglich des Erdungswiderstands der erwähnten typischen Erdungselektroden finden sich im Band 6.5.1.

Erdspannung und Oberflächen-Potenzialverteilung

Die Erdspannung sowie die Verteilung des Oberflächen-Potenzials bei Stromfluss durch das Erdungssystem sind wichtige Parameter beim Schutz vor elektrischem Schlag. Die Verhältnisse sind an dem Erdmodell in Bild 3 in Grundzügen dargestellt.

Erdung und elektromagnetische Verträglichkeit

Das Potenzial eines beliebigen Punktes im Abstand x von der Mitte der Erdelektrode, in der der Erdstrom I_E fließt, lässt sich mittels folgender Gleichung formulieren:

$$U_x = \frac{\rho I_E}{2\pi x} \quad (4)$$

und dem eingesetzten Wert:

$$U_x^* = \frac{V_x}{V_E} \quad (4a)$$

mit U_E als Erdspannung gleich dem Erdpotenzial (mit der allgemeinen Annahme, die Bezugserde habe das Potenzial null). Das Erdpotenzial lässt sich wie folgt schreiben:

$$U_E = I_E R_E = \frac{\rho I_E}{2\pi r} \quad (5)$$

Die Potenzialdifferenz zwischen zwei Punkten: einer im Abstand x und einer bei $x+a_S$, wobei $a_S = 1\text{m}$ angenommen wird, erläutert das Schrittspotenzial ΔU_S , also das zwischen zwei Füßen einer an dieser Stelle auf dem Boden stehenden Person anstehende Erdpotenzial:

$$U_S = \frac{\rho I_E}{2\pi} \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{x+a_S} \right) \quad (6)$$

und der entsprechende Wert:

$$U_S^* = \frac{V_S}{V_E} \quad (6a)$$

mit $x \geq r$.

Eine ähnliche Beziehung lässt sich für beliebige andere Abstände x and a beschreiben. Insbesondere für $x = r$ und $a = a_B = 1\text{m}$ lässt sich mittels der Formel (6) die Berührungsspannung errechnen, also die Spannung zwischen der Handfläche und dem Fuß einer die Erdelektrode oder hiermit in Verbindung stehende Metallteile berührenden Person

$$V_T = \frac{\rho I_E}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r+a_T} \right) \quad (7)$$

und dessen relevanter Wert

$$V_T^* = \frac{V_T}{V_E} \quad (7a)$$

Ein praktisches Beispiel für Berührungs- und Schrittspannungen ist in Bild 5 dargestellt. Personen A und B sind der Berührungsspannung und Person C ist der Schrittspannung ausgesetzt. In der Literatur wird manchmal zwischen der Berührungsspannung U_B und der Berührungsschlagspannung U_{BS} , (und zwischen Schrittspannung U_S und Schlagschrittspannung U_{SS}) unterschieden. Die Spannungen U_B und U_S sind die nur aus der Potenzialverteilung herrührenden Spannungen, während U_{BS} und U_{SS} die geringfügige Änderung der Potenzialverteilung berücksichtigen, die sich durch den Schlagstrom ergeben – also einbezüglich des durch den Stromfluss durch die Person verursachten Verzerrungseffekts. In der Praxis sind die Unterschiede zwischen U_S und U_{SS} bzw. U_B und U_{BS} gewöhnlich klein, so dass die Werte als gleich angenommen werden können: $U_S \approx U_{SS}$ und $U_B \approx U_{BS}$.

Erdung und elektromagnetische Verträglichkeit

Bild 5 rechts zeigt die Situation für einen Staberder, während rechts die eines Maschenerders dargestellt ist. Der Staberder (1) hat einen niedrigen Erdungswiderstand, aber eine höchst nachteilige Potenzialverteilung, während der Maschenerder (2) ein wesentlich flacheres Erdpotenzial-Profil bietet. Das Berührpotenzial (Person A) ist beim Staberder (1) erheblich größer als beim Maschenerder (2), (Person B). Auch die Schrittspannungen (Person C) fallen beim Maschenerder weniger gefährlich aus.

Wo sich ein Maschenerder nicht einsetzen lässt, bietet ein Ringerder (wie z. B. in Belgien und Deutschland üblich) eine Zwischenlösung mit brauchbarer Sicherheit zu vertretbaren Kosten.

Der Erdungswiderstand bestimmt den Wert der Erdspannung, während die Bauform der Erdungselektrode für die Potenzialverteilung an der Erdoberfläche ausschlaggebend ist. Natürlich nimmt die Bauform auch Einfluss auf den Erdungswiderstand – ein Maschenerder kontaktiert ein größeres Erdvolumen – also müssen sowohl Widerstand als auch Bauform gemeinsam betrachtet werden. Beachten Sie, dass sich Maschenerder auf Grund ihrer räumlichen Ausdehnung nicht tief ins Erdreich einbringen lassen und daher stärker auf Schwankungen der Bodenfeuchte reagieren. Eine größere Widerstandskonstanz lässt sich durch Anschluss einiger Tiefenerder an den Maschenerder erreichen.

