

So prüfen Sie  
die Erde

**Megger**<sup>®</sup>

Ein  
Praxisleitfaden  
für die  
Messung des  
Erdwiderstands





## Einführung

Die Messung der Erde ist leichter, als man denkt. Sie denken zwar wahrscheinlich, dass der Boden für die Pflanzung oder den Aushub für ein Gebäudefundament geeignet ist, aber er hat auch eine elektrische Eigenschaft – Leitfähigkeit (oder niedriger Widerstand) –, die täglich in Industrieanlagen und Versorgungsunternehmen praktisch eingesetzt wird.

Ganz generell bezeichnet man mit dem Begriff „Erdwiderstand“ den Widerstand des Bodens gegen den Durchgang von elektrischem Strom. Tatsächlich besitzt der Erdboden im Vergleich zu herkömmlichen Leitern wie Kupferdraht eine relativ schwache elektrische Leitfähigkeit. Aber wenn die Fläche für einen Stromfluss groß genug ist, verringert sich der Widerstand, und der Erdboden ist in dem Fall ein recht guter Leiter. Es ist die Fülle und Verfügbarkeit der Erde, die diese zu einem unverzichtbaren Bestandteil eines gut funktionierenden elektrischen Systems macht.

Der Erdwiderstand wird für die beiden wichtigsten Anwendungsbereiche auf zwei Arten gemessen:

1. Die Wirksamkeitsbestimmung von Erdungsnetzen und -verbindungen, die im Zusammenhang mit elektrischen Systemen zum Schutz von Personen und Geräten verwendet werden.
2. Erkundung von guten (niederohmigen) Stellen im Boden oder Widerstandsmessungen, die spezifische Informationen darüber liefern können, was in einiger Entfernung unter der Erdoberfläche liegt (z. B. Tiefe bis zum Felsgrund).

Es ist nicht die Absicht dieses Handbuchs, allzu tief in die Theorie und Mathematik dieses Themas einzusteigen. Wenn Sie mehr darüber erfahren möchten, finden Sie eine Liste mit zusätzlichen Ressourcen, die auf der Rückseite dieser Broschüre zu finden sind und diese ausführlich behandeln. Vielmehr ist „So prüfen Sie die Erde“ in einem einfachen und leicht verständlichen Format für alle Anwender der Branche geschrieben.

Die in diesem Handbuch beschriebenen Prüfungen können an großen, komplexen Erdsystemen durchgeführt werden. Dazu gehören auch Kommunikationssysteme und andere schwierige Prüfumgebungen. Die Prüfungen erfolgen gemäß BS 7430 (Erdung), BS-EN-62305 (Blitzschutz) und IEEE-Norm 81.

Aufgrund der langjährigen Erfahrung bei der Bereitstellung von Geräten auf diesem Gebiet kann Megger Sie bei der Durchführung spezifischer Prüfungen beraten. Auf Anfrage steht Ihnen auch ein Mitarbeiter zur Verfügung, der Sie anruft, um Ihre spezifischen Anwendungsfragen zu besprechen.

# So prüfen Sie die Erde

## INHALTSVERZEICHNIS

Einführung.....	1
Sicherheit.....	5
<b>ABSCHNITT I</b>	
Erdwiderstand .....	6
Messung des Erdwiderstands.....	6
Praktisches Beispiel für eine Prüfmethode .....	8
Auswirkungen des Bodentyps auf den Widerstand.....	9
Abnahme des Widerstands durch Feuchtigkeit und gelöste Salze .....	10
Auswirkung der Temperatur auf den Erdwiderstand .....	12
Jahreszeitliche Schwankungen des Erdwiderstands .....	12
Bestimmung einer geeigneten Elektrodenposition .....	14
<b>ABSCHNITT II</b>	
Messung des Erdwiderstands für elektrische Erdungssysteme.....	16
Faktoren, die den minimalen Erdwiderstand verändern können .....	17
Einige grundlegende Begriffsbestimmungen .....	17
Einflussfaktoren für ein gutes Erdungssystem .....	19
Maximalwerte des National Electrical Code .....	21
Aufbau einer Erdelektrode.....	21
Grundlagen zur Prüfung des Erdwiderstands .....	23
Grundlegende Prüfmethoden für den Erdwiderstand .....	26
Auswirkungen unterschiedlicher Referenzsondenpositionen.....	30
Bonding und Durchgang .....	35
Messleitung.....	36
Lazy Spikes.....	37
Ergänzungsprüfungen .....	38
Verbesserung des Erdwiderstands.....	39
Zusätzliche Testmethoden:	
Clamp-on-Methode.....	44
Vorteile der stablosen Prüfung .....	47
Einschränkungen der stablosen Prüfung.....	48
Erdungsprüfung von Mobilfunktürmen .....	49
Prüfen mit angeschlossener Elektrode (Attached Rod Technique, ART) .....	50

Stern-Dreieck-Methode .....	54
Bestimmung der Berührungs- und Schrittspannung .....	57
<b>ABSCHNITT III</b>	
Genauere Messung des Erdwiderstands für große Erdungssysteme.....	59
Prüfprobleme bei großen Erdungssystemen .....	59
Bewältigung von Prüfproblemen bei großen Erdungssystemen .....	60
Messung des Widerstands von großen Erdelektrodensystemen:	
Schnittkurvenmethode .....	62
Prüfung an einem großen Umspannwerk .....	63
Allgemeine Anmerkungen .....	64
Anstiegsmethode .....	66
Vierleitermethode.....	69
<b>ANHANG I</b>	
Nomogramm-Richtlinie für das Erreichen eines angenehmen Erdwiderstands.....	72
<b>ANHANG II</b>	
Diagramm zu Erdprüfungsmethoden.....	74
<b>ERDUNGSMESSGERÄTE VON MEGGER.....</b>	<b>74</b>
<b>VON MEGGER ERHÄLTliches ZUBEHÖR FÜR DIE BODENPRÜFUNG .....</b>	<b>78</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>79</b>
<b>ZUSÄTZLICHE RESSOURCEN .....</b>	<b>80</b>

# So prüfen Sie die Erde

## Sicherheit

Es besteht ein inhärentes Sicherheitsproblem bei der Erdwiderstandsprüfung, das Sorgfalt und Planung durch den Anwender des Prüfgerätes erfordert.

Möglicherweise führt ein Fehler im Stromnetz dazu, dass während der laufenden Prüfung eine hohe Spannung in das Erdungssystem fließt. Das kann zu unerwarteten hohen Spannungen an den Strom- und Spannungszangen und an den Klemmen des Prüfgerätes führen.

Dieses Risiko muss von der für die Prüfung verantwortlichen Person bewertet werden, wobei der Fehlerstrom und die zu erwartenden Berührungs- und Schrittspannungen berücksichtigt werden. Die IEEE-Norm 80 mit dem Titel „IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding“ befasst sich eingehend mit diesem Thema. (In anderen Teilen der Welt können hierfür andere Normen Anwendung finden.)

Wir empfehlen, dass Anwender beim Betrieb des Prüfgerätes und während der Arbeit mit Verbindungen Schutzhandschuhe aus Gummi (ANSI/ASTM D120 oder gleichwertig) tragen und auf einer Sicherheitsmatte aus Gummi (ANSI/ASTM D178 oder gleichwertig) arbeiten sollten.

# So prüfen Sie die Erde

## ABSCHNITT I Erdwiderstand

Der Erdwiderstand wird in Ohm pro Zentimeter (Ohm-cm) ausgedrückt und ist eine grundlegende Variable, die den Widerstand eines Elektrodensystems gegen die Erde beeinflusst. Der tatsächliche Wert des Erdwiderstands muss glücklicherweise nicht gemessen werden, um den Erdwiderstand von Elektroden zu prüfen. Denken Sie zuerst an andere Bereiche, in denen der Wert des spezifischen Widerstands gemessen wird; sowie einige der Faktoren, die ihn beeinflussen und die für die Erdungsprüfung von Interesse sind.

Messungen des Erdwiderstands können für geophysikalische Erkundungen verwendet werden, wie zum Auffinden von Erzadern und Ton- oder Wasservorkommen unter der Erdoberfläche. Die Messungen können auch verwendet werden, um die Tiefe von Felsschichten oder die Dicke von Gletschern zu bestimmen.

Messungen des Erdwiderstands sind auch sinnvoll, um die beste Position und Tiefe für Elektroden mit geringem Widerstand zu ermitteln. Solche Studien werden beispielsweise durchgeführt, wenn ein neues Kraftwerk, eine Station zur Stromerzeugung, ein Umspannwerk, ein Sendemast oder eine Telefonzentrale gebaut werden soll.

Schließlich kann der Erdwiderstand auch verwendet werden, um den Grad der Korrosion in unterirdischen Leitungen für Wasser, Öl, Gas, Benzin usw. zu bestimmen, wo niedrige Widerstandswerte auf eine stärkere Korrosion hinweisen. Diese Art von Informationen ist ein guter Anhaltspunkt für die Installation von Kathodenschutzmaßnahmen.

### Messung des Erdwiderstands

Zur Messung des Erdwiderstands werden ein Gerät mit vier Anschlüssen sowie vier klein dimensionierte Elektroden eingesetzt, die auf die gleiche Tiefe und den gleichen Abstand in einer geraden Linie heruntergefahren werden (Abb. 1). Vier separate Elektrodenkabel verbinden die Elektroden wie in der Abbildung gezeigt mit den vier Anschlüssen am Gerät. Daher wird diese Prüfung als Methode mit vier Hilfserdern bezeichnet.



## So prüfen Sie die Erde

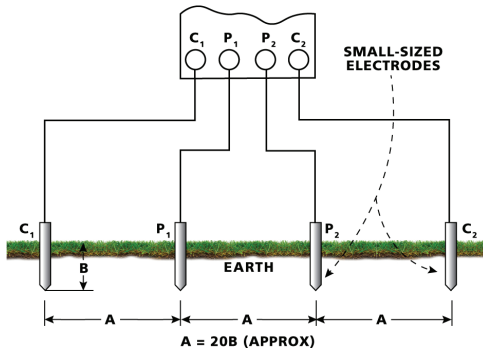


Abb. 1: Methode zur Messung des Erdwiderstands mit vier Hilfserdern

Dr. Frank Wenner vom U.S. Bureau of Standards (jetzt NIST) entwickelte im Jahr 1915 die theoretischen Grundlagen für diese Prüfung [1]. Er bewies, dass folgende Formel gilt, wenn die Elektrodentiefe (B) im Vergleich zum Abstand zwischen den Elektroden (A)<sup>1</sup> klein gehalten wird:

$$\rho = 2\pi AR$$

Dabei ist  $\rho$  der durchschnittliche Erdwiderstand der Tiefe A in Ohm pro cm,  $\pi$  die Konstante 3,1416, A der Abstand zwischen den Elektroden in cm und R das Messergebnis des Megger Erdungsmessgerätes in Ohm.

Mit anderen Worten: Wenn der Abstand A zwischen den Elektroden 4 Fuß beträgt, erhalten Sie den durchschnittlichen Erdwiderstand bis zu einer Tiefe von 4 Fuß wie folgt:

1. Rechnen Sie 4 Fuß in Zentimeter um, um A in der Formel zu erhalten:  
 $4 \times 12 \times 2,54 \text{ cm} = 122 \text{ cm}$
2. Errechnen Sie  $2\pi A$ , um die Konstante für eine bestimmte Prüfkongfiguration zu erhalten:  
 $2 \times 3,14 \times 122 = 766$

Wenn Ihr Messgerät beispielsweise  $60 \Omega$  anzeigt, beträgt der Erdwiderstand  $60 \times 766$  oder  $45,960 \text{ Ohm-cm}$ .

Es gibt andere Methoden zur Messung des Erdwiderstands, wie z. B. die Schlumberger-Methode. Die Wenner-Methode ist in der Elektroenergiebranche jedoch das gängigste Verfahren.

<sup>1</sup>B = 1/20A wird generell empfohlen

# So prüfen Sie die Erde

## Praktisches Beispiel für die Prüfmethode

Eine Erdölgesellschaft betreibt eine 10-Zoll-Pipeline mit 6300 Fuß Länge, die durch unwegsames Gelände führt [2]. Nach einer Korrosionsleckage wollten sie den Erdwiderstand entlang der Leitung prüfen. Dabei ging es vor allem um Bereiche mit geringem Widerstand. Für die Untersuchungen entlang der Leitung wurde ein Megger Erdungsmessgerät eingesetzt.

Zunächst wurde die durchschnittliche Tiefe der Pipeline aus einer Profilkarte ermittelt. Diese Tiefe lag bei 4 Fuß. Daher wurden vier Elektroden in Abständen von 4 Fuß mit einem starken Baumwollseil verbunden. Der Erdwiderstand sollte in Abständen von 20 Fuß gemessen werden. Abb. 2 zeigt einen Teil der Ergebnisse. Die Messwerte der Grubentiefenkorrosion und des Megger Erdungsmessgeräts werden für Punkte entlang der Pipeline dargestellt. Beachten Sie, dass niedrige Widerstandswerte auf eine stärkere Korrosion hinweisen.

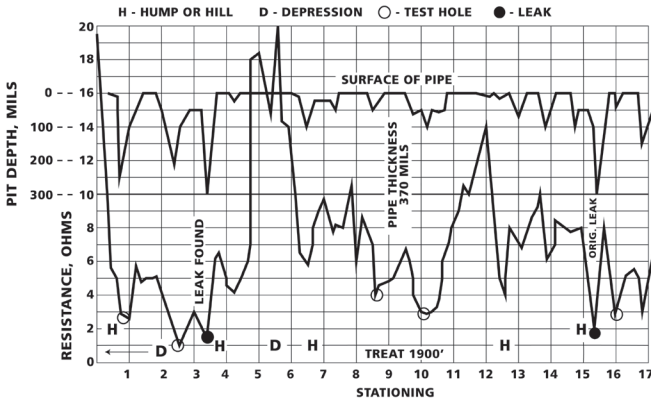


Abb. 2: Die Erdwiderstandsprüfung der Pipeline zeigt, wo Korrosion am wahrscheinlichsten auftritt [2].

# So prüfen Sie die Erde

## Auswirkungen des Bodentyps auf den Widerstand

Ob ein Boden zum Beispiel weitgehend lehmig oder sehr sandig ist, kann den Erdwiderstand stark verändern. Es ist nicht immer einfach, einen bestimmten Boden genau zu definieren. So kann beispielsweise Ton eine breite Palette von Böden abdecken. Daher können wir nicht sagen, dass jeder Boden einen spezifischen Widerstand von so vielen Ohm pro m hat. Die Tabellen I und II stammen aus zwei verschiedenen Referenzbüchern und zeigen den breiten Bereich in Werten. Beachten Sie auch die Verteilung der Werte für die gleichen allgemeinen Bodenarten. Vgl. auch Abb. 3.

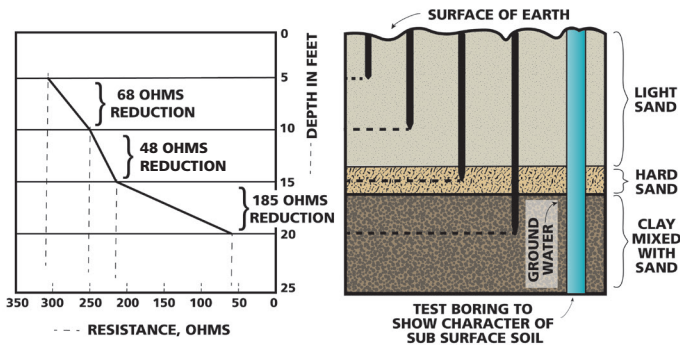


Abb. 3: Tiefere Erdelektroden verringern den Widerstand. Diese Diagramme zeigen den Zusammenhang zwischen dem Bodentyp und dem Widerstand der eingeführten Elektrode in größeren Tiefen.

Tabelle I: Widerstände in unterschiedlichen Böden<sup>2</sup>

Boden	Widerstand (Ohm-cm)		
	Durchschnitt	Min.	Max.
Füllungen: Asche, Schlacke, Soleabfälle	2.370	590	7.000
Ton: Tonschiefer, Gumbo, Lehm	4.060	340	16.300
Gleich: unterschiedliche Anteile von Sand/Kies	15.800	1.020	135.000
Kies, Sand, Steine mit wenig Ton/Lehm	94.000	59.000	458.000

<sup>2</sup> US Bureau of Standards Report 108

# So prüfen Sie die Erde

## Abnahme des Widerstands durch Feuchtigkeit und gelöste Salze

Im Boden ist die Spannungsleitung weitgehend elektrolytisch. Daher wirken sich die Menge von Feuchtigkeit und der Salzgehalt der Erde erheblich auf ihren spezifischen Widerstand aus. Die Wassermenge im Boden variiert je nach Wetter, Jahreszeit, Art des Unterbodens und der Tiefe des permanenten Grundwasserpegels. Tabelle IV zeigt typische Auswirkungen von Wasser im Boden. Bitte beachten Sie, dass beim Trocknen die zwei Arten von Böden gute Isolatoren sind (bei einem Widerstand von mehr als  $1000 \times 10^6$  Ohm-cm). Bei einem Feuchtigkeitsgehalt von 15 % ist jedoch eine drastische Verringerung des Widerstands (um einen Faktor von 100.000) zu beobachten. Tatsächlich hat reines Wasser einen unendlich hohen spezifischen Widerstand. In Wasser gelöste, natürlich auftretende Salze in der Erde senken den spezifischen Widerstand. Schon eine kleine Menge Salz<sup>3</sup> kann den Erdwiderstand erheblich verringern. (Vgl. Tabelle IV.) Wie in Abschnitt I erwähnt, kann dieser Effekt nützlich sein, um eine gute niederohmige Elektrode anstelle eines teuren, aufwändigen Elektrodensystems einzusetzen.

**Tabelle II: Widerstände in unterschiedlichen Böden<sup>4</sup>**

Boden	Spezifischer Widerstand Ohm-cm (Bereich)
Oberflächenböden, Lehm usw.	100 – 5.000
Ton	200 – 10.000
Sand und Kies	5.000 – 100.000
Oberflächenkalkstein	10.000 – 1.000.000
Schiefer	500 – 10.000
Sandstein	2.000 – 200.000
Granit, Basalt usw.	100.000
Zerlegte Gneise	5.000 – 50.000
Schiefer usw.	1.000 – 10.000

<sup>3</sup> Mit „Salz“ ist nicht das Salz gemeint, mit dem Lebensmittel gewürzt werden (Natriumchlorid), auch wenn diese Art im Boden vorkommen kann. Andere Arten sind Kupfersulfat, Natriumcarbonat und weitere (siehe „Behandlung von Boden“, Abschnitt II, Seite 40).

<sup>4</sup> Evershed & Vignoles Bulletin 245

## So prüfen Sie die Erde

Tabelle III: Auswirkung des Feuchtigkeitsgehalts auf den Erdwiderstand<sup>5</sup>

Feuchtigkeitsgehalt Gewichtsprozent	Widerstand (Ohm-cm)	
	Oberboden	Sandige Lehmböden
0,0	1.000 x 10 <sup>6</sup>	1.000 x 10 <sup>6</sup>
2,5	250.000	150.000
5,0	165.000	43.000
10,0	53.000	22.000
15,0	21.000	13.000
20,0	12.000	10.000
30,0	10.000	8.000

Tabelle IV: Auswirkungen des Salzgehalts auf den Erdwiderstand<sup>6</sup>

Zugefügtes Salz Gewichtsprozent der Feuchte	Widerstand (Ohm-cm)
0,0	10.700
0,1	1.800
1,0	460
5,0	190
10,0	130
20,0	100

<sup>5</sup> „An Investigation of Earthing Resistance“ von P.J. Higgs, I.E.E. Journal, Band 68, S. 736, Februar 1930

<sup>6</sup> Für sandigen Lehm, Feuchtigkeitsgehalt 15 % nach Gewicht; Temperatur 17 °C (63 °F)

# So prüfen Sie die Erde

## Auswirkung der Temperatur auf den Erdwiderstand

Es gibt nur wenige Daten zu den Auswirkungen der Temperatur auf den Widerstand. Zwei Faktoren führen zu dem logischen Ergebnis, dass eine Erhöhung der Temperatur den spezifischen Widerstand verringert: (1) Wasser im Boden verändert den Widerstand, und (2) ein Temperaturanstieg verringert den spezifischen Widerstand des Wassers deutlich. Die Ergebnisse in Tabelle V bestätigen dies. Wenn das Wasser im Boden gefriert, springt der Widerstand deutlich nach oben, denn Eis hat einen hohen spezifischen Widerstand. Der Widerstand steigt weiter an, wenn die Temperaturen unter den Gefrierpunkt sinken.