Vermaschte Elektroden vergrößern die bei Stromdurchgang von einer Potenzialanhebung betroffene Oberfläche. Über dem Netz liegt ein „Äquipotenzial“ vor, doch an dessen Rand tritt ein Potenzialgefälle gemäß Bild 6a auf. Selbst wenn keine Berührungsspannungen auftreten – weil das Netz über sämtliche berührbaren mechanischen Metallteile um mehr als 1 m heraus ragt – können gefährliche Schrittspannungen auftreten, z. B. im Erdungssystem eines Umspannwerks. Um dies zu vermeiden, sollten die äußersten Teile des Maschenerders in größere Tiefe eingebracht werden als das übrige Netz (Bild 6c).

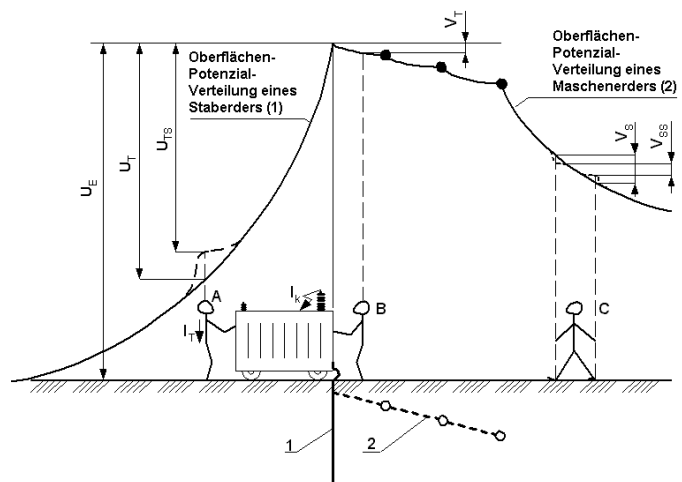


Bild 5: Vergleich der Potenzialverteilung bei Stromfluss durch das Erdungssystem für zwei verschiedene Elektroden-Bauformen: einen Staberder (1) und einen Maschenerder (2)

1	Staberder
2	Maschenerder
U_E	Erdungsspannung
V_T, V_{TS}	Berührungsspannung bzw. Berührungsschlagspannung
V_S, V_{SS}	Schrittspannung bzw. Schrittschlagspannung
I_T	Berührungsschlagstrom
I_K	Kurzschluss-Strom gleich Strom ins Erdungssystem
A, B, C	Personen bei verschiedenem Erdoberflächen-Potenzial

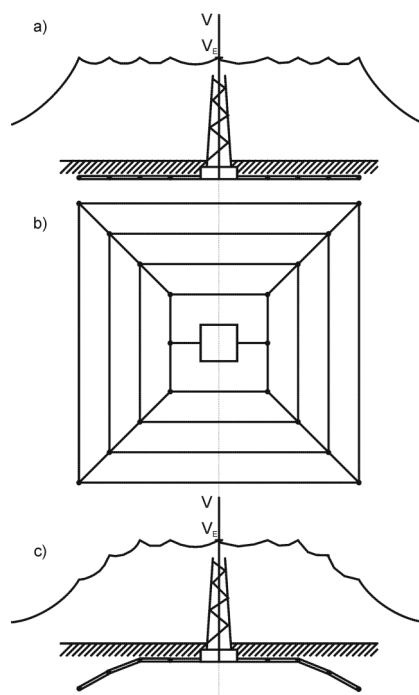


Bild 6: Darstellung des Phänomens der Potenzialverschleppung und der Oberflächen-Potenzialverteilung für zwei vermaschte Erdungselektroden.

- vermaschte ebene Elektrode mit praktisch sämtlichem Potenzial außerhalb der letzten Hülle
- ebene Elektrode
- Elektrode, bei der die beiden letzten Elemente tiefer eingebracht wurden

Eigenschaften der Erdung bei hohen Impulsströmen

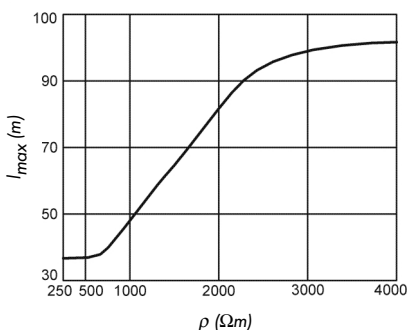
Bislang wurden die Eigenschaften von Erdungssystemen unter der Annahme mäßiger Stromflüsse unter stationären Bedingungen bei Netzfrequenz betrachtet. Unterschiede des Verhaltens von Erdungssystemen gegenüber konstanten und impulsförmigen Strömen rühren im Wesentlichen von:

- ◆ sehr hohen Stromamplituden, bis einige hundert kA
- ◆ sehr großen Stromsteilheiten – Blitzschläge erreichen typischerweise einige hundert kA/μs.