**Tabelle V: Auswirkung der Temperatur auf den Erdwiderstand<sup>7</sup>**

Temperatur		Widerstand (Ohm-cm)
°C	°F	
20	68	7.200
10	50	9.900
0	32 (Wasser)	13.800
0	32 (Eis)	30.000
-5	23	79.000
-15	14	330.000

## Jahreszeitliche Schwankungen des Erdwiderstands

Wir haben die Auswirkungen von Temperatur, Feuchtigkeit und Salzgehalt auf den Erdwiderstand gesehen. Daher ergibt es Sinn, dass der Bodenwiderstand zu verschiedenen Jahreszeiten erheblich variiert. Dies trifft besonders auf Orte zu, an denen es extremen Temperaturschwankungen, Regenfälle, Trockenheiten und andere jahreszeitlich bedingte Vorkommnisse gibt.

Aus dem Vorgenannten können Sie ersehen, dass der Erdwiderstand ein sehr variabler Wert ist. Wenn Sie wissen möchten, wie hoch der Wert an einem bestimmten Ort zu einem bestimmten Zeitpunkt ist, besteht die einzige Möglichkeit darin, ihn zu messen. Wenn Sie diesen Wert für Vermessungsarbeiten verwenden, ist die Änderung des Wertes, verursacht durch Veränderungen in der Beschaffenheit des Untergrundes, das Wichtigste. Aus den Schwankungen des spezifischen Widerstands können Sie nützliche Vermessungsergebnisse ableiten.

<sup>7</sup> Für sandigen Lehm mit 15,2 % Feuchtigkeit

Abschnitt II zeigt, dass ein weiterer Hauptgrund für die Messung des Erdwiderstands die Entwicklung von Erdleitersystemen für elektrische Stromsysteme, Blitzableiter usw. ist. Die gemessenen Widerstandswerte werden in den Standardkonstruktionsformeln verwendet, die Faktoren wie Anzahl und Tiefe der Stäbe berechnen, die erforderlich sind, um einen erforderlichen Erdwiderstand zu erzielen, wodurch die Menge der Versuche und der Fehler bei der Installation einer effektiven Masse verringert werden. Der Erdwiderstand korreliert direkt mit dem spezifischen Erdwiderstand, und es ist hilfreich zu wissen, welche Faktoren den spezifischen Widerstand beeinflussen.

Die Kurven in Abb. 4 illustrieren einige beachtenswerte Punkte. Sie zeigen die erwartete Änderung des Erdwiderstands (aufgrund von Widerstandsänderungen) über einen Zeitraum von 1,5 Jahren. Sie zeigen außerdem, dass die tiefere Elektrode einen stabileren und niedrigeren Wert anzeigt. Wir können daraus schließen, dass der Feuchtigkeitsgehalt und die Temperatur des Bodens bei größerer Tiefe unter der Erdoberfläche stabiler werden. Daher sollte die Erdelektrode eine ausreichende Tiefe haben, damit folgende Bedingungen erfüllt sind:

- permanenter Feuchtigkeitsgehalt (relativ)
- konstante Temperatur (relativ unterhalb der Frostschicht)

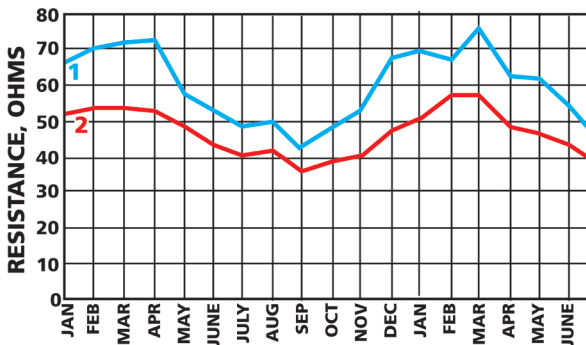


Abb. 4: Jahreszeitlich bedingte Schwankungen des Erdwiderstands mit einer Elektrode aus einem 3/4"-Rohr in steinigem Tonboden. Die Tiefe der Elektrode in der Erde beträgt 3 Fuß für Kurve 1 und 10 Fuß für Kurve 2 [3].

# So prüfen Sie die Erde

## Bestimmung einer geeigneten Elektrodenposition

Eine gute niederohmige Erdungselektrode hängt von einem niederohmigen Boden an einer Stelle ab, an der Sie Ihre Elektroden einführen können. Es gibt zwei Ansätze zur Auswahl der Position:

1. Führen Sie Stäbe an unterschiedlichen Stellen bis zur erforderlichen Tiefe ein, und überprüfen Sie währenddessen ihre Widerstandswerte.
2. Messen Sie den Erdwiderstand, **bevor** Sie Erdungsstäbe einführen. Berechnen Sie dann die Anzahl und die Länge der erforderlichen Stäbe.

Um eine niederohmige Elektrode an einem ungünstigen Ort zu erhalten, legen Sie gerade Linien in Abständen von 10 Fuß aus, um den Bereich abzudecken. Führen Sie vier Stäbe in Abständen von 10 Fuß ein, aber nicht mehr als 6 Zoll tief, entlang einer Linie a-b-d-c, wie in Abb. 5 gezeigt. Messen Sie den Widerstand  $R$  zwischen den Stäben b und c, und verwenden Sie dabei die für den Erdwiderstand beschriebene Methode. Dann verschieben Sie die Stäbe entlang der besagten Linie b-c-d-e, c-d-e-f usw. (siehe Abb. 5) und prüfen diese, bis die gesamte Leitung abgedeckt ist. Gehen Sie dann zur nächsten Linie und wiederholen Sie den Vorgang, bis der gesamte ausgewählte Bereich abgedeckt ist. Der Standort mit dem niedrigsten Wert für  $R$  hat den

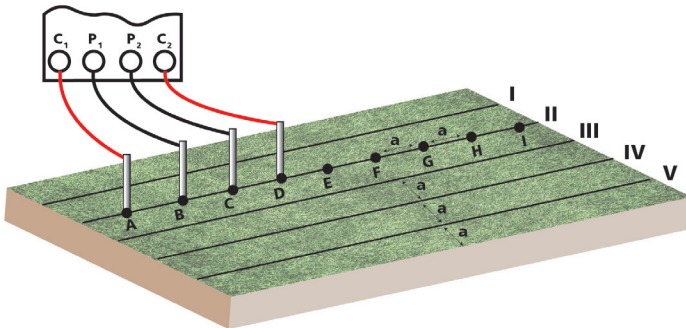


Abb. 5: Methode zur Erkundung der besten Erdungselektrodenposition bis zu einer Tiefe  $a$ . Die Position, die den niedrigsten Messwert auf dem Megger Erdungsprüfgerät liefert, ist am besten.



## So prüfen Sie die Erde

niedrigsten spezifischen Erdwiderstand bis zur gewählten Tiefe von 10 Fuß. Diese Stelle wird wahrscheinlich die beste Erdungselektrode geben.

Wenn Sie möchten, dass die Ergebnisse durch den durchschnittlichen Erdwiderstand bis zu einer Tiefe von 20 Fuß beeinflusst werden, wiederholen Sie die Messung auf Linien mit einem Abstand von 20 Fuß und mit Stäben im Abstand von 20 Fuß. Solche Untersuchungen erfordern keine lange Zeit und können dafür sorgen, dass ein gutes Erdungssystem gewährleistet ist.

**Alternative Methode:** Eine andere Möglichkeit besteht darin, Stäbe oder Rohre an verschiedenen Stellen in eine Tiefe zu treiben, die sich als praktikabel erwiesen hat, und ihren Widerstand während des Einführens zu messen. Auf diese Weise können Sie in der Regel sofort erkennen, wenn Feuchtigkeit oder andere gute Erdleiter erreicht werden. Allerdings ist der Arbeitsaufwand wahrscheinlich viel höher als bei der ersten Methode.

# So prüfen Sie die Erde

## ABSCHNITT II Messung des Erdwiderstands für elektrische Erdungssysteme

Die einfachste und etwas irreführende Idee einer guten Erdung für ein elektrisches System ist ein Stück eines in die Erde eingeführten Eisenrohrs, das mittels eines leitenden Drahtes mit dem elektrischen Stromkreis verbunden ist (Abb. 6). Dies kann ein geeigneter niederohmiger Weg für elektrischen Strom zum Schutz von Personen und Geräten sein oder auch nicht.

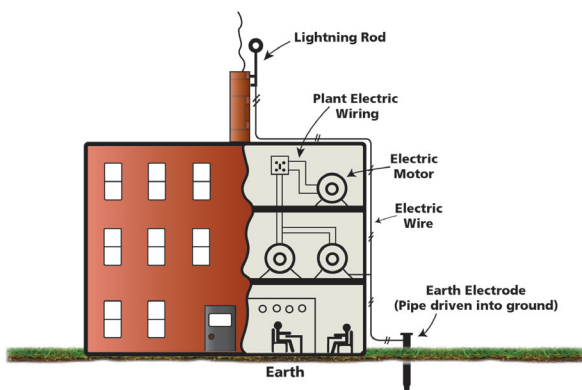


Abb. 6: Vereinfachtes Erdungssystem in einer Industrieanlage

Eine praktikable Erdungselektrode, die einen niedrigen Erdwiderstand bietet, ist nicht immer leicht zu erreichen. Aber von den Erfahrungen anderer können Sie lernen, wie Sie ein zuverlässiges System einrichten und den Widerstandswert mit angemessener Genauigkeit prüfen. Wie Sie sehen werden, hat der Erdwiderstand (siehe Abschnitt I) einen wichtigen Einfluss auf den Elektrodenwiderstand, genauso wie die Tiefe, Größe und Form der Elektrode.

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Prinzipien und Methoden der Erdwiderstandsprüfung gelten für Blitzschutzanlagen sowie für andere Systeme, die niederohmige Erdungsverbindungen erfordern. Solche Prüfungen werden in Kraftwerken, Elektroverteileranlagen, Industrieanlagen und Telekommunikationsanlagen durchgeführt.

### Faktoren, die den minimalen Erdwiderstand verändern können

Wir werden später noch darauf zu sprechen kommen, welcher Wert des Erdwiderstands niedrig genug ist. Sie werden sehen, dass es keine allgemein gültige Regel dafür gibt. Zunächst sollten Sie drei Faktoren berücksichtigen, die die Erdelektrodenanforderungen von Jahr zu Jahr verändern können:

- Ein Werk oder eine andere elektrische Einrichtung kann ausgebaut werden. Außerdem sind neue Werke zunehmend größer. Diese Veränderungen erzeugen unterschiedliche Anforderungen an die Erdungselektroden. Was früher ein angemessen niedriger Erdwiderstand war, kann heute als veraltete Norm eingestuft werden.
- Da heutige Anlagen mit moderneren, empfindlichen und computergesteuerten Geräten ausgestattet sind, wird das Problem mit elektrischen Störungen verstärkt. Störungen, die bei älteren Geräten keine größere Belastung darstellten, können bei neuen Geräten ständige Probleme verursachen.
- Da immer mehr nichtmetallische Rohre und Leerrohre unterirdisch installiert werden, sind solche Installationen weniger verlässlich als effektive, niederohmige Erdungsverbindungen.
- An vielen Stellen sinkt der Grundwasserspiegel allmählich. Innerhalb eines Jahres können Erdelektrodensysteme, die früher wirksam waren, in hochohmiger trockener Erde landen.

Diese Faktoren zeigen die Bedeutung eines kontinuierlichen, regelmäßigen Programms für die Erdwiderstandsprüfung. Es reicht nicht aus, den Erdwiderstand nur zum Zeitpunkt der Installation zu prüfen.

### Einige grundlegende Begriffsbestimmungen

Lassen Sie uns zunächst einige Begriffe festlegen. Bereits 1918 wurden die Begriffe *Masse*, *permanente Masse* und *Masseverbindungen* definiert und bezeichnen „elektrische Verbindungen, die absichtlich zwischen elektrischen Körpern (oder leitenden Körpern in unmittelbarer Nähe von Stromkreisen) und metallischen Körpern in der Erde hergestellt werden – wie Stäben, Wasserrohren, Platten oder eingeführten Rohren [4]“.

Der metallische Körper in der Erde wird häufig als Elektrode bezeichnet, obwohl es sich um ein Wasserrohrsystem oder um eingegrabene Streifen, Platten oder Drähte handeln kann. Diese Kombinationen von metallischen Körpern

## So prüfen Sie die Erde

werden als Raster bezeichnet. Der Erdwiderstand, um den es hier geht, ist der Widerstand gegen die Spannung der Elektrode in die umgebende Erde.

Um zu verstehen, warum der Erdwiderstand gering sein muss, benötigen Sie nur das Ohmsche Gesetz:  $E = R \times I$ , wobei  $E$  die Spannung ist,  $R$  der Widerstand in Ohm und  $I$  der Strom in Ampere. Angenommen, Sie haben eine 4.000-V-Versorgung (2.300 V gegen Masse) mit einem Widerstand von  $13 \Omega$  (vgl. Abb. 7). Ebenfalls angenommen, ein freiliegender Draht in diesem System berührt einen Motorrahmen, der mit einem Erdungssystem verbunden ist, das einen 10-Ohm-Widerstand gegen Masse hat.

Nach dem Ohmschen Gesetz wird durch den Fehler ein Strom von  $100 \text{ A}^8$  vom Motorrahmen zur Erde übertragen. Wenn Sie in einer Pfütze stehend den Motorrahmen berühren und fest mit der Erde verbunden sind, können Sie mit 1.000 V belastet werden ( $10 \Omega \times 100 \text{ A}$ ).

Wie Sie im Folgenden ab Punkt 2 feststellen werden, ist das mehr als ausreichend, um Sie sofort zu töten. Wenn der Erdwiderstand jedoch weniger als  $1 \Omega$  beträgt, liegt der Schock unter 100 V ( $1 \times 100$ ), und Sie würden wahrscheinlich überleben und die Störung beheben können.

Geräte können auch durch Überspannungen durch hochohmige Erdungssysteme beschädigt werden.

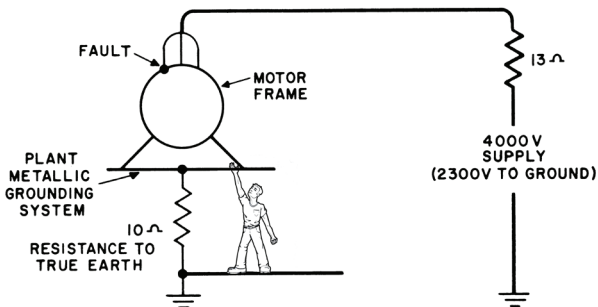


Abb. 7: Beispiel für eine elektrische Schaltung mit zu hohem Erdwiderstand

<sup>8</sup>  $I = E/R = 2.300 / (10 + 13) = 100 \text{ Ampere}$

## Einflussfaktoren für ein gutes Erdungssystem

In einer Industrieanlage oder einer anderen Einrichtung, für die ein Erdungssystem erforderlich ist, müssen die folgenden Punkte sorgfältig berücksichtigt werden (vgl. Abb. 8):

1. *Begrenzung der Erdungsspannung des gesamten elektrischen Systems auf bestimmte Werte.* Die Verwendung eines geeigneten Erdungssystems kann dies tun, indem ein Punkt im Stromkreis auf Erdpotenzial gehalten wird. Ein solches Erdungssystem bietet folgende Vorteile:
  - Es begrenzt die Spannung, der die System-zu-Masse-Isolierung ausgesetzt ist, und fixiert so die Isolationswerte eindeutiger.
  - Es begrenzt die Spannung zwischen System und Masse oder zwischen System und Rahmen auf für das Personal sichere Werte.
  - Es bietet ein relativ stabiles System mit einem Minimum an vorübergehenden Überspannungen.
  - Es ermöglicht eine schnelle Isolierung von Systemfehlern.
2. *Ordnungsgemäße Erdung von metallischen Gehäusen und Stützstrukturen, die Teil des elektrischen Systems sind und mit denen Personal in Berührung kommen kann.* Dazu gehören auch tragbare, elektrisch betriebene Geräte.

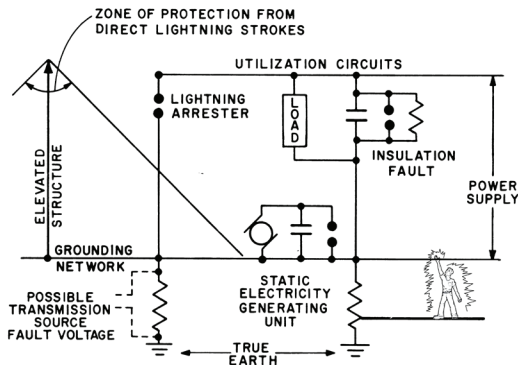


Abb. 8: Typische Faktoren im Erdungssystem einer Anlage

## So prüfen Sie die Erde

Beachten Sie, dass bereits eine geringe Menge elektrischen Stroms – nur 0,1 A für eine Sekunde – tödlich sein kann! Selbst eine kleinere Menge kann dazu führen, dass Sie die Muskelkontrolle verlieren. Diese niedrigen Ströme können in Ihrem Körper bei Spannungen bis 100 V auftreten, wenn Ihre Haut feucht ist.

3. *Schutz gegen statische Reibungselektrizität.* Hinzu kommen die damit verbundenen Gefahren durch Schock, Feuer und Explosion. Bewegliche Objekte, die inhärente Isolatoren sein können – wie Papier, Textilien, Förderbänder oder Energiebänder und gummierte Gewebe – können überraschend hohe Ladungen entwickeln, wenn sie nicht ordnungsgemäß geerdet sind.
4. *Schutz gegen direkte Blitzschläge.* Erhöhte Strukturen, wie z. B. Schornsteine, das eigentliche Gebäude oder Wassertanks, können Blitzschutzstäbe erfordern, die mit dem Erdungssystem verbunden sind.
5. *Schutz gegen induzierte Blitzspannungen.* Dies ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn es sich um oberirdische Energieverteilungs- und Kommunikationskreise handelt. Gegebenenfalls sind im gesamten Werk Überspannungsableiter an strategischen Stellen erforderlich.
6. *Gute Masseverbindungen für elektrische Prozesssteuerungs- und Kommunikationsschaltungen.* Mit zunehmendem Einsatz von industriellen Steuergeräten, Computern und Kommunikationsgeräten muss die Zugänglichkeit von niederohmigen Erdungsverbindungen an vielen Standorten – in Büro- und Produktionsbereichen – berücksichtigt werden.

## Maximalwerte des National Electrical Code

Der National Electrical Code zeigt in Abschnitt 250-56 auf, dass eine einzelne Elektrode mit einem Widerstand von mehr als  $25 \Omega$  durch eine zusätzliche Elektrode ergänzt werden muss. (In anderen Teilen der Welt können hierfür andere Normen Anwendung finden.)

***Wir empfehlen, dass Einzelelektrodenerdungen nach der Installation und in regelmäßigen Abständen geprüft werden sollten.***

Der Erdwiderstand kann bei Veränderungen des Klimas und der Temperatur variieren. Solche Schwankungen können erheblich sein. Eine Erdungselektrode, die zum Zeitpunkt des Einbaus gut (niederohmig) war, muss dies nicht zwangsläufig bleiben. Um sicher zu sein, müssen Sie sie regelmäßig überprüfen.

Wir können Ihnen nicht sagen, wie hoch der maximale Erdwiderstand sein sollte. Bei bestimmten Systemen an bestimmten Standorten werden die Spezifikationen häufig festgelegt. Einige plädieren für maximal  $5 \Omega$ ; andere akzeptieren nicht mehr als  $3 \Omega$ . In manchen Fällen sind Widerstände so gering wie ein kleiner Bruchteil eines Ohm.

## Aufbau einer Erdelektrode

Der Widerstand gegen Strom durch eine Erdungselektrode besteht aus drei Komponenten (Abb. 9):

1. Widerstand der Elektrode selbst und ihrer Anschlüsse.
2. Kontaktwiderstand zwischen der Elektrode und dem direkt angrenzenden Erdboden.
3. Widerstand des umgebenden Erdbodens.

**Elektrodenwiderstand:** Stäbe, Rohre, Metallblöcke, Strukturen und andere Geräte werden häufig für Erdungsanschlüsse verwendet. Diese haben in der Regel eine ausreichende Größe oder einen ausreichenden Querschnitt, so dass ihr Widerstand ein vernachlässigbarer Bestandteil des Gesamtwiderstands ist.

## So prüfen Sie die Erde

**Elektroden-Erdkontaktwiderstand:** Der ist viel geringer, als Sie glauben. Wenn die Elektrode frei von Farbe oder Fett und die Erde fest komprimiert ist, kann der Kontaktwiderstand vernachlässigt werden. Rost an einer Eisenelektrode hat wenig oder keine Auswirkung. Das Eisenoxid ist leicht mit Wasser getränkt und hat einen geringeren Widerstand als die meisten Böden. Wenn jedoch ein Eisenrohr durchgerostet ist, ist der Teil unterhalb der Abbruchkante nicht als Teil der Erdungselektrode wirksam.

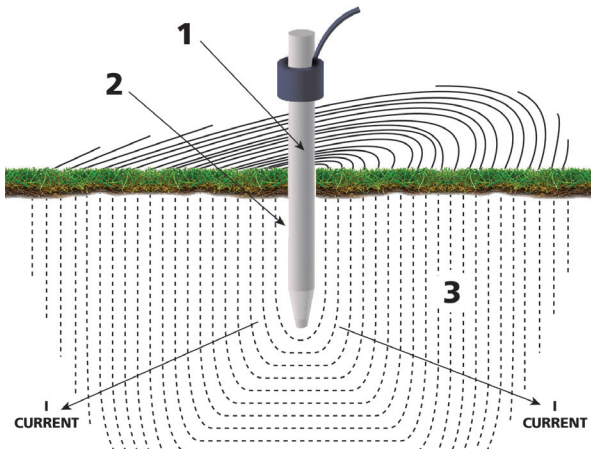


Abb. 9: Komponenten von Erdwiderständen in einer Erdungselektrode

**Widerstand des umgebenden Erdbodens:** Eine in die Erde getriebene Elektrode mit gleichmäßigem spezifischen Widerstand strahlt Strom in alle Richtungen ab. Stellen Sie sich vor, die Elektrode wäre von Erdschichten umgeben, die alle gleich dick sind (vgl. Abb. 9).

Die der Elektrode nächstgelegene Erdschicht hat natürlich die kleinste Oberfläche und bietet somit den größten Widerstand. Die nächste Erdschicht ist etwas größer und bietet weniger Widerstand. Schließlich wird ein Abstand zur Elektrode erreicht, bei dem weitere Erdschichten den Widerstand der die Elektrode umgebenden Erde nicht wesentlich erhöhen. Dies ist das kritische



Bodenvolumen, das die Wirksamkeit der Erdungselektrode bestimmt und daher effektiv gemessen werden muss, um diese Bestimmung durchzuführen. Die Erdungsprüfung unterscheidet sich von den bekannteren Formen der elektrischen Messung dadurch, dass sie eine volumetrische Messung ist und nicht als „Punkt“-Eigenschaft behandelt werden kann.

*In der Regel ist der Widerstand der umgebenden Erde die größte der drei Komponenten, die den Widerstand einer Masseverbindung ausmachen. Die verschiedenen Faktoren, die diesen Wert beeinflussen können, werden in Abschnitt II zum Erdwiderstands besprochen. In Abschnitt II sehen Sie, dass der Erdwiderstand von der Bodenbeschaffenheit, dem Feuchtigkeitsgehalt und der Temperatur abhängt. Dies ist kein konstanter und vorhersehbarer Wert. Er liegt im Allgemeinen zwischen 500 und 50.000 Ohm-cm<sup>9</sup>.*

### Grundlagen zur Prüfung des Erdwiderstands

Der Massenwiderstand jedes Elektrodensystems kann theoretisch anhand der Formel für den allgemeinen Widerstand berechnet werden:

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Dabei ist  $\rho$  der Widerstand der Erde in Ohm-cm,  $L$  die Länge des Leiterweges und  $A$  der Querschnittsbereich des Weges. Prof. H. B. Dwight vom Massachusetts Institute of Technology entwickelte komplexe Formeln für die Berechnung des Erdwiderstands für einen beliebigen Abstand bei verschiedenen Elektrodensystemen [4]. Alle diese Formeln können etwas vereinfacht werden, wenn man davon ausgeht, dass der spezifische Erdwiderstand über das gesamte betrachtete Bodenvolumen gleichmäßig ist.

Da die Formeln komplex sind und der Erdwiderstand weder einheitlich noch konstant ist, ist eine einfache und direkte Methode zur Messung des Erdwiderstands erforderlich. Hier kommen wir mit unserem Megger Erdwiderstandsmessgerät ins Spiel, einem eigenständigen tragbaren Gerät, das zuverlässig und einfach zu bedienen ist. Damit können Sie den Widerstand der Erdungselektrode überprüfen, während sie installiert wird. Durch regelmäßige Prüfungen können Sie jederzeit Änderungen beobachten.

---

<sup>9</sup> Ein Ohm-Zentimeter (abgekürzt Ohm-cm) ist definiert als der Widerstand eines Würfels (in diesem Fall, Erde), wobei die Würfelseiten in Zentimetern gemessen werden.

# So prüfen Sie die Erde

Um das Prinzip der Erdungsprüfung zu verstehen, sollten Sie sich das schematische Diagramm in Abb. 10a ansehen. Beachten Sie unsere bisherige Beobachtung mit Bezug auf das Erdschichtendiagramm in Abb. 9: Bei größerem Abstand zur Elektrode werden die Erdschichten größer und damit widerstandsärmer. Nehmen wir nun einmal an, dass Sie drei Stäbe in einiger Entfernung in die Erde getrieben und eine Spannung angelegt haben, wie in Abb. 10a dargestellt. Die Stromstärke zwischen den Stäben 1 und 2 wird mit einem Amperemeter und die Potenzialdifferenz (Spannung) zwischen den Stäben 1 und 3 mit einem Voltmeter gemessen.

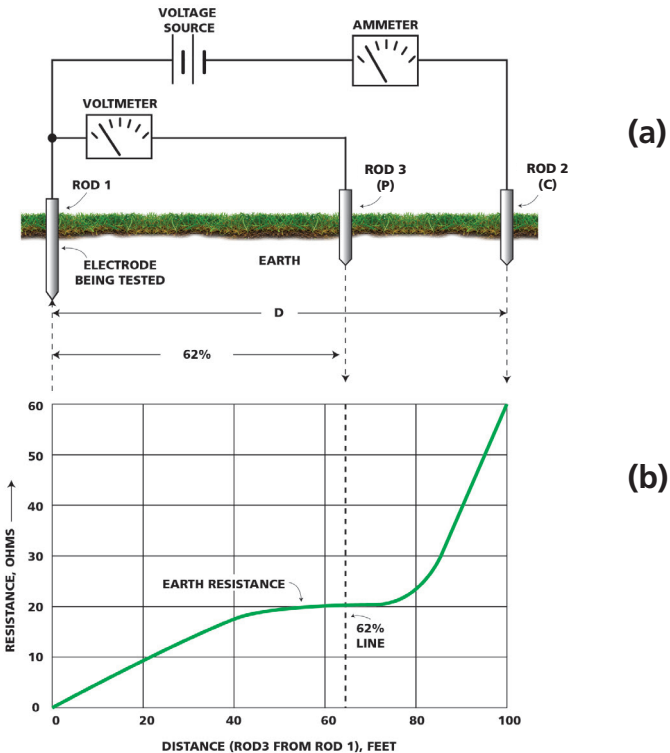


Abb. 10: Grundlagen zur Prüfung des Erdwiderstands

## So prüfen Sie die Erde

Wenn sich Stab 3 an verschiedenen Stellen zwischen Stäben 1 und 2 befindet, vorzugsweise in einer geraden Linie<sup>10</sup>, können Sie eine Reihe von Spannungswerten erhalten. Mit dem Ohmschen Gesetz ( $R = E/I$ ) können Sie den Erdwiderstand an jedem beliebigen Punkt bestimmen. Wenn beispielsweise die gemessene Spannung  $E$  zwischen den Stäben 1 und 3 30 V beträgt und der gemessene Strom  $I$  bei 2 A liegt, beträgt der Erdwiderstand  $R$  an diesem Punkt 15  $\Omega$ .

Die Reihe der Widerstandswerte kann über die Entfernung aufgetragen werden, um eine Kurve zu erhalten (Abb. 10b). Beachten Sie, dass, wenn Stab 3 von Stab 1 wegbewegt wird, die Widerstandswerte ansteigen, aber der Umfang des Anstiegs immer geringer wird, bis ein Punkt erreicht ist, *an dem die Steigerungsrate so klein wird, dass  $I$  fast als konstant angesehen werden kann* (20  $\Omega$  in Abb. 10b). Die Erdschichten zwischen den beiden Stäben 1 und 3 haben eine so große Fläche, dass sie nur wenig zum Gesamtwiderstand beitragen. Jenseits dieses Punktes, also wenn sich Stab 3 den Erdschichten von Stab 2 nähert, nimmt der Widerstand allmählich zu. In der Nähe von Stab 2 stiegen die Werte stark an.

Nehmen wir nunmehr an, dass Stab 1 unsere zu prüfende Erdungselektrode ist. Wie hoch ist der Erdwiderstand dieses Stabes nach einer typischen Erdwiderstandskurve wie beispielsweise in Abb. 10b? Wir bezeichnen ab jetzt Stab 2 als *Stromreferenzsonde C* und Stab 3 als *Spannungreferenzsonde P* (nur zur besseren Unterscheidung). *Der richtige Widerstand wird in der Regel erreicht, wenn P (Stab 3) in einem Abstand von der Mitte der Erdelektrode (Stab 1) von etwa 62 % des Abstands zwischen der Erdelektrode und C (Stab 2) platziert wird.*

In Abb. 10b beträgt beispielsweise der Abstand  $D$  von der Erdelektrode zu C 100 Fuß. 62 % dieses Abstandes ergeben 62 Fuß. Aus Abb. 10b ergibt sich ein Widerstand für diesen Abstand von 20  $\Omega$ . Dies ist der gemessene Widerstand der Erdungselektrode.

Diese Regel eignet sich gut für einfache Elektroden, z. B. einen in den Boden getriebenen Stab. Sie funktioniert aber auch für eine kleine Gruppe von Stäben. Allerdings müssen Sie dafür das wahre elektrische Zentrum des Elektrodensystems ziemlich genau kennen. Außerdem ist die Genauigkeit der

---

<sup>10</sup> Tatsächlich kann Strom in anderen Bahnen zwischen den beiden festen Elektroden vorhanden sein, so dass Stab 3 an anderer Stelle als entlang einer Geraden angeordnet sein könnte (und muss).

## So prüfen Sie die Erde

Messungen besser, wenn der Erdwiderstand zwischen den drei Elektroden relativ konstant ist. Schließlich sollte C weit genug vom Erdelektrodensystem entfernt sein, so dass der Abstand von 62 % außerhalb des Einflussbereiches der Erdungselektrode liegt. (Vgl. die Referenzerörterung zu Abb. 14 und 15). Für die Prüfung sollte die Elektrode von der elektrischen Anlage isoliert werden, die sie schützt. Anderenfalls wird das gesamte System geprüft, welches (je nach lokaler Praxis) die Stabmasse, das Neutralleitersystem und die Transformatormasse umfassen kann. Dadurch wird die spezifische Wirkung des lokalen Bodens verschattet.

Im Grunde genommen kennen Sie jetzt das Prinzip der Erdwiderstandsmessung. Der Rest ist die Verfeinerung von Prüfmethode, die Verwendung von Elektroden oder Elektrodensystemen und Informationen über den Erdwiderstand, wie in späteren Abschnitten dieses Handbuchs beschrieben.

### Grundlegende Prüfmethode für den Erdwiderstand

Das Erdungsmessgerät erzeugt ein Wechselstromsignal, das in das zu prüfende System eingespeist wird. Das Gerät prüft dann die Stromkreise auf gute Verbindungen und Störungen. Wenn einer dieser Werte außerhalb der Spezifikation liegt, wird der Bediener informiert. Nach der Überprüfung, ob die Bedingungen für die Prüfung erfüllt sind, durchläuft das Gerät automatisch seine Messbereiche, um das optimale Signal für die Anwendung zu finden. Durch die Messung des Stromflusses und der erzeugten Spannung berechnet und zeigt das Gerät den Systemwiderstand im Bereich von 0,001 bis 20.000 Ohm an, abhängig vom gewählten Modell.

Es gibt drei grundlegende Prüfmethode, wie unten aufgeführt. Die ersten beiden werden schematisch in Abb. 11 und 12 gezeigt.

1. Spannungsabfall- bzw. Dreileiterprüfung
2. „Dead Earth“-Methode (Zweipunktprüfung).
3. Clamp-on-Prüfmethode (siehe Anhang II, Seite 48).

Darüber hinaus hat Megger eine Version des Spannungsabfalltests entwickelt, bei der der Bediener nicht den zu prüfenden Erdungsstab von der elektrischen Anlage trennen muss. Die ART-Methode (Prüfen mit angeschlossener Elektrode) wird später in diesem Abschnitt auf Seite 48 behandelt.

**Spannungsabfallmethode:** Diese Dreileiterprüfung ist die zuvor beschriebene Methode mit Bezug auf Abb. 10. Mit einem Prüfgerät mit vier Anschlüssen werden die Klemmen  $P_1$  und  $C_1$  auf dem Gerät überbrückt und mit der zu prüfenden Erdungselektrode verbunden. Mit einem Messgerät mit drei Anschlüssen wird X an die Erdungselektrode angeschlossen.

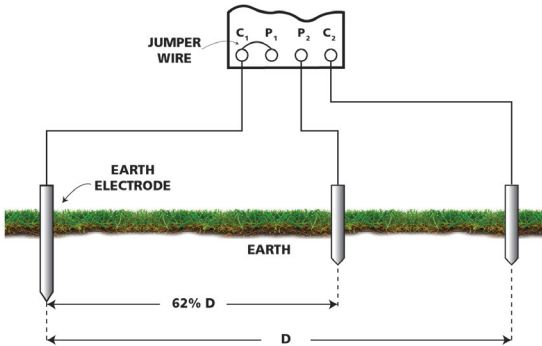


Abb. 11: Spannungsabfall- oder Dreileiterverfahren für Erdwiderstandprüfungen

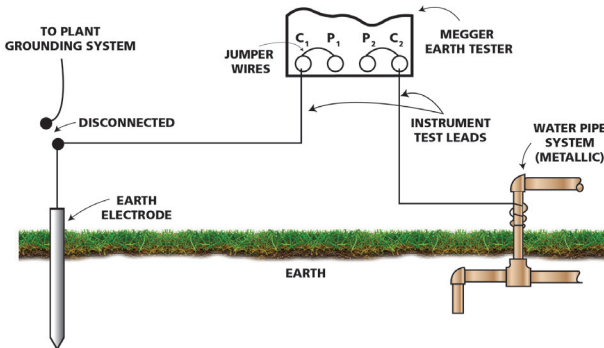


Abb. 12: „Dead Earth“-Methode oder Zweipunktprüfung des Erdwiderstands

## So prüfen Sie die Erde

Obwohl vier Anschlüsse für Widerstandsmessungen erforderlich sind, ist die Verwendung von drei oder vier Anschlüssen zum Prüfen des Widerstands einer installierten Elektrode weitgehend optional. Die Verwendung von drei Anschlüssen ist bequemer, da nur ein Kabel angeschlossen werden muss. Der Nachteil ist, dass der Widerstand dieses gemeinsamen Kabels in der Messung enthalten ist. In der Regel kann dieser Effekt minimiert werden, indem der Leiter kurz gehalten wird, um einfache Prüfforderungen zu erfüllen. Der kleine zusätzliche Widerstand ist somit vernachlässigbar. Bei aufwändigeren Prüfungen oder zur Erfüllung von strengen Anforderungen kann es jedoch sinnvoll sein, alle vier Anschlüsse durch eine Ableitung von Anschluss  $P_1$  an die Prüfelektrode zu verwenden (Anschluss in der Ableitung von  $C_1$ ). Dies ist eine echte vierdrahtige Prüfkfiguration, die den gesamten Ableitwiderstand der Messung eliminiert.

Die erhöhte Genauigkeit kann bei sehr niedrigen Widerstandsspezifikationen oder bei Verwendung von Prüfmethode, die bei der Messung eine zusätzliche Stelle hinter dem Komma erfordern, um die mathematischen Anforderungen zu erfüllen, als bedeutend herausstellen. Die Entscheidung ist je nach den Prüfzielen des Bedieners und der verwendeten Methode optional. Der in den Boden getriebene Referenzstab C sollte so weit wie möglich von der Erdungselektrode entfernt sein. Dieser Abstand kann durch die Länge des verfügbaren Verlängerungskabels oder die Geographie der Umgebung begrenzt sein (vgl. Abb. 11). Die Kabel sollten getrennt und „geschlängelt“ werden und nicht zu nah oder parallel zueinander verlaufen, um gegenseitige Induktion zu vermeiden.

Der Spannungsreferenzstab P wird dann in einer einigermaßen geraden Linie zwischen der Erdelektrode und C an mehreren Stellen in



Üblicher Einsatz eines digitalen Megger Erdwiderstandsmessgeräts – des DET4TC – zur Durchführung von Spannungsabfallprüfungen.

den Boden getrieben. An jeder dieser Stellen werden Widerstandsmessungen durchgeführt. Daraus wird eine Kurve für Widerstand und Abstand erstellt (vgl. Abb. 10b). Der richtige Erdwiderstand wird aus der Kurve für den Abstand abgelesen, der etwa 62 % der Gesamtstrecke von der Erdungselektrode bis C beträgt. Mit anderen Worten: Wenn die Gesamtstrecke D ist, beträgt 62 % der Entfernung  $0,62 D$ . Wenn beispielsweise D 120 Fuß ist, beträgt der Entfernungswert für den Erdwiderstand  $0,62 \times 120$  oder 74 Fuß.

Es gibt drei grundlegende Arten von Spannungsabfallprüfungen und eine Reihe von zugehörigen Prüfmethode, die in den Anhängen beschrieben werden. Folgende Arten von Spannungsabfall gibt es:

- Voller Spannungsabfall – eine Reihe von Prüfungen wird an verschiedenen Orten von P durchgeführt und in einer Widerstandskurve dargestellt.
- Vereinfachter Spannungsabfall – drei Messungen werden in definierten Abständen von P durchgeführt und der Widerstand anhand mathematischen Berechnungen bestimmt (weitere Details dazu später).
- 61,8 %-Regel – eine einzelne Messung erfolgt mit P in einem Abstand von 61,8 % (62 %) des Abstands zwischen der zu prüfenden Elektrode und C.

Die zugehörigen Prüfmethode sind tendenziell komplexer und raffinierter und erfordern zahlreiche Messungen und/oder ein großes Maß an mathematischen Kenntnissen. Diese Methoden wurden entwickelt, um die Probleme bei der Prüfung großer Erdungssysteme oder bei begrenztem Platzangebot in den Griff zu bekommen. Eine Liste dieser Methoden folgt:

- Schnittkurvenmethode (Abschn. III, Seite 62)
- Anstiegsmethode (Abschn. III, Seite 66)
- Vierpol-Methode (Abschn. III, Seite 69)
- Stern-Dreieck-Methode (Abschn. II, Seite 54)

**„Dead Earth“-Methode:** Bei Verwendung eines Gerätes mit vier Anschlüssen werden die Anschlüsse  $P_1$  und  $C_1$  mit der zu prüfenden Erdungselektrode und die Anschlüsse  $P_2$  und  $C_2$  mit einem vollständig metallischen Wasserleitungssystem verbunden. Bei einem Messgerät mit drei Anschlüssen werden X an die Erdungselektrode und P und C an das Leitungssystem angeschlossen (Abb. 12). Wenn das Wassersystem großflächig ist (Abdeckung eines großen Bereichs), sollte der Widerstand nur ein Bruchteil eines Ohm sein. Sie können das Messergebnis dann als Widerstand der zu prüfenden Elektrode betrachten.

## So prüfen Sie die Erde

Die „Dead Earth“-Methode ist die einfachste Methode, um eine Erdwiderstandsmessung durchzuführen. Bei dieser Methode wird der Widerstand von zwei Elektroden in Reihe gemessen: einmal der in den Boden getriebene Stab und als zweites das Wassersystem. Aber es gibt drei wichtige Einschränkungen:

1. Das Wasserleitungssystem muss groß genug sein, um einen vernachlässigbaren Widerstand zu haben.
2. Das Wasserleitungssystem muss durchgehend aus Metall sein und darf keine isolierenden Kupplungen oder Flansche aufweisen.
3. Die Erdungselektrode muss weit genug vom Wasserleitungssystem entfernt sein, damit Sie sich außerhalb ihres Einflussbereichs befinden.

An einigen Stellen befindet sich die Erdungselektrode möglicherweise so nah am Wasserleitungssystem, dass Sie die beiden nicht durch den zur Messung durch die Zweileitermethode erforderlichen Abstand trennen können. Unter diesen Umständen können Sie, wenn die Bedingungen 1 und 2 oben erfüllt sind, eine Verbindung mit dem Wasserleitungssystem herstellen und eine geeignete Erdungselektrode erhalten. Als Vorsichtsmaßnahme gegen mögliche zukünftige Änderungen des Widerstands des Wasserleitungssystems sollten Sie jedoch auch eine Erdungselektrode installieren.

Aufgrund der vielen Unsicherheiten, die mit dieser Prüfmethode verbunden sind, sollte sie als letztes Mittel angesehen werden.