Die extrem hohe Stromdichte im Boden erhöht die elektrische Feldstärke auf Werte, die in kleinen, gasgefüllten Hohlräumen zu elektrischen Entladungen führen, was den Widerstand des Erdreichs und somit den Erdungswiderstand herabsetzt. Dieses Phänomen tritt vorwiegend in der Nähe der Erdungselektrode auf, wo die Stromdichte am größten ist, und dieser Vorgang ist von größter Bedeutung. Sein Ausmaß ist bei trockenem oder schlecht leitendem Boden besonders hoch.

Die Induktivität der Metallteile von Erdungselektroden, die zu 1 μH/m geschätzt werden kann, wird gewöhnlich für netzfrequente Betrachtungen vernachlässigt. Die Induktivität wird jedoch bei großen Stromsteilheiten zu einem wichtigen Parameter, im Bereich um Hunderte von kA/μs oder mehr. Bei einem Blitzschlag erreicht der induktive Spannungsfall ($L \cdot di/dt$) sehr hohe Werte. Folglich tragen entfernt gelegene Teile der Erdungselektrode nur noch begrenzt zur Ableitung von Blitzströmen bei.

Der Erdungswiderstand nimmt für impulsförmige Ströme gegenüber den für stationäre Zustände gültigen Werten zu. Daher ergibt eine Verlängerung einer Erdelektrode über die so genannte kritische Länge (Bild 7) hinaus keine weitere Reduktion des Erdungswiderstands für Transienten.



Bei einem Blitzschlag kommen die beschriebenen Phänomene beide zum Tragen, haben aber gegensätzliche Auswirkungen. Der hohe Erdstrom mindert den Erdwiderstand, während die hohe Frequenz die Impedanz erhöht. Die Gesamtimpedanz kann höher oder niedriger ausfallen, je nach dem, welcher Effekt überwiegt.

Bild 7: Maximale Länge l_{max} der Erdungselektroden von Blitzschutzanlagen in Abhängigkeit vom spezifischen Erdwiderstand ρ

Fazit

Der Erdungswiderstand und das Oberflächen-Potenzial sind die wichtigsten Kenngrößen eines Erdungssystems. Die elektrischen Parameter des Erdungssystems hängen sowohl von der Bodenbeschaffenheit wie von den Abmessungen der Erdungselektrode ab. Die Bodenbeschaffenheit wird durch die Leitfähigkeit des Erdreichs bestimmt, die sich je nach Art, Struktur und Feuchte von wenigen $\Omega \cdot m$ bis einige tausend $\Omega \cdot m$ unterscheiden kann. Diese Bandbreite macht die genaue Bestimmung des Erdungswiderstands schwierig. Alle den Erdwiderstand beschreibenden Beziehungen beruhen auf den Annahmen homogener Struktur und konstanter Feuchte. Idealerweise sollte das Oberflächen-Potenzial in der Umgebung der Elektrode flach verlaufen. Dies ist wichtig zum Schutz vor elektrischem Schlag und wird durch Schritt- und Berührungsspannungen beschrieben. Starker weisen eine recht nachteilige Potenzialverteilung auf, während die Verteilung bei Maschenerdern wesentlich flacher verläuft. Auch das Verhalten des Erdungssystems bei hohen Stromtransienten bedarf der Berücksichtigung. Sehr hohe Stromwerte setzen den Erdungswiderstand durch das starke elektrische Feld zwischen Elektrode und Erde herab, während sehr schnelle Stromänderungen ihn durch die Induktivität erhöhen. Die Erdungsimpedanz stellt in diesen Fällen eine Überlagerung dieser beiden Fälle dar.

Literatur:

[1] IEC 60364-5-54 Electrical installations of buildings.

[2] Rudolph W., Winter O. EMV nach VDE 0100. VDE-Schriftenreihe 66. VDE-Verlag GmbH. Berlin, Offenbach, 1995.

[3] ABB Switchgear Manual, 10. Auflage, Düsseldorf, Cornelsen Verlag 1999.