### **Auswirkungen unterschiedlicher Referenzsondenpositionen**

Nun können Sie sich fragen: Wenn die richtige Position für die Sonde P immer 62 % des Abstands zwischen Erdungselektrode und C beträgt, warum sollten Sie sich dann mit Prüfungen für andere Positionen von P beschäftigen? Warum nicht einfach P im 62%igen Abstand in den Boden einführen und davon ausgehen, dass der gemessene Widerstand der richtige Erdwiderstand ist? Die folgenden Punkte sollen helfen, diese Fragen zu beantworten.

**Mindestabstand für C:** Sehen Sie sich Abb. 13 mit den Erdschichten um die Erdungselektrode und die Referenzsonde C herum an. In Abb. 13a ist C so nah an der Erdungselektrode, dass sich die Erdschichten stark überschneiden. Wenn P von der Erdungselektrode wegbewegt wird, kann sich der gemessene Widerstand nicht einpendeln. Die Schichten von C addieren sich zu den Schichten der Erdungselektrode, so dass der Widerstand weiter zunimmt.



## So prüfen Sie die Erde

In Abb. 13b befindet sich C weiter entfernt. Dann gleicht sich der gemessene Widerstand ausreichend aus und liegt bei 62 % sehr nahe am tatsächlichen Erdwiderstand. Der Grund dafür, dass C weiter weg ist, besteht darin, Gewissheit zu erlangen, dass der 62 %-Wert im Einklang mit anderen Werten auf der Kurve steht. Der Wert kann nur falsch sein (vorausgesetzt, es gibt keine Messfehler), wenn die Bodenbedingungen am 62 %-Punkt von den Bedingungen an anderen Punkten abweichen, was zu Veränderungen des Erdwiderstands führen würde. Gestufte Böden um Baustellen herum oder vergrabene Gegenstände wie Rohre können zu solchen örtlich begrenzten Abweichungen führen. Daher möchten Sie ein gewisses Maß an Gleichmaß bzw. eine Nivellierung der Kurve erhalten, um eine solche Abweichung einfach sichtbar zu machen. Denken Sie gleichzeitig daran, dass der Widerstand im elektrischen Feld der Stromzange wieder ansteigt, so dass Messungen in diesem Bereich vermieden werden sollten.

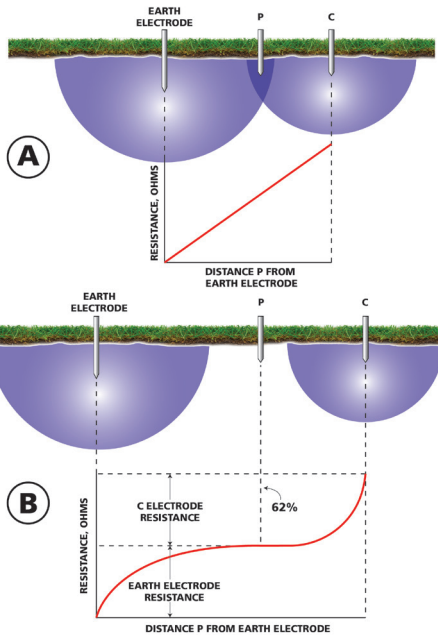


Abb. 13: Auswirkung der Position von C auf die Erdwiderstandskurve

## So prüfen Sie die Erde

Als praktisches Beispiel für diesen Effekt sehen Sie sich den in Abb. 14 dargestellten Fall an. Hier werden zwei Erdwiderstandskurven für zwei Standorte von C dargestellt. Bei Kurve A war C 100 Fuß von der Erdelektrode entfernt, bei Kurve B 700 Fuß. Kurve A zeigt an, dass C zu nah an der Erdungselektrode war, während Kurve B die gewünschte Tendenz zur Nivellierung des gemessenen Widerstands zeigt. Bei einem Abstand von 62 % gibt es in diesem Fall nahezu die gleichen Widerstandswerte, da der Erdwiderstand relativ gleichmäßig ist.

**Vereinfachte Spannungsabfallprüfung:** Die bevorzugte Prüfmethode besteht darin, dass immer genügend Daten zur Darstellung der tatsächlichen Kurve des Widerstands und der Entfernung gesammelt werden können. Falls dies nicht möglich ist, kann eine vereinfachte Prüfung eingesetzt werden, was allerdings zu einer Beeinträchtigung der Genauigkeit führt. Dieses Verfahren ist ähnlich wie die Methode des Spannungsabfallverfahrens gemäß IEEE-Norm Nr. 81 (siehe Referenzen), aber Sie beginnen mit P auf halbem Weg zwischen der Erdungselektrode und C.

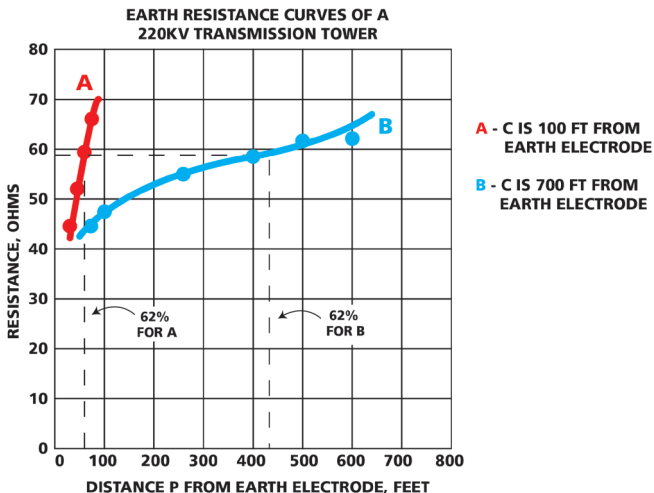


Abb. 14: Beispiel für den Einfluss der Position von C auf die Erdwiderstandskurve

Dieser Messwert mit P bei 50 % der Entfernung zwischen der Erdungselektrode und C wird als  $R_1$  bezeichnet. Die Referenzsonde P wird dann an einen Ort bewegt, der 40 % des Abstandes zu C beträgt. Der Messwert an diesem Punkt wird als  $R_2$  notiert. Ein dritter Messwert  $R_3$  wird mit P bei einer Entfernung von 60 % ermittelt. Der Durchschnitt von  $R_1$ ,  $R_2$  und  $R_3$  wird als  $R_A$  bezeichnet. Sie bestimmen die maximale Abweichung vom Durchschnitt, indem Sie den größten Unterschied zwischen den einzelnen Messwerten und dem Durchschnitt ermitteln. Wenn das 1,2-fache dieser Prozentangabe unterhalb der gewünschten Prüfgenaugigkeit liegt, kann  $R_A$  als Prüfergebnis verwendet werden. Verwenden Sie als Beispiel für dieses Verfahren die Daten aus Kurve B in Abb. 14 wie folgt:

$$R_1 = 58 \Omega \quad R_2 = 55 \Omega \quad R_3 = 59 \Omega$$

$$R_A = \frac{55 + 58 + 59}{3} = 57,3 \Omega$$

$$\frac{R_A - R_2}{R_A} = \frac{57,3 - 55}{57,3} = 4,0 \%$$

$$4,0 \% \times 1,2 = 4,8 \%$$

Wenn die gewünschte Genauigkeit 5 % beträgt, kann 57  $\Omega$  ( $R_A$ ) als Ergebnis verwendet werden. Wenn das Ergebnis nicht innerhalb der erforderlichen Genauigkeit liegt, muss die Sonde C weiter entfernt und müssen die Prüfungen wiederholt werden. Diese Methode kann eine ausreichende Genauigkeit liefern, gibt aber immer Werte auf der niedrigen Seite an. (Vgl. Referenzerörterung zu Tabelle II)

**Einige Faustregeln für den Abstand zwischen P und C:** Zum Prüfen einer einzelnen Erdungselektrode kann C in der Regel 50 Fuß von der zu prüfenden Elektrode entfernt platziert werden, wobei P ca. 31 Fuß entfernt liegt. Bei einem kleinen Raster mit zwei Erdelektroden kann C in der Regel etwa 100 bis 125 Fuß von der zu prüfenden Elektrode platziert werden, und entsprechend kann P ca. 62 bis 78 Fuß entfernt platziert werden. Wenn das Erdelektrodensystem groß ist und z. B. aus mehreren Stäben oder parallelen Platten besteht, muss der Abstand für C möglicherweise auf 200 Fuß und der für P auf etwa 125 Fuß vergrößert werden. Noch größere Abstände benötigen Sie für komplexe Elektrodensysteme, die aus einer großen Anzahl von Stäben oder Platten und anderen metallischen Strukturen bestehen, die alle miteinander verbunden sind. Weitere Verfahren für Erdelektrodensysteme, die einen großen Bereich abdecken, finden Sie auf Seite 66.

## So prüfen Sie die Erde

Tabelle VI ist ein nützlicher Leitfaden zur Referenzsondenpositionierung. Sie finden die Größe „Maximale Abmessung“, indem Sie den diagonalen Abstand über den Bereich Ihres Elektrodensystems nehmen. Wenn der Bereich beispielsweise 100 x 100 Fuß misst, entspricht die Diagonale etwa 140 Fuß. Gehen Sie in der Tabelle auf 140 aus und lesen Sie weiter. P sollte 365 Fuß und C 590 Fuß von der Elektrode entfernt sein.

**Tabelle VI: Leitfaden zur ungefähren Positionierung der Referenzsonden<sup>11,12</sup>**

<b>Max. Abmessungen, Fuß</b>	<b>Entfernung zu P, Fuß</b>	<b>Entfernung zu C, Fuß</b>
2	40	70
4	60	100
6	80	125
8	90	140
10	100	160
12	105	170
14	120	190
16	125	200
18	130	210
20	140	220
40	200	320
60	240	390
80	280	450
100	310	500
120	340	550
140	365	590
160	400	640
180	420	680
200	440	710

<sup>11</sup> Basierend auf Daten von „Earth Resistances“, G.F. Tagg, George Newnes Limited, London (1964).

<sup>12</sup> Beispielsweise die Diagonale durch einen von einem geerdeten Zaun umgebenen Bereich.

## Bonding und Durchgang

Manchmal wird bei der Erdungsprüfung und -wartung die Messung von Bonding und Durchgang übersehen. Während sich die Aufmerksamkeit in der Regel auf die Erdungselektrode („Erdungsstab“, Verbindung zur Erde) konzentriert, erfordert der National Electric Code® (NEC®) einen kontinuierlichen Pfad mit niedriger Impedanz von der Ausrüstung zur Erde. Die Anforderung wird durch Ausgleichsleiter ergänzt, die von einem „toten Rahmen“ geerdeter Geräte zur Erdungselektrode oder zum System führen, oft über den überbrückten Erdungsbus. Damit die Erdungselektrode effektiv funktioniert, muss etwas die Fehlerströme zu ihr bringen. Dies ist die Aufgabe der Ausgleichsleiter.

Eine Methode zur Durchführung einer Prüfung der Ausgleichsleiter ist die Verwendung eines Erdungsmessers für diese wichtige Funktion. Dazu wird sie auf eine zweipolige Konfiguration reduziert, und die gleichen Leitungen, die zur Prüfung der Elektrode in großen Abständen verwendet werden, können problemlos über gegenüberliegende Enden eines Erdungsleiters verwendet werden, wie beispielsweise vom Motorkopf zum Erdungsbus. Bei alten Messgeräten müssen die Klemmen durch Kurzschlussstäbe oder praktische Mittel wie Büroklammern miteinander verbunden werden. Anschließend werden die Leitungen von den beiden Stromanschlüssen zu gegenüberliegenden Enden des zu prüfenden Leiters geführt. Bei der Messung werden die Leitungen dann getrennt in einer Schleife gemessen, wobei dieser Wert als Tarawert von der anfänglichen Messung abgezogen wird. Moderne Messgeräte verfügen über eine Wählposition für zweipolige Prüfungen, sodass keine Überbrückungen mehr in die Anschlüsse eingebaut werden müssen. Der Leitungswiderstand muss noch als Tarawert subtrahiert werden.

Durchgangsprüfungen gemäß IEC-Normen werden bei niedriger Spannung und niedrigem Strom durchgeführt, von einigen mA bis zu einem ziemlich robusten Test bei 200 mA, mit einer Genauigkeit von maximal 10 mA. Sie zeigen Verdrahtungsprobleme wie schlechte oder verpasste Verbindungen, Bau- und Installationsschäden an Stromkreisen und Fehlverdrahtungen an Verteilerkästen. Für eine empfindlichere Prüfung von Schweißnähten und ähnlichen Verbindungen, die thermischen, elektrischen, physikalischen und anderen Belastungen ausgesetzt sein können, ist ein Mikroohmmeter erforderlich, das mit einer annähernd dem Betriebsstrom entsprechenden Stromstärke und in Mikroohm misst. Mikroohmmeter verfügen über eine Messkonfiguration mit 4 Anschlüssen, die die Leitungswiderstände automatisch subtrahiert. Die effektive Prüfung von Verbindungen wird normalerweise mit einem Mikroohmmeter abgeschlossen.

## So prüfen Sie die Erde

Ein letztes Prüfgerät, das bei Wartungstests nützlich sein kann, ist ein Schleifenmessgerät. Dieses kombiniert einige der Vorteile der Durchgangsprüfung und der Niederohmmessung. Anstatt lange Kabel auszulegen, einen Tarawert zu subtrahieren oder die Anlage stromlos zu schalten, wird ein Schleifenmessgerät in eine Buchse gesteckt oder über kurzgeschlossene Leitungen von stromführend zu neutral oder zur Masse verbunden. Der Stromkreis wird unter Spannung gesetzt und das Schleifenmessgerät benötigt nur zwei halbe Zyklen, was nicht ausreicht, um Schutzvorrichtungen auszulösen, um den gesamten Schleifenwiderstand zu messen. Dazu gehören der Erdungsleiter, die Erdungselektrode und die Erdung parallel zum geerdeten Stromnetzleiter zurück zum Transformator, der den Standort bedient, und dann wieder zurück durch den „heißen“ Strom. Wenn ein verdächtig hoher Messwert ausgegeben wird, müssen die einzelnen Elemente des Pfades separat geprüft werden. Wenn keine hohen Messwerte ermittelt werden, erleichtert das Schleifenmessgerät die schnelle Prüfung und Abnahme des Standorts.

### Prüfleitungen

In den Bedienungsanleitungen werden häufig ausgebreitete Kabel und andere Hinweise zur Vermeidung von Störungen während einer Erdungsmessung empfohlen. Leitungen, die starr parallel und dicht zusammen laufen, können ein Übersprechen oder induziertes Rauschen entwickeln, das den Messwert beeinflusst. Es wird empfohlen, Kabel auszubreiten oder weit voneinander zu halten.

Parallel zu Freileitungen laufende Messleitungen sind unbedingt zu vermeiden. Diese Leitungen können nicht nur stören, sondern auch einen Erdungstest komplett obsolet machen, indem sie das Display so instabil machen, dass es unlesbar ist. Aber die natürliche Tendenz während eines Erdungstests ist, nach unten auf das Prüfgerät und die Anordnung zu blicken. Was sich über dem eigenen Kopf befindet, kann leicht übersehen werden. Stromleitungen sollten unbedingt im rechten Winkel überquert werden, um diese Störung zu vermeiden.

Wenn Luftinterferenzen ausgeprägt sind, können auch unterirdische Interferenzen auftreten. Dies ist tendenziell weniger schwerwiegend und weniger offensichtlich. Viele Ströme verlaufen durch den Boden und suchen den Transformator, von dem sie erzeugt wurden. Bei älteren Prüfgeräten hat der Bediener möglicherweise nur wenig Rückgriff auf die Mittelwertbildung der Zeigerschwingungen. Moderne Prüfgeräte speisen jedoch ein Testsignal mit einer ausgeprägten Rechteckwellenfrequenz ein, die im Rauschen erkannt wird.

Zusätzliche Funktionen erhöhen die Effektivität, einschließlich Frequenzanpassung (manuell oder automatisch), Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses und Filterung.

Bei langen Leitungsabständen, wie z. B. bei der Prüfung großer Netze, können gespulte Leitungen involviert sein. In besonders anspruchsvollen Umgebungen wie Wüsten können Messleitungen kilometerweit gestreckt werden! Es überrascht nicht, dass Spulenleitungen Ungenauigkeiten aufgrund von Kapazität und Induktivität verursachen können. Schlimmer noch: Eine solche Unsicherheit kann die Messung unter den tatsächlichen Wert bringen, sodass der Bediener irrtümlicherweise das Gefühl bekommt, die „Spezifikationen erfüllt zu haben“. Der Grad der Ungenauigkeit kann durch Messung mit einem bekannten Widerstand in einer 2-Punkt-Konfiguration mit vollständig ausgefahrenen und dann aufgerollten Leitungen beurteilt werden. Dies zeigt den Einfluss von gespulten langen Messleitungen auf das Prüfgerät. Nur die hochwertigsten Prüfgeräte können auch bei einer Meile gespulter Messleitungen weiterhin genaue Messwerte liefern. Fazit: Für vollkommen genaue Messungen sollten die Leitungen entspult und gerade ausgelegt werden.

### Lazy Spikes

Die neuesten Entwicklungen der digitalen Erdungstester können mit sehr hohen temporären Spitzenwiderständen betrieben werden und liefern dennoch zuverlässige und genaue Ergebnisse. Da der Strom und die Spannung separat gemessen werden, können Elektrodenmessungen mit Prüfspitzenwiderständen bis zu 400 k $\Omega$  durchgeführt werden.

Der Vorteil dieser Geräte, die einen hohen Spitzenwiderstand tolerieren, ist in der Regel, dass die Prüfungen auch im Feld schnell durchgeführt werden können, da die Elektroden nicht allzu weit in den Boden eingetrieben werden müssen. In städtischen Umgebungen können die Prüfungen auch mithilfe von Hinweisschildern, Metallzäunen oder Pollern durchgeführt werden. Wenn dies nicht möglich ist, können die Ergebnisse durch die Verlegung der temporären Elektroden auf einem feuchten Flächenstück erzielt werden. Gewickelte Metallketten oder metallisierte Bodenmatten, über die Wasser gegossen wird, ergeben eine noch bessere Elektrode, da sie sich enger an die Erdoberfläche anpassen als eine starre Spitze. Diese Technik hat zu Messwerte mit Spitzen unter 10 k $\Omega$  geführt, und zwar in einem maximalen Wert, der zu einem Auslesefehler führt.

Bei modernen Geräten wird auf dem Display ein Problem mit den temporären Spitzen angezeigt, um zu zeigen, dass ein Messwert nicht gültig ist.

## So prüfen Sie die Erde

Möglicherweise muss eine geeignetere Position für die Spitze verwendet werden, z. B. entlang des Spaltes zwischen Pflastersteinen, eines Risses in Beton oder in einer nahegelegenen Pfütze. Solange keine Warnanzeigen erscheinen, wurde ausreichend Kontakt hergestellt und es kann eine zuverlässige Prüfung durchgeführt werden.

### Ergänzungsprüfungen

Es gibt entsprechende Prüfungen, die durchgeführt werden können, um die aus der Erdungsprüfung gewonnenen Informationen zu ergänzen und den Schutz durch die Erdungselektrode zu erhöhen. Eine davon ist eine Durchgangsprüfung, um die ausreichende Vollständigkeit in den Erdungsleitern und bis zum Kontaktpunkt mit der Elektrode sicherzustellen. Es kann ein Messgerät mit entweder drei oder vier Anschlüssen in einer Konfiguration mit zwei Anschlüssen verwendet werden, indem die entsprechenden Paare zusammenschaltet werden. Die beiden Leitungen können so über eine Verbindung, Schweißnaht oder Leitungslänge verbunden und der Widerstand kann gemessen werden. Ein Erdungsmessgerät liefert jedoch nur eine komfortable Backup-Prüfung und keine absolut sichere Durchgangsprüfung. Der Grund dafür ist, dass der Prüfstrom aus Sicherheitsgründen auf Werte unterhalb einer für den menschlichen Körper schädlichen Grenze begrenzt ist. Für den absolut sicheren Nachweis einer Verbindung muss diese Verbindung jedoch auf dem aktuellen Niveau belastet werden, so dass Korrosionen, Risse, lose Verbindungen und dergleichen aufgedeckt werden können. Aus diesem Grund wird ein spezielles Ohmmeter mit niedrigem Widerstand von 10 A oder mehr Prüfstrom bevorzugt.

Um das Personal bei der Durchführung eines Erdungstests zu schützen und das Vorhandensein von elektrischen Problemen im System zu identifizieren, kann die Erdungselektrode zunächst auf das Vorhandensein von Fehlerstrom überprüft werden. Es ist nicht ungewöhnlich, dass die Elektrode in einem unausgeglichene oder fehlerhaften elektrischen System einen Fehlerstrom mehr oder weniger konstant gegen Masse führt. Dieser kann nur wenige Milliampere oder mehrere Ampere betragen und unbemerkt auftreten. Ein ausreichend empfindliches Clamp-on-Messgerät kann das Problem aufdecken und das Prüfteam in wenigen Sekunden vor möglichen Schlägen schützen.

Die Gesamtimpedanz des Systems kann mit einem Schleifenmessgerät sofort gemessen werden. Dieses Gerät simuliert einen Fehler zwischen einem Phasenleiter und der Erde und misst dabei die Gesamtimpedanz der gesamten Erdungsschleife, einschließlich der Leiter, und den Erdungsrücklauf zurück zum Wandler und seiner Wicklung. Wenn eines dieser Elemente zu hohe Widerstände aufweist, können Schutzvorrichtungen nicht einwandfrei funktionieren, auch



## So prüfen Sie die Erde

wenn die Erdungselektrode selbst bei einem ausreichend niedrigen Widerstand gehalten wird.

### Verbesserung des Erdwiderstands

Wenn Sie feststellen, dass der Widerstand der Erdungselektrode nicht niedrig genug ist, können Sie ihn wie folgt verbessern:

- Verlängern Sie die Erdungselektrode in der Erde.
- Verwenden Sie mehrere Stäbe.
- Behandeln Sie den Boden.

**Einfluss der Stabgröße:** Wie Sie sich vorstellen können, verringert der tiefe Eintrieb eines längeren Stabs deren Widerstand erheblich. Im Allgemeinen wird durch die Verdopplung der Stablänge der Widerstand um ca. 40 % verringert. Die Kurve in Abb. 15 zeigt diesen Effekt. Beachten Sie zum Beispiel, dass ein Stab, der 2 Fuß tief eingetrieben wird, einen Widerstand von 88  $\Omega$  hat. Der gleiche Stab hat, wenn er 4 Fuß tief eingetrieben wird, einen Widerstand von etwa 50  $\Omega$ . Verwenden Sie die 40%ige Reduzierungsregel:  $88 \times 0,4 = 35$ . Durch diese Berechnung würde ein 4 Fuß tiefer Stab einen Widerstand von  $88 - 35$  oder 53  $\Omega$  aufweisen – das passt genau zu den Kurvenwerten.

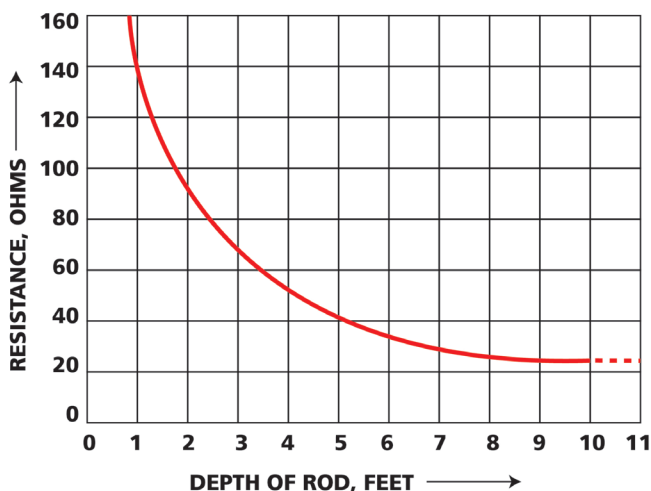


Abb. 15: Erdwiderstand nimmt mit der Tiefe der Elektrode in der Erde ab [5]

## So prüfen Sie die Erde

Sie können auch meinen, dass die Erhöhung des Elektrorendurchmessers den Widerstand verringern würde. Das ist aber nur in ganz geringem Maße der Fall. Bei gleicher Tiefe reduziert die Verdoppelung des Stabdurchmessers den Widerstand nur um etwa 10 Prozent. Abb. 16 zeigt diese Beziehung. Zum Beispiel hat ein 10 Fuß tiefer Stab mit einem Durchmesser von 5/8 Zoll einen Widerstand von 6,33  $\Omega$ ; die Vergrößerung ihres Durchmessers auf 1-1/4 Zoll senkt den Widerstand auf 5,6  $\Omega$ . Aus diesem Grund sollten Sie den Durchmesser des Stabs in der Regel nur erhöhen, wenn Sie sie in hartes Gelände eintreiben müssen.

**Verwendung von mehreren Stäben:** Zwei gut beabstandete, in die Erde getriebene Stäbe sorgen für parallele Bahnen. Sie sind im Wesentlichen zwei parallele Widerstände. Die Regel für zwei parallele Widerstände gilt nicht genau, d. h. der resultierende Widerstand ist nicht die Hälfte der einzelnen Stabwiderstände (vorausgesetzt, sie sind gleich groß und tief). Tatsächlich beträgt die Reduzierung für zwei gleiche Widerstandsstäbe etwa 40 %. Wenn drei Stäbe verwendet werden, beträgt die Reduzierung 60 %; bei vier 66 % (siehe Abb. 17).

Wenn Sie mehrere Stäbe verwenden, müssen diese in einem Abstand von mehr als der Länge ihrer Eintreibung in die Tiefe liegen. Es gibt theoretische Gründe dafür, aber Sie müssen sich nur auf die Kurven in Abb. 18 beziehen. Wenn Sie beispielsweise zwei Stäbe parallel und mit 10 Fuß Abstand verwenden, wird der Widerstand um 40 % verringert. Wenn der Abstand auf 20 % erhöht wird, beträgt die Reduzierung 50 %.

**Behandlung des Bodens:** Die chemische Bodenbehandlung ist eine gute Methode zur Verbesserung des Erdwiderstands, wenn Sie keine tieferen Bodenstäbe aufgrund von hartem zugrunde liegendem Fels einsetzen können. Es liegt außerhalb des Bereichs dieses Handbuchs, die besten Behandlungskemikalien für alle Situationen zu empfehlen. Sie müssen den möglichen korrosiven Effekt auf die Elektrode sowie die EPA und die örtlichen Umweltvorschriften beachten. Magnesiumsulfat, Kupfersulfat und normales Steinsalz sind geeignet für nicht korrosive Materialien. Magnesiumsulfat ist der am wenigsten korrosive Stoff, aber Steinsalz ist billiger und erfüllt seine Aufgabe in einem Graben um die Elektrode herum (siehe Abb. 19). Es sollte darauf hingewiesen werden, dass lösliche Sulfate aggressiv sind und von Gebäudefundamenten ferngehalten werden sollten. Ein weiterer beliebter Ansatz ist die Befüllung der Elektrode mit einem besonders leitfähigen Beton. Eine Reihe solcher Produkte wie Bentonit sind auf dem Markt erhältlich.

## So prüfen Sie die Erde

Die chemische Behandlung ist keine dauerhafte Methode zur Verbesserung des Erdungselektrodenwiderstands. Die Chemikalien werden allmählich durch Regen und natürliches Ablaufen durch den Boden ausgewaschen. Je nach Porosität des Bodens und der Menge der Niederschlagsmenge variiert der Zeitraum für den Austausch. Es kann mehrere Jahre dauern, bis eine weitere Behandlung erforderlich ist.

Die chemische Behandlung hat auch den Vorteil, dass die jahreszeitlichen Schwankungen der Beständigkeit, die sich aus der regelmäßigen Benetzung und Austrocknung des Bodens ergeben, reduziert werden. (Siehe Kurven in Abb. 20.) Sie sollten diese Methode jedoch nur dann einsetzen, wenn tiefere oder mehrere Elektroden nicht praktikabel sind.

Vgl. Anhang I, wo die Verwendung eines Nomogramms bezüglich der Länge der Stabs, des Durchmessers des Stabs und des Erdwiderstands gegen den Erdwiderstand beschrieben wird.

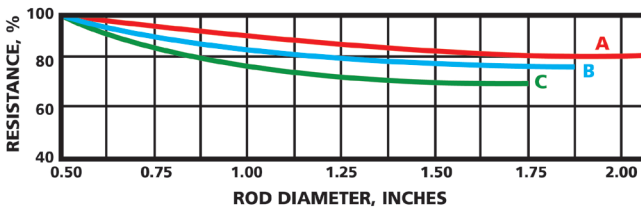


Abb. 16: Der Durchmesser eines Stabs hat wenig Einfluss auf seinen Erdwiderstand

Kurve A, aus Referenz 19

Kurve B, Durchschnitt der UL-Prüfungen in Chicago

Kurve C, Durchschnitt der UL-Prüfungen in Pittsburgh

# So prüfen Sie die Erde

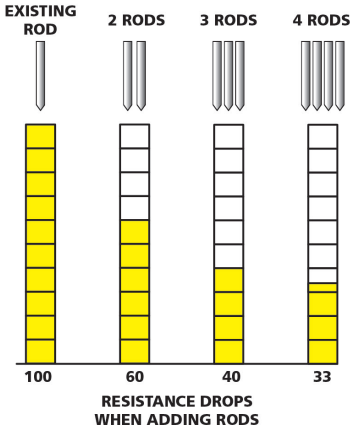


Abb. 17: Durchschnittliche Ergebnisse von Mehrstab-Erdungselektroden<sup>13</sup>

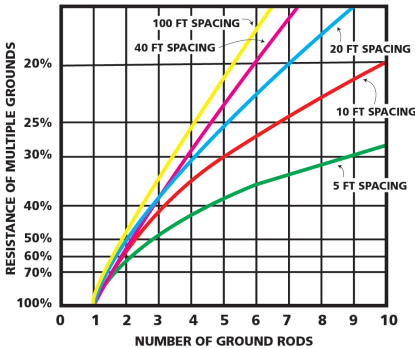


Abb. 18: Vergleichswiderstände von Erdungselektroden mit mehreren Stäben  
Ein Stab entspricht 100 %<sup>14</sup>

<sup>13,14</sup> Aus „Practical Grounding Principles and Practices for Securing Safe Dependable Grounds“, Copperweld Steel Co., Glassport, Pa.

## So prüfen Sie die Erde

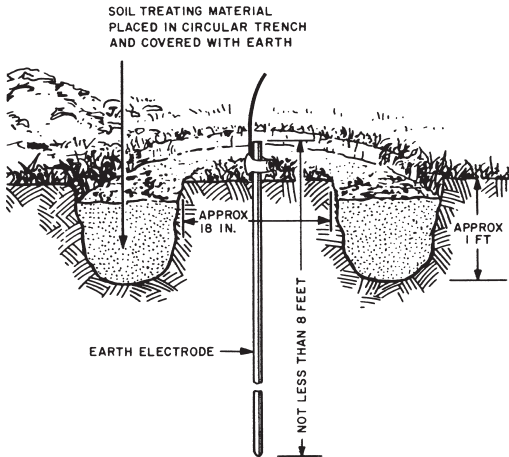


Abb. 19: Trench-Methode zur Bodenbehandlung<sup>15</sup>

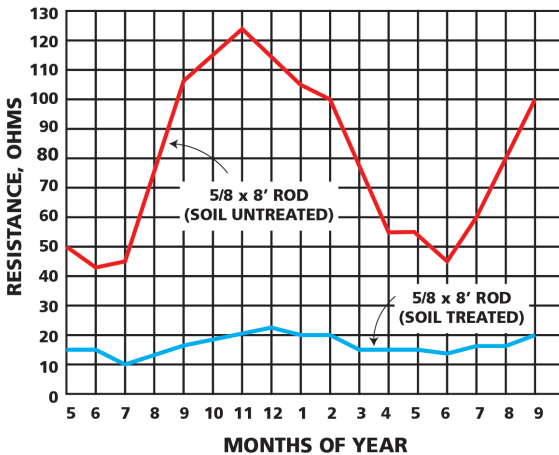


Abb. 20: Die chemische Behandlung des Bodens vermindert saisonale Schwankungen des Erdwiderstands der Elektroden.<sup>16</sup>

<sup>15,16</sup> Aus „Practical Grounding Principles and Practices for Securing Safe Dependable Grounds“, Copperweld Steel Co., Glassport, Pa.

## So prüfen Sie die Erde

### Zusätzliche Testmethoden: Clamp-on-Methode

Spannungsabfallprüfung und entsprechende Modifikationen gemäß IEEE 81. Diese Methode ist extrem zuverlässig, sehr genau und kann zum Testen von allen Erdungssystemen verwendet werden. Darüber hinaus hat der Bediener die volle Kontrolle über den Prüfaufbau und kann seine Ergebnisse durch Prüfungen in verschiedenen Sondenabständen verifizieren.

Leider gibt es bei der Spannungsabfallmethode auch einige Nachteile:

- Sie ist äußerst zeitaufwändig und arbeitsintensiv.
- Einzelne Erdungselektroden müssen vom zu messenden System getrennt werden.
- Es gibt Situationen, in denen eine solche Trennung nicht möglich ist.

Bei der Clamp-on-Erdungsprüfung wird eine Prüfung ohne Stäbe durchgeführt, d. h. eine Erdwiderstandsprüfung, bei der die Erdung nicht getrennt wird. Basierend auf dem Ohmschen Gesetz ( $R=V/I$ ) induziert die stabile Prüfung eine bekannte Spannung in einem Schleifenkreis an Masse, misst den resultierenden Stromfluss und berechnet den Schleifenwiderstand des Stromkreises. Vierpolige Erdungsmessgeräte führen ebenfalls eine stabile Prüfung durch. Sie verwenden jedoch zwei Klemmen, eine Spannungsklemme (V-Klemme) und eine Stromklemme (I-Klemme), und halten die Klemmen getrennt, um eine Wechselwirkung zwischen den beiden zu verhindern.

Der Bediener muss sicherstellen, dass die Masse in die Rückführungsschleife einbezogen wird, und sich bewusst sein, dass das Prüfgerät den vollständigen Widerstand des Weges misst (Schleifenwiderstand). Alle Elemente der Schleife werden in Reihe gemessen. Die Methode profitiert von einem niedrigen Rückführungswiderstand, d. h., wenn der Erdwiderstand im Vergleich zum effektiven Schleifenwiderstand groß ist.



Der Megger DET14C zeigte die Messung eines Erdstabes in einem typischen Erdungsschacht.

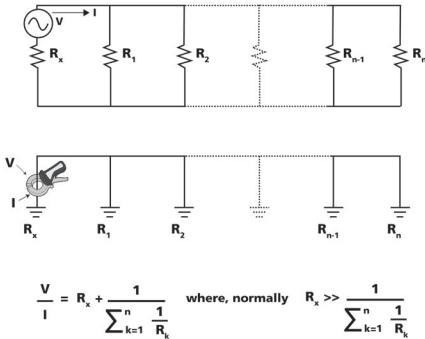


Abb. 21: Grundlegende Clamp-on-Verfahren für Erdungsprüfungen

Abb. 21 zeigt die grundlegende Methode der stablosen Prüfung. Das Prüfgerät wird über  $R_X$  geklemmt, wobei die Erdung gemessen wird. Der gesamte Prüfstrom fließt durch die gemessene Masse ( $R_X$ ) und unterscheidet zwischen den restlichen Parallelwiderständen ( $R_1$  bis  $R_n$ ). In einem Mehrfacherdungssystem kann die Schaltung als eine Schleife betrachtet werden, die aus der einzelnen Erdungselektrode, einem Rückweg über alle anderen Elektroden und der Masse der Erde besteht. Die einzelne Elektrode hat einen höheren Widerstand als die restlichen parallelen Erdungsverbindungen.

Abb. 22 zeigt ein praktisches Beispiel dafür, dass die Clamp-on-Methode aufgrund des niedrigen Rückführungswiderstands sehr effektiv ist. Die Anwendung ist eine miteinander verbundene parallele Erdung, ähnlich einer Lichterkette. Die Erdung ist ein wichtiger Bestandteil der Schleife. Der Widerstand gegen Masse bei  $R_G$  beträgt:

$$R_{\text{loop}} = V_{\text{loop}}/I_{\text{loop}} = R_G + (1/(1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4 + 1/R_5))$$

Für sechs ähnliche Elektroden mit einem Widerstand von  $10 \Omega$  wäre der Schleifenwiderstand, der bei der Prüfung jeder Elektrode gemessen wurde, derselbe:

$$R_{\text{loop}} = 10 \Omega + 2 \Omega = 12 \Omega$$

## So prüfen Sie die Erde

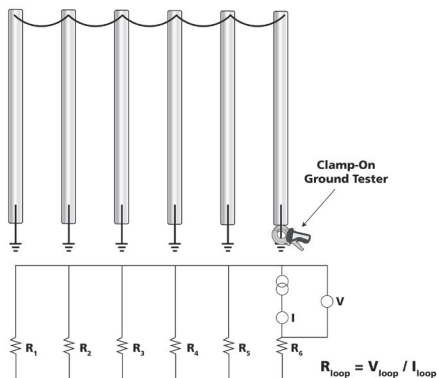


Abb. 22: Polerdungsanwendungen

Für sechzig ähnliche Elektroden mit einem Widerstand von  $10 \Omega$  wäre der Schleifenwiderstand, der bei der Prüfung jeder Elektrode gemessen wird, folgender Wert:

$$R_{loop} = 10 \Omega + 0,17 \Omega = 10,17 \Omega$$

Wenn eine von sechs Elektroden einen Widerstand von  $100 \Omega$  und der Rest einen Widerstand von  $10 \Omega$  hat, wäre der Schleifenwiderstand, der bei der Prüfung der hochohmigen Elektrode gemessen wurde, derselbe:

$$R_{loop} = 100 \Omega + 2 \Omega = 102 \Omega$$

Der Schleifenwiderstand, der bei der Prüfung jeder der fünf anderen Elektroden gemessen wurde, wäre:

$$R_{loop} = 10 \Omega + 2,4 \Omega = 12,4 \Omega$$

Je mehr parallele Rückläufe, desto geringer ist der Schleifenwiderstand und desto näher kommt das Ergebnis einer Spannungsabfallprüfung. Ein hoher Widerstand von vielen niederohmigen Widerstandsrückläufen wird als hoher Widerstand angezeigt.



Es ist wichtig, dass der Bediener die Grenzen der stablosen Prüfmethode versteht, damit er das Gerät nicht falsch anwendet und fehlerhafte oder irreführende Messwerte erhält. Ein Clamp-on-Prüfgerät ist ein wichtiges Werkzeug in der Tasche eines Prüftechnikers, und die Trend-Ergebnisse werden im Laufe der Zeit einen Mehrwert im Hinblick auf die Frühwarnung vor einer Verschlechterung des Erdwiderstands schaffen.

### **Vorteile der stablosen Prüfung**

Der Hauptvorteil der Clamp-on-Methode besteht darin, dass sie schnell und einfach ist, da keine Sonden eingeführt werden müssen und der Erdungsstab nicht vom System getrennt werden muss. Ein zeitsparendes Beispiel ist die Messung eines großen Industriegeländes für die Blitzschutzterdung, bei der ein Spannungsabfalltest an Hunderten von Bodenpunkten mehrere Tage dauern würde. Die gleichen Tests würden mit einem Clamp-on-Prüfgerät nur einige Stunden dauern. Es gibt auch Beispiele wie die Erdung von Umspannwerken oder Mobilfunkmasten, bei denen eine Trennung nicht möglich ist und nur stablose Prüfungen möglich sind. Mit dem Clamp-on-Prüfgerät können jeder Schleifenwiderstand und jede Anwendung gemessen werden, wie z. B. eine Erdungsplatte an einer Struktur mit mehreren angeschlossenen Blitzableitern, sofern der Bediener die Tatsache berücksichtigt, dass er den gesamten Schleifenwiderstand misst.

Viele Clamp-on-Prüfgeräte beinhalten eine Stromzangenmessung zur Prüfung des in einer Erdungsschleife fließenden Stroms im Bereich von weniger als 1 mA bis 35 A Wechselstrom. Eine Strommessung ist eine nützliche Sicherheitsüberprüfung für Erdungen, die nicht getrennt werden sollten, da sie einen Funken verursachen könnten. Eine Strommessung sollte durchgeführt werden, wenn 50 oder 60 Hz (oder eine andere Netzfrequenz) den Erdwiderstand der Klemme stören.

Clamp-on-Prüfgeräte arbeiten mit höheren Frequenzen (typischerweise zwischen 1,5 und 3,5 kHz) als 2-, 3- und 4-polige Geräte (48 bis 128 Hz), um die Aderdicke zu reduzieren, was den Zugang zu Erdungsbändern und Kabeln verbessert und das Gewicht des Prüfgerätes reduziert. Der Nachteil ist, dass dieser Ansatz weniger repräsentativ für einen Fehler bei der Netzfrequenz ist als herkömmliche Erdungsprüfungen, aber höhere Frequenzen weisen induktive Blindwiderstände zurück, was für Erdungen von Sendemasten, Beleuchtungen und ähnliche Standorten von Vorteil ist.

# So prüfen Sie die Erde

## Einschränkungen der stablosen Prüfung

Clamp-on-Prüfgeräte sind nur in Situationen mit mehreren parallelen Erdungen wirksam. Sie können nicht isoliert eingesetzt werden, da es keine Rückführung gibt. Darüber hinaus können sie nicht eingesetzt werden, wenn es eine alternative Schleife mit geringerem Widerstand ohne Erdung gibt. Bei der Installation oder Inbetriebnahme neuer Standorte wird eine Spannungsabfallprüfung empfohlen. Es gelten allgemeine Regeln für die Erdungsprüfung. Wenn sich ein anderer Teil des Erdungssystems z. B. im Einflussbereich der zu prüfenden Elektrode befindet, ist das Ergebnis niedriger als der tatsächliche Widerstand der Elektrode.