Leonardo internationale und Gründungspartner:

**European Copper Institute
(ECI)**
www.eurocopper.org

**Akademia Górniczo-Hutnicza
(AGH)**
www.agh.edu.pl

**Centre d'Innovació
Tecnològica en
Convertidors Estàtics i
Accionaments
(CITCEA)**
www.citcea.upc.es

**Comitato Elettrotecnico Italiano
(CEI)**
www.ceiuni.it

Copper Benelux
www.copperbenelux.org

**Copper Development
Association
(CDA UK)**
www.cda.org.uk

**Deutsches Kupferinstitut e.V.
(DKI)**
www.kupferinstitut.de

**Engineering Consulting and Design
(ECD)**
www.ecd.it

**Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Industriales
(ETSII)**
www.etsii.upm.es

**Hochschule für Technik und
Wirtschaft des Saarlandes
(HTW)**
www.htw-saarland.de

Istituto Italiano del Rame
www.iir.it

**Katholieke Universiteit Leuven
(KU Leuven)**
www.kuleuven.ac.be

Politechnika Wroclawska
www.pwr.wroc.pl

**Polskie Centrum Promocji Miedzi
(PCPM)**
www.miedz.org.pl

**Provinciale Industriële Hogeschool
(PIH)**
www.pih.be

Università di Bergamo
www.unibg.it

University of Bath
www.bath.ac.uk

**University of Manchester
Institute of Science and
Technology
(UMIST)**
www.umist.ac.uk

**Union International de
l'Electrotechnique
(UIE)**
www.uie.org

**Universidade de Coimbra
(ISR)**
www.uc.pt

Redaktionsrat

David Chapman
Prof. Angelo Baggini
Dr. Araceli Hernández Bayo
Prof. Ronnie Belmans
Franco Bua
Prof. Anibal de Almeida
Hans De Keulenaer
Gregory Delaere
Prof. Jan Desmet
Marcel Didden
Dr. Johan Driesen
Stefan Fassbinder
Prof. Zbigniew Hanzelka
Dr. Antoni Klajn
Reiner Kreutzer
Prof. Wolfgang Langguth
Jonathan Manson
Prof. Henryk Markiewicz
Carlo Masetti
Dr. Jovica Milanović
Dr. Miles Redfern
Andreas Sumper
Roman Targosz

Copper Development Association
Università di Bergamo
ETSII - Universidad Politécnica de Madrid
UIE
ECD-Engineering Consulting & Design
ISR - Universidade de Coimbra
European Copper Institute
Lemcko
Hogeschool West-Vlaanderen
Laborelec
KU Leuven
Deutsches Kupferinstitut
Akademia Górniczo-Hutnicza
TU Breslau
HTW-Hochschule für Technik und Wirtschaft
HTW-Hochschule für Technik und Wirtschaft
Gorham & Partners Ltd.
TU Breslau
CEI
UMIST
University of Bath
CITCEA
Polish Copper Promotion Centre

david.chapman@copperdev.co.uk
angelo.baggini@unibg.it
ahernandez@etsii.upm.es
ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be
franco.bua@ecd.it
adealmeida@isr.uc.pt
hdk@eurocopper.org
gregory.delaere@howest.be
jan.desmet@howest.be
marcel.didden@mech.kuleuven.ac.be
johan.driesen@esat.kuleuven.ac.be
sfassbinder@kupferinstitut.de
hanzel@uci.agh.edu.pl
antoni.klajn@pwr.wroc.pl
rkreutzer@htw-saarland.de
wlang@htw-saarland.de
jonathanm@gorham.org
henryk.markiewicz@pwr.wroc.pl
masetti@ceiuni.it
jovica.milanovic@umist.ac.uk
eesmar@bath.ac.uk
sumper@citcea.upc.es
cem@miedz.org.pl

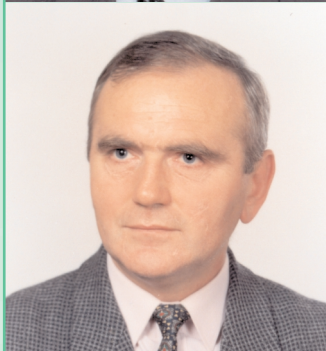


Prof. Henryk Markiewicz



Wroclaw University of Technology
Wybrzeze Wyspianskiego 27
50-370 Breslau
Polen

Tel: 00 48 71 3203 424
Fax: 00 48 71 3203 596
Email: henryk.markiewicz@pwr.wroc.pl
Web: www.pwr.wroc.pl



Dr. Antoni Klajn



Wroclaw University of Technology
Wybrzeze Wyspianskiego 27
50-370 Breslau
Polen

Tel: 00 48 71 3203 920
Fax: 00 48 71 3203 596
Email: antoni.klajn@pwr.wroc.pl
Web: www.pwr.wroc.pl



Deutsches Kupferinstitut
Am Bonnhof 5
D-40474 Düsseldorf

Tel.: +49 211 4796300
Fax: +49 211 4796310
E-Mail: info@kupferinstitut.de
Internet: www.kupferinstitut.de



European Copper Institute
Tervurenlaan 168 / b 10
B-1150 Brussel

Tel.: +32 2 7777070
Fax: +32 2 7777079
E-Mail: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org