Für Messwerte, die einem Spannungsabfallprüfungsergebnis an einer bestimmten Masseverbindung nahe kommen sollen, ist eine niedrige Rückführung erforderlich. Eine hohe Rückführung des Widerstands führt zu hohen Messwerten. Der Anklempfpunkt des Geräts muss am richtigen Teil der Schleife für die zu prüfende Elektrode sein, da eine falsche Verbindung einen fehlerhaften Messwert liefern kann. Der Bediener muss über ein gründliches Verständnis des Erdungssystems verfügen, um genau zu wissen, was gemessen wird.

Das Verfahren ist empfindlich gegenüber Störungen durch nahegelegene elektrische Geräte. Ältere Geräte sind bei sehr niederohmigen Erdungen weniger effektiv.

Ein letzter Nachteil des Clamp-on-Erdungsmessgeräts besteht darin, dass es keinen eingebauten Nachweis für das Verfahren ohne Trennen der Verbindung und Durchführung einer Spannungsabfallprüfung gibt. Wie bereits zuvor erwähnt, sollte das Clamp-on-Erdungsmessgerät nicht das einzige Erdungsmessgerät sein. Es ist jedoch zusammen mit einem Spannungsabfallprüfgerät ein wichtiger Bestandteil der Werkzeuge zur Erdungsprüfung. Mit dem Clamp-on-Erdungsmessgerät können Probleme schnell erkannt werden. Anschließend kann ein Spannungsabfallprüfgerät zur Überprüfung der Ergebnisse verwendet werden. In Verbindung mit Trendergebnissen ermöglicht dieser Ansatz es dem Bediener, produktiver zu arbeiten und die frühzeitige Erkennung potenzieller Fehler zu verbessern.

Die IEEE-Norm „empfiehlt“ das Anklemmverfahren nicht, beschreibt es jedoch und führt die Einschränkungen der zulässigen Verwendung auf: „Das Anklemmverfahren hat verschiedene große Vorteile, aber auch viele Nachteile. Es ist wichtig, dass der Bediener die Grenzen der Prüfmethode versteht, damit das Gerät nicht falsch angewendet wird und fehlerhafte oder irreführende Messwerte ausgegeben werden.“<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Gemäß IEEE-Standard 81-2012

## Erdungsprüfung von Mobilfunktürmen

Mobilfunktürme stellen ein Problem dar, bei dem Clamp-on-Prüfgeräte bei richtiger Anwendung gut funktionieren, ansonsten aber „tote Kurzschlüsse“ messen. Das Problem ist, dass der Turm unter Spannung steht und die Bereitstellung von Diensten die Entnahme von Strom verbietet. In den USA verfügen Versorgungseinrichtungen in der Regel über eine Versorgungserdung mit niedriger Impedanz, die über einen Erdungsanschluss am Energiezähler geerdet ist. Das stabile Verfahren basiert auf einer niederohmigen Rückführung in der Schleife, so dass dies ein idealer Punkt für Clamp-on-Prüfgeräte zur Messung des Erdwiderstands ist. Da die Versorgungserdung sehr niedrig ist, liegt der Schleifenwiderstand, der vom Clamp-on-Prüfgerät am Energiezähler gemessen wird, sehr nahe an dem Widerstand, den eine Spannungsabfallmessung ergeben würde. Dabei ist zu beachten, dass eine Spannungsabfallprüfung die Größe des gesamten Geländeerdungssystems berücksichtigen und sicherstellen muss, dass genügend lange Leitungen vorhanden sind, um den Erdwiderstand außerhalb des Einflussbereichs des Erdungssystems korrekt zu messen.

Abb. 23 zeigt eine Anwendung, bei der das Clamp-on-Verfahren an Sendemasten häufig falsch eingesetzt wird. Dieses Beispiel zeigt, warum es so wichtig ist, das System zu kennen, um die richtige Prüfung durchzuführen. Die Abbildung zeigt die Probleme beim Versuch, ein Clamp-on-Erdungsmessgerät an einem Mobilfunkmast einzusetzen. Mobilfunktürme sind an der Basis geerdet, wobei jeder Abspanndraht geerdet ist und alle in einem Erdungsring miteinander verbunden sind. Wenn der Bediener die Klemme um den oberen Teil einer der Abspanndrahterdungen legt, schließt der Prüfstrom einfach den Stromkreis im Erdungsring und nicht den durch die Erde. Bitte beachten Sie, dass der Prüfstrom durch den Leiter fließt, der die einzelnen den Ring bildenden Elemente (Erdungsstäbe) verbindet. Daher misst der Clamp-on-Erdungsprüfer nicht die Qualität des Erdungssystems. Der Messwert entspricht in Wahrheit dem Schleifenwiderstand.

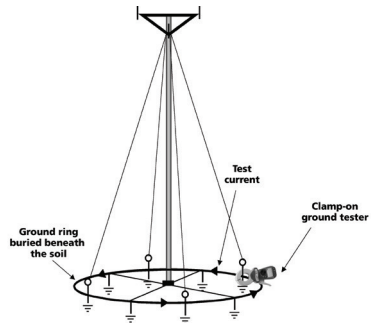


Abb. 23: Mobilfunkmast – Beispiel einer falsch eingesetzten Anwendung

## So prüfen Sie die Erde

### Zusätzliche Testmethoden: Prüfen mit angeschlossener Elektrode (Attached Rod Technique, ART)

Die Spannungsabfallprüfung ist extrem zuverlässig, sehr genau, entspricht IEEE 81 und bietet dem Bediener die vollständige Kontrolle über die Einrichtung. Leider ist sie sehr zeitaufwendig und arbeitsintensiv und erfordert, dass die einzelnen Erdungselektroden vom System getrennt werden.

Wie in Anhang II beschrieben, ist die Clamp-on-Prüfung schnell und einfach, hat jedoch viele Einschränkungen. Sie erfordert eine gute Rückführung, ist anfällig für Rauschen, hat eine geringere Messgenauigkeit und kann nicht bei isolierten Erdungen verwendet werden. Sie ist nicht geeignet für Prüfungen bei der Installation oder Inbetriebnahme neuer Standorte und hat keinen integrierten Nachweis.

Die ART-Prüfmethode bietet einige der Vorteile der Clamp-on-Prüfungen (die Erdungselektrode muss nicht abgetrennt werden) und bleibt gleichzeitig der Theorie und Methodik der Spannungsabfallprüfungen treu. Um diese Methode zu verstehen, ist es notwendig, ihre theoretischen und mathematischen Grundlagen zu verstehen. Theoretisch könnte eine Spannungsabfallmessung ohne Trennen der Erdungselektrode durchgeführt werden, wenn zusätzliche Messungen mit einem Erdungsableitstrommessgerät (Milliamperemeter) durchgeführt würden. Die Abbildungen 24 und 25 zeigen die drei Messungen, die vorgenommen werden sollten.

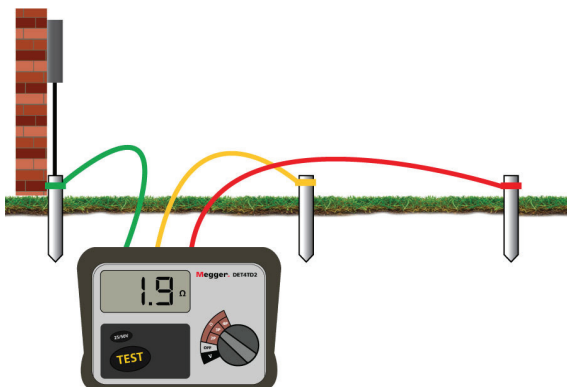


Abb. 24: Erdwiderstandsmessungen

## So prüfen Sie die Erde

Der erste Schritt ist die Messung des Widerstands ( $R_T$ ) des Gesamtsystems unter Verwendung einer typischen Spannungsabfallkonfiguration. In diesem Beispiel beträgt der Messwert für  $R_T$  1,9  $\Omega$ .

Schritt zwei beinhaltet das Messen des Gesamtstroms ( $I_T$ ), der von C1 in das System eingespeist wird. In diesem Beispiel ist  $I_T$  9,00 mA. Der nächste Schritt besteht darin, die Strommenge ( $I_U$ ) zu messen, die in den Dienst fließt. In diesem Fall ist  $I_U$  5,00 mA. Mit diesen Messungen kann der Spannungsabfall vom gewählten Bodenvolumen bis zum Punkt P2 wie folgt bestimmt werden:

$$V = I_T \times R_T$$

$$V = 0,009 \text{ A} \times 1,9 \Omega$$

$$V = 0,017 \text{ V}$$

Der Stromfluss durch die Erdungselektrode ( $I_G$ ) kann ebenfalls ermittelt werden.

$$I_G = I_T - I_U$$

$$I_G = 9,00 \text{ mA} - 5,00 \text{ mA}$$

$$I_G = 4,00 \text{ mA}$$

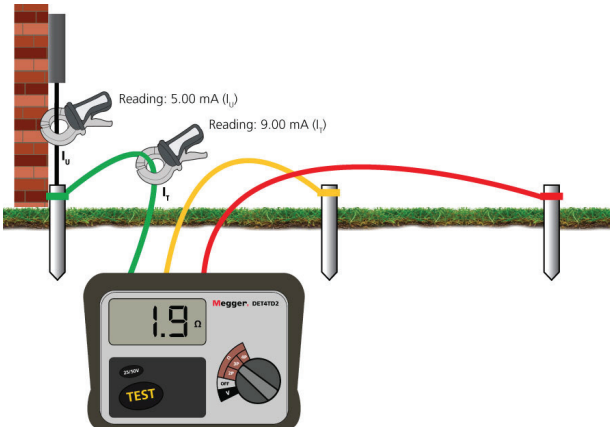


Abb. 25: Messung des Ableitstroms

## So prüfen Sie die Erde

Mit dem Spannungsabfall und dem Stromfluss durch die Erdungselektrode kann der Widerstand der Erdungselektrode ( $R_G$ ) ermittelt werden.

$$R_G = V \div I_G$$

$$R_G = 0,017 \text{ V} \div 0,004 \text{ A}$$

$$R_G = 4,25 \ \Omega$$

Wie bereits erwähnt, ist dies ein theoretischer Ansatz, der perfekte Bedingungen erfordert. Jeder zusätzliche Strom, der durch die Erdungselektrode fließt, würde die Messgenauigkeit verringern. Das Erdungsableitstrommessgerät müsste den gesamten vom Gerät erzeugten Strom bis auf den Strom aus C1 herausfiltern, um die Genauigkeit zu gewährleisten. Außerdem erfordert dieser Ansatz, dass eine Reihe von mathematischen Berechnungen durchgeführt wird.

Das ART-Verfahren basiert auf der oben beschriebenen Theorie. Abbildung 26 zeigt eine ART-Prüfung.

Erdungsmessgeräte, die für ART-Messungen ausgelegt sind, verfügen über eine spezielle integrierte Stromzange, die zwischen der C1-Verbindung und

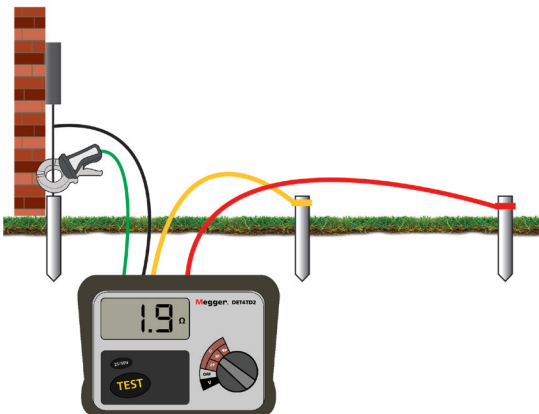


Abb. 26: Prüfen mit angeschlossener Elektrode (Attached Rod Technique, ART)

## So prüfen Sie die Erde

der Erdung platziert wird. Diese Art von Gerät verfügt über einen Rauschschutz und filtert digital alle Ströme außer dem vom Gerät erzeugten Strom heraus. Der Mikroprozessor des Geräts führt automatisch alle Berechnungen durch, die zur Erzeugung einer Widerstandsmessung für die Erdungselektrode erforderlich sind.

Der Test ist eine Spannungsabfallprüfung, was bedeutet, dass alle Regeln eingehalten werden. Idealerweise sollte der Bediener zehn Messungen durchführen und die Ergebnisse grafisch darstellen, um den tatsächlichen Widerstand zu bestimmen. Der korrekte Abstand der Sonde ist weiterhin wichtig, und das Spannungsabfallverfahren und seine Methodik müssen eingehalten werden. Wie bei einem herkömmlichen Spannungsabfalltest können die Ergebnisse durch eine Erhöhung der Sondenabstände überprüft werden.

Der Vorteil der ART-Methode gegenüber herkömmlichen Spannungsabfalltests besteht darin, dass die Erdungselektrode bei der Prüfung nicht vom System getrennt werden muss.



Verwendung der **ART**-Methode mit einem Megger DET2/3-Gerät zur Prüfung kommerzieller Erdungen ohne Trennen des Systems

## So prüfen Sie die Erde

### Zusätzliche Testmethoden: Stern-Dreieck-Methode<sup>18</sup>

Wenn die Stromzange so nahe liegt, dass sie sich *innerhalb* der zu prüfenden Erdung befindet, erweisen sich die mathematischen Nachweise für die Anstiegsmethode und die Schnittkurven als unverständlich und zeigen dem Bediener an, dass eine bessere Prüfstelle gefunden werden muss. Wenn diese Bedingung gegeben ist und der Raum so begrenzt ist, dass kein akzeptabler Abstand abgeleitet werden kann, kann es notwendig sein, auf die Stern-Dreieck-Methode zurückzugreifen. Benannt nach der Konfiguration der Prüfzangen und der Messlinien (eine Grafik ähnelt den bekannten Symbolen für „Delta“- und „Stern“-Wicklungen), spart dieses Verfahren Platz, indem es eine enge Konfiguration von drei Zangen um die zu prüfende Erdung herum einsetzt (Abb. 27).

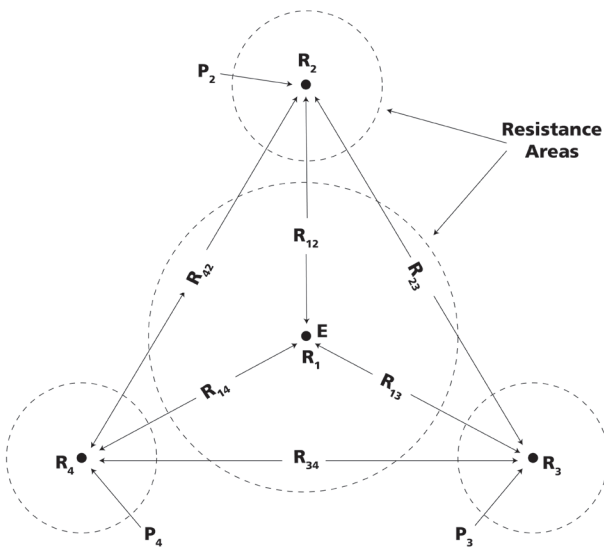


Abb. 27: Stern-Dreieck-Prüfaufbau

<sup>18</sup> Entwickelt von W. Hymmers und veröffentlicht in „Electrical Review“, Januar 1975



## So prüfen Sie die Erde

In Abbildung 27 ist die zu prüfende Erdungselektrode mit „E“ gekennzeichnet. Drei Stromzangen ( $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$ ) sind äquidistant von „E“ mit einem Winkel von  $120^\circ$  zwischen ihnen angeordnet. Die Trennung von Spannungs- und Stromkreisen wird aufgehoben und die zu prüfende Erdung mittels einer Reihe von Zweipunktmessungen (vgl. Abb. 28) zwischen allen Zangenpaaren beprobt.

Isoliert weist die zu prüfende Erdung „E“ einen Widerstand  $R_1$  auf, und die Zangen  $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$  haben die Widerstände  $R_2$ ,  $R_3$  und  $R_4$ . Im Verhältnis zueinander ist der Widerstand zwischen ihnen die Summe ihrer einzelnen Widerstände (wie zwei Widerstände in Reihe). Wenn beispielsweise die Widerstände von „E“ und  $P_2$  an einem Zweipunktsystem gemessen wurden, wäre ihr Gesamtwiderstand  $R_1 + R_2$ . Betrachtet man das Widerstandsmuster Stern-Dreieck als Ganzes, so wird das Widerstandsmuster durch die Pfeile zwischen „E“ und den Zangen in Abbildung 28 dargestellt. Die Prüfungen ergeben sechs Messungen ( $R_{12}$ ,  $R_{13}$ ,  $R_{14}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{34}$  und  $R_{42}$ ), die dann durch einen mathematischen „Crunch“ von vier Seriengleichungen zur Berechnung des Widerstands der Prüfmasse führen.

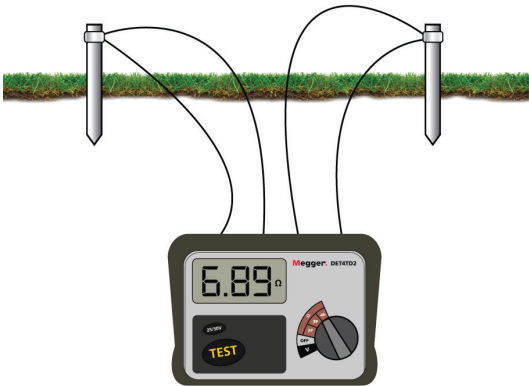


Abb. 28: Durchführung einer Zweipunktmessung

## So prüfen Sie die Erde

Sofern die Abstände zwischen „E“ und den Stromzangen ausreichend sind (damit sich die Widerstandsbereiche nicht überlappen), kann der individuelle Widerstand von „E“ wie folgt bestimmt werden:

$$1] R_1 = 1/3 [(R_{12} + R_{13} + R_{14}) - (R_{23} + R_{34} + R_{42})/2]$$

$$2] R_1 = 1/2 (R_{12} + R_{13} - R_{23})$$

$$3] R_1 = 1/2 (R_{12} + R_{14} - R_{42})$$

$$4] R_1 = 1/2 (R_{13} + R_{14} - R_{34})$$

Wenn das Ergebnis von Gleichung 1 im Wesentlichen mit dem der anderen drei Gleichungen übereinstimmt, dann lagen zufriedenstellende Bedingungen für die Messung vor. Wenn jedoch eine der Zangen so positioniert wurde, dass ihr Widerstandsbereich mit dem von „E“ oder einer anderen der Zangen überlappt ist, wird ein offensichtlich falscher Messwert (vielleicht sogar ein negativer Widerstandswert) erhalten. Ein falscher Messwert weist den Bediener darauf hin, die Prüfung zu wiederholen.

Die Durchführung von Berechnungen für die Werte von R2, R3 und R4 kann zeigen, welche Zange fehlerhaft war. Die Gleichungen für R2, R3 und R4 sind wie folgt:

$$R_2 = 1/2 (R_{12} + R_{23} - R_{13})$$

$$R_2 = 1/2 (R_{12} + R_{42} - R_{14})$$

$$R_2 = 1/2 (R_{23} + R_{42} - R_{34})$$

$$R_3 = 1/2 (R_{13} + R_{23} - R_{12})$$

$$R_3 = 1/2 (R_{13} + R_{34} - R_{14})$$

$$R_3 = 1/2 (R_{23} + R_{34} - R_{42})$$

$$R_4 = 1/2 (R_{14} + R_{42} - R_{12})$$

$$R_4 = 1/2 (R_{14} + R_{34} - R_{13})$$

$$R_4 = 1/2 (R_{42} + R_{34} - R_{23})$$

### **Bestimmung der Berührungs- und der Schrittspannung**

Die Berührungsspannung ist der Begriff für den Spannungsunterschied, den eine Person über ihren Körper hinweg erfährt, wenn sie z. B. auf dem Boden außerhalb des geerdeten Begrenzungszauns eines Umspannwerks steht und den Zaun berührt, während ein Erdungsfehler auftritt.

Zur Bestimmung dieses Wertes wird zunächst ein Erdungsprüfer verwendet, um den Erdwiderstand zu ermitteln. Der Anschluss erfolgt wie in Abb. 30 dargestellt.

Die Klemme „C1“ des Erdungsprüfers ist mit dem Erdungssystem des Umspannwerks verbunden (z. B. bei „E“) und die Klemme „C2“ ist mit einem Stromstab „C“ verbunden (eingerrichtet für Prüfzwecke in einiger Entfernung). Der Anschluss P1 wird an die zu prüfende Struktur angeschlossen (z. B. den Zaun, den die Person berühren könnte), und der Anschluss P2 wird mit einem spannungsführenden Stab P verbunden, der in der Nähe des Prüfpunktes etwa 3 Fuß vom Zaun entfernt in den Boden getrieben wird (d. h. dort, wo die Person stehen könnte).

Der Erdungsmessgerät wird in normaler Weise betrieben und eine Widerstandsmessung durchgeführt. Dies ist der effektive Widerstand zwischen dem Testpunkt am Zaun und dem spannungsführenden Stab aus Sicht des Prüfstroms. Der Maximalwert des Stroms, der bei einem Fehler am Umspannwerk in die Erde fließen würde, muss bekannt sein. Der maximale Fehlerstrom muss aus den Parametern der jeweiligen Nennleistungen des Umspannwerks errechnet werden, da er nicht zwangsläufig geradlinig ist.

Das effektive maximale Berührungspotenzial kann innerhalb eines angemessenen Toleranzbereichs berechnet werden (ca. 20 %, je nachdem, wie genau der Erdwiderstand gemessen wird), indem der Fehlerstrom durch den Erdwiderstand multipliziert wird.

Die Schrittspannung wird auf ähnliche Weise ermittelt. Dies ist der Spannungsunterschied, den eine Person zwischen ihren Füßen erfahren würde, wenn sie über den Boden geht, auf dem ein Fehlerstrom vorhanden ist.

## So prüfen Sie die Erde

Die Anschlüsse C1 und C2 des Erdungsmessgeräts werden wie beschrieben zur Bestimmung des Berührungspotentials angeschlossen. Die Anschlüsse P1 und P2 sind mit zwei zu Testzwecken eingerichteten spannungsführenden Stäben verbunden. Die Stäbe werden an den Positionen A und B, wie in Abb. 29 dargestellt, im Abstand von etwa 3 Fuß (d. h. der ungefähren Länge des Schritts einer durchschnittlichen Person) in den Boden geschlagen. (Hinweis: A befindet sich näher bei E und ist mit dem Anschluss P1 verbunden.)

Das Erdungsmessgerät wird in normaler Weise betrieben und eine Widerstandsmessung durchgeführt. Dies ist der effektive Widerstand zwischen A und B, wie man anhand des Prüfstroms sehen kann. Auch hier muss der maximale Wert des Stroms, der unter den Fehlerbedingungen am Umspannwerk fließen würde, bekannt sein.

Die effektive Schrittspannung kann durch Multiplikation des Fehlerstroms mit dem Erdwiderstand innerhalb einer angemessenen Genauigkeit berechnet werden.

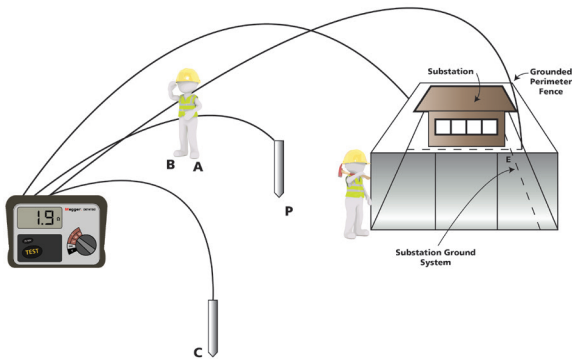


Abb. 29: Methode zur Bestimmung der Berührungs- und der Schrittspannung

## ABSCHNITT III

### Genaue Messung des Erdwiderstands für große Erdungssysteme

Große Erdungssysteme, wie z. B. in Umspannwerken und Kraftwerken, sind ein wichtiger Bestandteil zum Schutz des Stromnetzes. Sie stellen sicher, dass der Fehlerstrom den ordnungsgemäßen Betrieb der Schutzeinrichtungen ermöglicht. Eine Unterstation muss einen geringen Erdwiderstand aufweisen, um zu verhindern, dass übermäßige Spannungen während eines Fehlers entstehen, was die Sicherheit von Personen oder Anlagen gefährden könnte.

Bei der Installation eines Erdungssystems sollte der Widerstand der umgebenden Erde gemessen werden. Ungenaue Widerstandsprüfungen können zu unnötigen Kosten bei der Konstruktion des Systems führen.

Nach der Installation muss sichergestellt werden, dass das elektrische Erdungssystem die Auslegungskriterien erfüllt und in regelmäßigen Abständen durchgemessen werden sollte, um Beeinträchtigungen durch Korrosion oder Veränderungen des Bodenwiderstands zu erkennen. Erdungsnetze werden möglicherweise erst fehlerhaft angezeigt, wenn ein Fehler auftritt und eine gefährliche Situation entsteht.

Um einen ausreichend niedrigen Wert des Erdwiderstands zu erhalten, können Erdungssysteme aus einer Erdmatte bestehen, die einen großen Bereich oder mehrere miteinander verbundene Stäbe abdeckt. Für große Systeme müssen geeignete Prüftechniken eingesetzt werden, um sicherzustellen, dass gültige Werte ermittelt werden. Dies ist anders als bei einem kleinen, einfachen Erdungsstab (z. B. ein Blitzschutzsystem oder eine Wohnfläche), die einfach zu testen sein kann.

### Prüfprobleme bei großen Erdungssystemen

Die Sicherstellung gültiger Messungen beim Prüfen großer Erdungssysteme erfordert, dass geeignete Techniken und Instrumente verwendet werden. Die Art der Erdungssysteme von Umspannwerken und Kraftwerken und die damit verbundenen Bedingungen machen die Prüfung wesentlich komplexer als bei einem einfachen Erdungsstab. Im Folgenden werden die drei wichtigsten Herausforderungen bei der Prüfung der Erdungssysteme von Umspannwerken aufgeführt:

1. Die physikalisch große Fläche eines Umspannwerk-/Kraftwerkserdungssystems führt zu einem großen „Widerstandsbereich“ und damit zu langen Abständen zu den Tastköpfen. Idealerweise sollte die aktuelle Prüfspitze 10 mal so weit wie der maximale Abstand

## So prüfen Sie die Erde

auf dem Erdungssystem platziert werden (z. B. 3000 Fuß für ein  $300 \text{ Fuß}^2$  Erdungsgitter), um den „flachen“ Teil der charakteristischen Widerstandskurve zu finden.

2. Der große Widerstandsbereich liefert in der Regel Erdwiderstandswerte von weniger als  $0,5 \Omega$ . Die Messgerätauflösung ist wichtig, wenn kleine Abweichungen bei den Messungen beobachtet werden müssen. Wenn das Prüfgerät keine geeignete Auflösung bietet, können Gerätefehler die Ergebnisse überfordern.
3. Große Stromnetzwerke enthalten Rauschen, bestehend aus der Frequenz des Energieversorgers und seiner Oberwellen, sowie Hochfrequenzrauschen durch Schalten usw. und induzierte Signale von anderen Quellen. Das Erdungsmessgerät muss ein kleines Testsignal in einer viel größeren Testumgebung abrufen und analysieren. Die meisten Erdungsmessgeräte speisen nur eine einzige Frequenz ein (normalerweise 128 Hz), was in den meisten Situationen ausreicht, da Oberwellen von Standardleitungsfrequenzen vermieden werden. In Umspannwerken ist sie leider oft nicht ausreichend, und diese Art von Störungen kann zu erheblichen Messfehlern führen.

### **Bewältigung von Prüfproblemen bei großen Erdungssystemen**

Im Idealfall würde die Prüfung eines großen Erdungssystems vollständig nach der Spannungsabfallmethode durchgeführt. Leider kann es geschehen, dass die großen Widerstandsbereiche in großen Erdungssystemen dies schwierig oder gar unmöglich machen. Wie bereits erwähnt, kann das Einstellen der Stromprüfsonde das Zehnfache der maximalen Entfernung des Erdungssystems erfordern, was zu Distanzen von mehreren tausend Fuß führt. In diesen Situationen kann die Anstiegsmethode effektiv verwendet werden, da der Benutzer nicht den „flachen“ Teil der Kurve finden oder die elektrische Mitte als Messpunkt kennen muss. Die Messwerte werden bei 20, 40 und 60 % des aktuellen Sondenabstands gemessen und passen in ein mathematisches Modell der Widerstandscharakteristik.

## So prüfen Sie die Erde

Die anderen Herausforderungen beim Prüfen großer Erdungssysteme beziehen sich auf die Funktionen des Prüfgeräts. Durch die verbesserte Technologie ist es gelungen, Instrumente zu entwickeln, die auf Probleme eingehen, die durch die Eigenschaften und Bedingungen in und um große Erdungssysteme herum entstehen.

Damit die Anstiegsmethode aussagekräftige Ergebnisse liefert, ist eine genaue Messung der Schwankungen an verschiedenen Punkten entscheidend. Da große Erdungssysteme in der Regel Widerstandswerte von weniger als  $0,5 \Omega$  aufweisen, können die Unterschiede relativ klein sein. Ein Messgerät mit  $1 \text{ m}\Omega$  Messauflösung kann die kleinen Unterschiede zwischen niedrigen Messwerten anzeigen.

Das Rauschen ist ein großes Problem bei der Prüfung großer Erdungssysteme und muss behoben werden, um genaue Ergebnisse zu erzielen. Um wirksam zu sein, muss das Prüfgerät so konzipiert sein, dass es die Auswirkungen von erheblichen Geräuschen in der Prüfumgebung überwindet. Zu den technischen Möglichkeiten, die helfen können, das Rauschproblem auszugleichen, gehören:

- Eine variable Prüfhäufigkeit (anstelle einer einzelnen, festen Prüfhäufigkeit), was dazu beitragen kann, Streurauschen zu entfernen, das den Messwert beeinträchtigen könnte.
- Ein hoher Spitze-zu-Spitze-Störungsunterdrückungspegel.
- Ein ausgeklügeltes Filtersystem zur Vermeidung von stärkerem Rauschen.
- Verschiedene Stromereinstellungen zur Verbesserung des Signal-Rausch-Abstandes bei Bedarf.

## So prüfen Sie die Erde

### Messung des Widerstands von großen Erd elektrodensystemen: Schnittkurvenmethode<sup>19</sup>

Die Schwierigkeiten bei der Widerstandsmessung großer Elektrodensysteme bestehen darin, dass sehr lange Leitungen zum Anschluss der Spannungs- und Stromzangen verwendet werden müssen. Es wurde ein alternatives Verfahren entwickelt, bei dem solche langen Leitungen nicht erforderlich sind. Das Grundprinzip besteht darin, Erdwiderstandskurven für mehrere Stromelektroden-Abstände zu ermitteln und durch eine Reihe von aufeinanderfolgenden Positionen für die elektrische Mitte des Systems Schnittkurven zu erzeugen, die den Erdwiderstand und die Position der elektrischen Mitte wiedergeben.

Einige recht schwierige Probleme ergeben sich, wenn der Widerstand eines Erdungselektrodensystems gemessen werden soll, das aus einer Reihe von Stäben, Bändern usw. besteht, die alle parallel geschaltet und über eine große Fläche verteilt sind. Die übliche Messmethode, die sehr gut funktioniert, hat einen Nachteil, nämlich, dass es in der Regel erforderlich ist, die Zusatzstromzange in einem erheblichen Abstand vom Erdungselektrodensystem zu platzieren. In einigen Fällen kann dieser Abstand bis zu 3.000 Fuß betragen, und dies ist nicht immer praktisch oder möglich.

Eine Methode, die keine langen Kabel benötigt, wäre offensichtlich besser. Daher wird Folgendes empfohlen.

Angenommen, alle Messungen werden von einem beliebigen Startpunkt O aus durchgeführt, wobei der Abstand C zur Stromzange und der variable Abstand P zum Spannungsmessabgriff von diesem Punkt aus gemessen werden. Dann kann eine Kurve wie abc (Abb. 30) erhalten werden, die den gemessenen Widerstand gegen den Wert von P angibt. Weiterhin angenommen, das elektrische Zentrum des Erdungselektrodensystems befindet sich tatsächlich auf D im Abstand X von O. Dann ist der wahre Abstand von der Mitte zur Stromzange  $C + X$ , und der echte Widerstand ergibt sich, wenn sich der Spannungsmessabgriff in einem Abstand von  $0,618 (C + X)$  von D befindet. Das bedeutet, dass der Wert von P, gemessen von O,  $0,618 (C + X) - X$  beträgt. Wenn X nun eine Reihe von Werten erhält,

---

<sup>19</sup> „Measurement of the Resistance of An Earth-Electrode System Covering a Large Area.“  
Dr. G. Tagg; IEE Proceedings, Band 116, März 1969.



können die entsprechenden Werte von  $P$  berechnet und der Widerstand aus der Kurve abgelesen werden. Diese Widerstände können gegen die Werte von  $X$  in einer anderen Kurve gezeichnet werden. Wenn dieser Vorgang für einen anderen Wert von  $C$  wiederholt und eine weitere Widerstandskurve gegen  $X$  erhalten wird, sollten sich die beiden Kurven bei dem erforderlichen Widerstand kreuzen. Der Prozess kann für einen dritten Wert von  $C$  überprüft werden. Diese Kurven werden als Schnittkurven bezeichnet. Es wurde davon ausgegangen, dass  $D$ ,  $O$  und  $C$  in derselben geraden Linie sind.

### Prüfung an einem großen Umspannwerk

Die Prüfungen wurden an einer Station durchgeführt, die eine Fläche von ca. 300 x 250 Fuß abdeckt. Das Erdungssystem besteht aus einer Reihe von Erdungsplatten und -stäben, die durch Kupferkabel miteinander verbunden sind. Die Prüfstrecke wurde von einem Punkt auf der Fläche etwa auf halbem Weg entlang einer Seite festgelegt und die Stromelektrode in Abständen von 400, 600, 800 und 1.000 Fuß vom Ausgangspunkt platziert. Die entstehenden Erdwiderstandskurven sind in Abb. 31 wiedergegeben. Die Schnittkurven werden ermittelt und der endgültige Wert des Widerstands in Abb. 32 angegeben. Dieser Wert sollte innerhalb von wenigen Prozentpunkten korrekt sein.

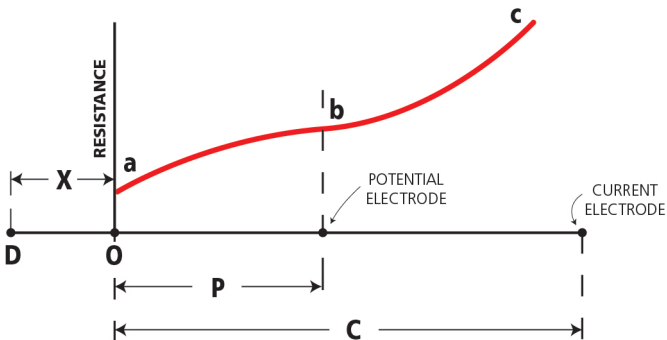


Abb. 30: Erdwiderstandskurve für großflächige Systeme

## So prüfen Sie die Erde

### Allgemeine Anmerkungen

Der Zweck dieser Methode ist es, diesen Abstand zur Stromzange zu verringern, und das scheint erreicht worden zu sein, aber es gibt einige zusätzliche Punkte zu beachten. Aus der Arbeit, die an der Methode geleistet wurde, ergeben sich bestimmte Grenzen für den Abstand zur Stromzange. Wenn das Erdungssystem die Form eines Quadrats hat, darf der Mindestabstand zur Stromzange nicht kleiner als die Seite des Quadrats sein. Andererseits sollte der maximale Abstand nicht zu groß sein. Wenn dies der Fall ist, ist die resultierende Kurve sehr flach, und der Schnittpunkt wird eher ungenau. Bei einem quadratischen System sollte der maximale Abstand die doppelte Seite des Quadrats nicht überschreiten. Für andere Formen von Erdungselektrodensystemen müssen geeignete Mindest- und Höchstwerte für den Abstand zur Stromzange ermittelt werden.



Verwendung eines Megger DET4-Geräts zur Prüfung der Gebäudeerdung

## So prüfen Sie die Erde

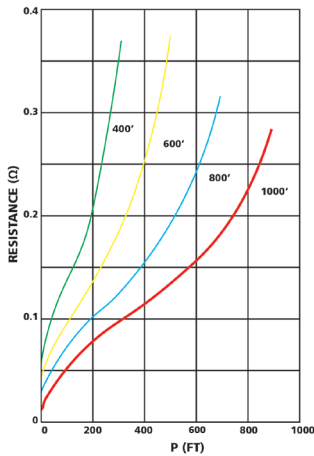


Abb. 31: Erdwiderstandskurven für ein Umspannwerk

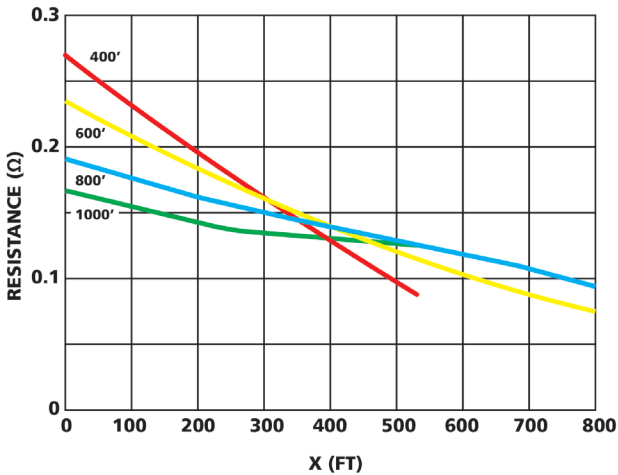


Abb. 32: Schnittkurven für Abb. 31 Die Mitte des Dreiecks, das durch die Überschneidung gebildet wird, zeigt einen Erdwiderstand von 0,146  $\Omega$

## So prüfen Sie die Erde

### Messung des Widerstands von großen Erdelektrodensystemen: Anstiegsmethode<sup>20</sup>

Es hat sich gezeigt, dass der genaue Erdwiderstand eines Elektrodensystems erzielt wird, wenn das temporäre Potential P in einem Abstand von der elektrischen Mitte des Systems in Höhe von 61,8 % des Abstandes von der elektrischen Mitte zur temporären Stromzange positioniert wird. Dieses Prinzip wird bei der Technik der sogenannten „Schnittkurven“ verwendet, die in Anhang II erklärt wird. Es wird deutlich, dass die Methode komplex ist und einige Versuchs- und Fehlerberechnungen erfordert.

Eine weitere Technik wurde entwickelt, die hier beschrieben wird. Sie ist einfacher in der Anwendung und hat nachweislich zufriedenstellende Ergebnisse geliefert, sowohl in theoretischen als auch in praktischen Fällen und, wenn der Boden inhomogen ist. Dabei handelt es sich um die Anstiegsmethode.

Um dieses Verfahren anzuwenden, führen Sie die folgenden Schritte durch.

1. Wählen Sie einen Komfortmessstab E, an den das Erdungsmessgerät angeschlossen werden kann. E ist einer von vielen parallelen Stäben, die das komplexe Erdungssystem bilden.
2. Führen Sie die Stromzange im Abstand ( $D_C$ ) von E ein (der Abstand  $D_C$  ist normalerweise zwei- bis dreimal so groß wie die maximale Abmessung des Systems).
3. Führen Sie Spannungsmessabgriffe in Abständen von 20 % von  $D_C$ , 40 % von  $D_C$  und 60 % von  $D_C$  ein. Siehe Beispiele in Schritt 4.
4. Messen Sie den Erdwiderstand nacheinander mit jedem Spannungsmessabgriff. Nehmen wir an, diese Widerstandswerte seien  $R_1$ ,  $R_2$  bzw.  $R_3$ .

Beispiele:  $R_1 = 0,2 \times D_C$        $R_2 = 0,4 \times D_C$        $R_3 = 0,6 \times D_C$

5. Berechnen Sie den Wert von 
$$\mu = \frac{R_3 - R_2}{R_2 - R_1}$$

Der resultierende Wert wird  $\mu$  genannt und stellt die Änderung des Anstiegs der Widerstands-/Abstandskurve dar.

<sup>20</sup> „Measurement of the Resistance of Large Earth-Electrode Systems by the Slope Method.“  
Dr. G. Tagg; IEE Proceedings, Bd. 117, Nov. 1970.

- Den entsprechenden Wert von  $D_P/D_C$  für  $\mu$  finden Sie in Tabelle VII.
- Da  $D_C$  (Abstand zur Stromzange) bereits bekannt ist, berechnen Sie ein neues  $D_P$  (Abstand des Spannungsmessabgriffs), und führen Sie den Spannungsmessabgriff in diesem neuen Abstand von E ein.

$$D_P = D_P/D_C \times D_C$$

Messen Sie nun den Erdwiderstand, indem Sie den Spannungsmessabgriff in diesem neuen Abstand  $D_P$  setzen. Diese Messung wird als „echter“ Widerstand bezeichnet.

- Wiederholen Sie den gesamten Prozess für einen größeren Wert von  $D_C$ . Wenn der „echte“ Widerstand bei Erhöhung von  $D_C$  deutlich abnimmt, ist es notwendig, den Abstand von  $D_C$  noch weiter zu vergrößern. Nach einer Reihe von Prüfungen und der Darstellung des „echten“ Widerstands wird die Kurve weniger abnehmen und stabilere Messwerte anzeigen. An diesem Punkt wird der Widerstand des Erdungssystems notiert.

ANMERKUNG: Wie bei anderen Erdungsprüfungen kann es auch hier notwendig sein, einige Experimente durchzuführen, um festzustellen, ob das praktische Ergebnis so genau ist, wie es die Theorie vermuten lässt.

Die Anstiegsmethode wurde entwickelt, um die Notwendigkeit von unpraktischen langen Leiterbahnen zu eliminieren, da die Möglichkeit besteht, den korrekten Abstand entlang der kombinierten Widerstandskurve zu interpolieren, d. h. der Kurve des Widerstands der Stromzange, die dem des geprüften Gitters überlagert ist, und zwar ohne ausreichenden Abstand, um den charakteristischen „flachen Abschnitt“ dazwischen zu erzeugen.

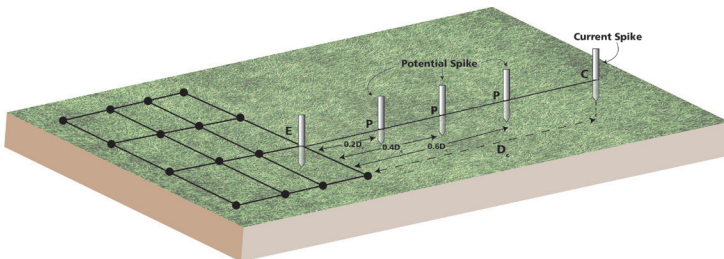


Abb. 33: Positionen für den Spannungsmessabgriff bei der Anstiegsmethode

## So prüfen Sie die Erde

Eine besondere Beobachtung bei der Anstiegsmethode ist, dass, wenn die Berechnung von  $\mu$  größer ist als in der Tabelle angegeben, der Abstand  $C$  erhöht werden muss.

Zweitens, bevor die Messwerte für R1, R2 und R3 mit einem gewissen Grad an Sicherheit akzeptiert werden können, ist es empfehlenswert, eine Kurve zu zeichnen, die alle lokalisierten Effekte identifiziert und untypische Messwerte aus den Berechnungen eliminiert. Drittens wird auch vorgeschlagen, die Prüfung in verschiedenen Richtungen und mit unterschiedlichen Abständen zu wiederholen. Die verschiedenen Ergebnisse sollten ein angemessenes Maß an Übereinstimmung aufweisen.

Table VII: Values of  $D_P/D_C$  for Various Values of  $\mu$

$\mu$	$D_P/D_C$	$\mu$	$D_P/D_C$	$\mu$	$D_P/D_C$
0.40	0.643	0.80	0.580	1.20	0.494
0.41	0.642	0.81	0.579	1.21	0.491
0.42	0.640	0.82	0.577	1.22	0.488
0.43	0.639	0.83	0.575	1.23	0.486
0.44	0.637	0.84	0.573	1.24	0.483
0.45	0.636	0.85	0.571	1.25	0.480
0.46	0.635	0.86	0.569	1.26	0.477
0.47	0.633	0.87	0.567	1.27	0.474
0.48	0.632	0.88	0.566	1.28	0.471
0.49	0.630	0.89	0.564	1.29	0.468
0.50	0.629	0.90	0.562	1.30	0.465
0.51	0.627	0.91	0.560	1.31	0.462
0.52	0.626	0.92	0.558	1.32	0.458
0.53	0.624	0.93	0.556	1.33	0.455
0.54	0.623	0.94	0.554	1.34	0.452
0.55	0.621	0.95	0.552	1.35	0.448
0.56	0.620	0.96	0.550	1.36	0.445
0.57	0.618	0.97	0.548	1.37	0.441
0.58	0.617	0.98	0.546	1.38	0.438
0.59	0.615	0.99	0.544	1.39	0.434
0.60	0.614	1.00	0.542	1.40	0.431
0.61	0.612	1.01	0.539	1.41	0.427
0.62	0.610	1.02	0.537	1.42	0.423
0.63	0.609	1.03	0.535	1.43	0.418
0.64	0.607	1.04	0.533	1.44	0.414
0.65	0.606	1.05	0.531	1.45	0.410
0.66	0.604	1.06	0.528	1.46	0.406
0.67	0.602	1.07	0.526	1.47	0.401
0.68	0.601	1.08	0.524	1.48	0.397
0.69	0.599	1.09	0.522	1.49	0.393
0.70	0.597	1.10	0.519	1.50	0.389
0.71	0.596	1.11	0.517	1.51	0.384
0.72	0.594	1.12	0.514	1.52	0.379
0.73	0.592	1.13	0.512	1.53	0.374
0.74	0.591	1.14	0.509	1.54	0.369
0.75	0.589	1.15	0.507	1.55	0.364
0.76	0.587	1.16	0.504	1.56	0.358
0.77	0.585	1.17	0.502	1.57	0.352
0.78	0.584	1.18	0.499	1.58	0.347
0.79	0.582	1.19	0.497	1.59	0.341

## Vierleitermethode

Die Vierleitermethode ist eine weitere Methode, die auf dem Spannungsabfall basiert und es dem Benutzer ermöglicht, die Probleme komplexer Erdungssysteme zu überwinden, bei denen das elektrische Zentrum des Erdungssystems schwer zu lokalisieren ist. Diese Methode wurde von Dr. G. F. Tagg in einem IEE-Dokument aus dem Jahr 1964 vorgestellt [6]. Für die Zwecke dieser Broschüre werden wir das Prüfverfahren und die Formeln behandeln, mit denen der Widerstand des Erdungssystems bestimmt werden kann. Die Theorie hinter der Methode wird nicht behandelt, obwohl sie die Widerstandswerte, die durch Messungen an sechs verschiedenen Positionen für den Spannungsmessabgriff in vier Formeln erhalten wurden, mit dem wahren Widerstand ( $R_{\infty}$ ) verknüpft, der mit einem unendlichen Abstand zur Stromzange auftreten würde.

Die Prüfzangen werden in Abbildung 34 dargestellt, wobei die Messung am Rand des elektrischen Systems erfolgt. Die Stromzange ist in einem geeigneten Abstand vom Rand des Erdungssystems angeordnet. Der Spannungsmessabgriff wird dann in Abständen von 20, 40, 50, 60, 70 und 80 % des Abstands zur Stromzange platziert, und an jedem Standort wird ein Test durchgeführt. Die ermittelten Widerstandswerte ( $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$  und  $R_6$ ) werden dann in vier Formeln eingegeben.

Folgende Formeln werden verwendet:

$$1] (R_{\infty}) = -0,1187R_1 - 0,4667R_2 + 1,9816R_4 - 0,3961R_6$$

$$2] (R_{\infty}) = -2,6108R_2 + 4,0508R_3 - 0,1626R_4 - 0,2774R_6$$

$$3] (R_{\infty}) = -1,8871R_2 + 1,1148R_3 + 3,6837R_4 - 1,9114R_5$$

$$4] (R_{\infty}) = -6,5225R_3 + 13,6816 R_4 - 6,8803R_5 + 0,7210R_6$$

Die vier Ergebnisse für  $R_{\infty}$  sollten deutlich übereinstimmen, und es kann ein Mittelwert der Ergebnisse berechnet werden. Aufgrund der in der Theorie

## So prüfen Sie die Erde

dieser Methode getroffenen Annahmen ist es jedoch möglich, dass das Ergebnis der Gleichung (1) weniger genau ist als die anderen. Wenn das Ergebnis von (1) von den anderen Ergebnissen abweicht, kann es ignoriert und der Durchschnitt aus den anderen drei Ergebnissen berechnet werden.

Ein großer Nachteil dieses Verfahrens ist, dass es einen großen Abstand für  $d_c$  erfordert. Dieser Abstand kann bis zu 2.000 Fuß oder mehr für Erdungssysteme mit großem Bereich oder sehr geringem Widerstand erreichen.

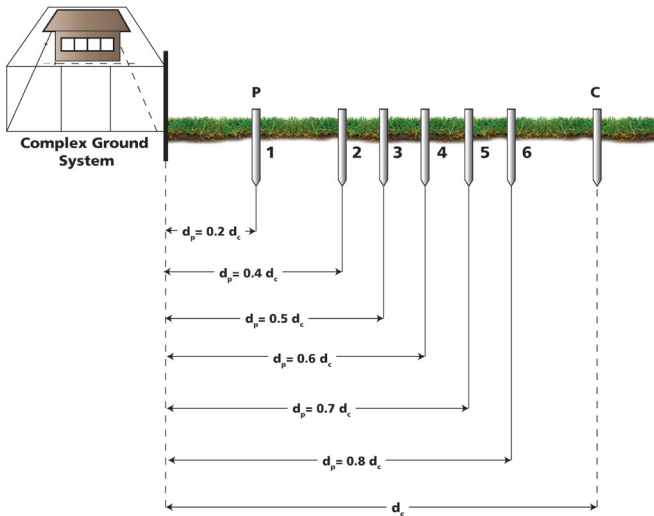


Abb. 34: Prüfaufbau für die Vierleitermethode



## So prüfen Sie die Erde

## So prüfen Sie die Erde

### ANHANG I Nomogramm-Richtlinie für das Erreichen eines annehmbaren Erdwiderstands<sup>21</sup>

Dr. L.E. Whitehead von den DuPage Laboratories entwickelte ein Nomogramm (Abb. 35), das eine nützliche Orientierungshilfe bei der Einhaltung des etablierten Standards für einen minimalen Erdwiderstand sein kann. Wenn Sie über ein bestimmtes Erdungselektrodensystem verfügen und feststellen, dass der Messwert des Megger Geräts zu hoch ist, kann das Diagramm verwendet werden, um zu zeigen, was Sie tun müssen, um den Wert zu senken. Bitte beachten Sie, dass es drei variable Bedingungen abdeckt, die sich auf den Erdwiderstand der Elektrode auswirken: Erdwiderstand sowie Länge und Durchmesser des Stabs.

Um die Verwendung des Nomogramms zu veranschaulichen, betrachten wir ein Beispiel. Nehmen wir an, dass Sie einen Stab mit 5/8 Zoll 10 Fuß in den Boden getrieben haben. Ihr Megger Prüfgerät zeigt einen Erdwiderstand von  $6,6 \Omega$  an. Ihre Vorgabe für diesen Widerstand ist aber „Nicht über  $4 \Omega$ “. Um dies zu erreichen, können Sie eine oder mehrere der drei Variablen ändern – die einfachste und effektivste ist die Tiefe des eingetriebenen Stabs. Zur Ermittlung der erforderlichen Tiefe für einen  $4\text{-}\Omega$ -Erdwiderstand gehen Sie wie folgt vor: Zeichnen Sie mit einem Lineal eine Linie vom 10-Fuß-Punkt in der L-Linie zum 5/8-Zoll-Punkt in der d-Linie. Dies ergibt einen Bezugspunkt, an dem die Linie die q-Linie kreuzt. Verbinden Sie diesen Referenzpunkt mit  $6,6 \Omega$ , dem gemessenen Widerstand auf der R-Linie, wie in Abb. 35 dargestellt, und lesen Sie den Wert des Erdwiderstands ab, wenn diese Linie die p-Linie quert. Der Wert beträgt  $2.000 \text{ Ohm-cm}$ .

Um die erforderliche Stabtiefe für einen  $4\text{-}\Omega$ -Erdwiderstand zu bestimmen, ziehen Sie eine Linie von diesem Punkt an der R-Linie durch den  $2.000$ er Punkt auf der p-Linie, bis Sie die q-Linie kreuzen. Die gestrichelte Linie in Abb. 35 zeigt diesen Schritt. Wenn Sie nun den Durchmesser des Stabs unverändert lassen, verbinden Sie den 5/8-Punkt auf der d-Linie durch den neuen Referenzpunkt auf q und verlängern Sie die Linie bis L. Dadurch erhalten Sie die erforderliche Stabtiefe für den  $4\text{-}\Omega$ -Widerstandswert. Abschließend nehmen Sie ein anderes Messgerät zur Überprüfung des Wertes, da der Erdwiderstand möglicherweise nicht konstant ist (wie im Nomogramm angenommen).

---

<sup>21</sup> „Nomograph Determines Ground-Rod Resistance“, L.E. Whitehead, Electric Light & Power, Dezember 1962.

## So prüfen Sie die Erde

Eine andere Möglichkeit zur Reduktion des Erdwiderstands wäre eine Verringerung des spezifischen Erdwiderstands. Bitte beachten Sie in Abb. 35, dass Sie, wenn Sie eine Linie von einem Referenzpunkt 1 ziehen (bei unveränderter Tiefe und unverändertem Durchmesser des Stabs), den Erdwiderstand auf etwa 1.000 Ohm-cm reduzieren müssten, um den erforderlichen Erdwiderstand von  $4 \Omega$  zu erhalten. Dies könnte durch die chemische Behandlung, wie zuvor beschrieben, durchgeführt werden, aber normalerweise ist der tiefere Stab einfacher.

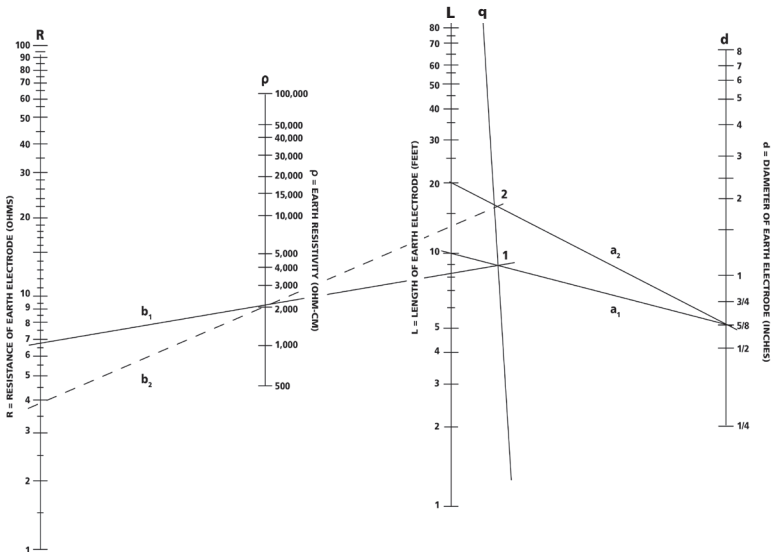


Abb. 35: Nomogramm der grundlegenden Einflussfaktoren des Erdwiderstands

# So prüfen Sie die Erde

## ANHANG II Diagramm zu Erdungsprüfungsmethoden

*Methode	Beste Anwendungen
1. Spannungsabfall	Kleine Elektrodensysteme (1 oder 2 Stäbe/Platten); komplexe Systeme, wenn die volle Widerstandskurve gezeichnet wird
2. Vereinfachter Spannungsabfall	Kleine und mittlere Elektrodensysteme
3. 61,8 %-Regel	Kleine und mittlere Elektrodensysteme
4. Anstieg	Große Erdungssysteme wie Umspannwerke
5. Überschneidende Kurven	Große Erdungssysteme wie Umspannwerke
6. Dead Earth (Zwei Punkte)	Nicht empfohlen
7. Stern-Dreieck	Erdungssysteme in Ballungsgebieten oder felsigem Gelände, wo die Sondenpositionierung schwierig ist
8. Vierleiter	Mittlere bis große Erdungssysteme
9. Clamp-on	Einfache Erdungssysteme mit bestehender Rückleitung über mehrere Erdungen

*\*Die ART-Methode basiert auf dem Spannungsabfall*

## So prüfen Sie die Erde

Vorteile	Einschränkungen
Extrem zuverlässig; entspricht IEEE 81; der Bediener hat die vollständige Kontrolle über die Prüfeinrichtung	Erfordert bei mittleren und großen Systemen große Distanzen (und lange Messleitungen) an den Prüfsonden; zeitraubend und arbeitsintensiv
Leichtere Ausführung als Spannungsabfall; viel schneller	Ineffektiv, wenn das elektrische Zentrum unbekannt ist; weniger genau als der volle Spannungsabfall, da weniger Messungen vorgenommen werden
Einfachste Durchführung; wenig Berechnungsaufwand; geringste Anzahl von Prüfsonden	Geht von den idealen Bedingungen aus; ineffektiv, wenn das elektrische Zentrum unbekannt ist; der Boden muss homogen sein; weniger genau
Kenntnis des elektrischen Zentrums nicht notwendig; große Abstände zu Prüfsonden nicht notwendig	Anfällig für inhomogene Böden; weniger genau; erfordert mathematische Berechnungen
Kenntnis des elektrischen Zentrums nicht notwendig; große Abstände zu Prüfsonden nicht notwendig	Zahlreiche Berechnungen und Zeichnen von Kurven
Schnell und einfach durchzuführen	Probleme mit möglicher Widerstandsüberlappung; nichtmetallischer Rücklauf (hoher Widerstand)
Keine großen Distanzen zur Positionierung der Prüfsonden erforderlich	Widerstandsbereiche dürfen sich nicht überschneiden; eine Reihe von Berechnungen erforderlich
Kenntnis des elektrischen Zentrums nicht notwendig	Große Distanzen zwischen den Prüfsonden und eine Reihe von Berechnungen erforderlich
Schnell, einfach; beinhaltet Verbindung und Gesamtwiderstand der Verbindung	Wirksam nur in Situationen mit mehreren parallelen Erdungen; störungsempfindlich; begrenzte normierte Grundlage; kein integrierter Nachweis

# So prüfen Sie die Erde

## ERDUNGSMESSGERÄTE VON MEGGER®

### DET2/3

Das Modell DET2/3 ist ein modernes, robustes und kompaktes Messgerät für den Erdwiderstand, mit dem Sie den Widerstand von Erdungselektroden und den spezifischen Erdwiderstand feststellen können. Das DET2/3 ist ein Messgerät für den Einsatz in großen oder komplexeren Erdungssystemen, zu denen Kraftwerke, Umspannwerke, Eisenbahnen, Kommunikationssysteme und schwierige Prüfumgebungen gehören.



Mit seinem starken prozessorgesteuerten System bietet es eine flexible und benutzerfreundliche Methode für Erdungsprüfungen, indem es ausgezeichnete Fehlererkennungsfunktionen und vollständige Prüfinformationen bereitstellt, die auf einem großen Farbbildschirm angezeigt werden. Das DET2/3 kann zudem eine Live-Messkurve auf dem Bildschirm anzeigen, die grafisch die Stärke der Veränderungen und/oder Störungen des zu prüfenden Systems anzeigt, und stellt somit ein leistungsstarkes Diagnosewerkzeug für alle dar, die Erdungsprüfungen durchführen.

### DET14C und DET24C

Die DET14C und DET24C sind fortschrittliche Clamp-on-Erdwiderstandsmessgeräte, die neue Standards in Bezug auf Zugang, Leistung, Merkmale, Einfachheit der Bedienung und Sicherheit setzen. Sie sind mit flachen Zangenbacken versehen und verhindern Schmutzablagerungen, wodurch die Messintegrität und Zuverlässigkeit gegenüber Produkten mit ineinandergreifenden Zähnen erhöht wird. Weitere Verbesserungen betreffen die Sicherheit gemäß CAT IV (600 V), eine integrierte Filterfunktion für elektrisch verrauschte Umgebungen, die Speicherung von Prüfergebnissen mit Zeit- und Datumsstempel und eine extrem lange Akkulaufzeit. Auf dem DET24C können gespeicherte Testergebnisse über Bluetooth auf den PC übertragen werden.



### DET3TD und DET3TC

Die Geräte DET3TD und DET3TC sind dreipolige digitale Modelle zur Messung des Erdwiderstands von  $0,01$  bis  $2000 \Omega$  bei Erdungsspannungen von bis zu  $100 \text{ V}$ . Die Geräte werden komplett mit Transportkoffer, Prüfleitungen und Prüfsonden geliefert.

Das DET3TC verfügt über die Möglichkeit des ART-Einsatzes. Diese Zusatzfunktion ermöglicht eine separate Prüfung von Erdungen vor Ort, ohne den Versorgungsanschluss trennen zu müssen. Mit der optionalen ICLAMP kann ein Erdungsstrom von  $0,5 \text{ mA}$  bis  $19,9 \text{ A}$  und ein Ableitstrom bis zu  $0,5 \text{ mA}$  gemessen werden.



### DET4T2-Serie

Die DET4T2-Serie besteht aus Digitalgeräten mit vier Anschlüssen und umfasst **vier Modelle** mit unterschiedlichen Ausrüstungssätzen. Die Modelle **DET4TD2** und **DET4TR2** dienen zum Messen eines Erdwiderstands von  $0,01 \Omega$  bis  $20 \text{ k}\Omega$  und einer Erdungsspannung von bis zu  $100 \text{ V}$ . Die Modelle **DET4TC2** und **DET4TCR2** können Erdwiderstände von  $0,01 \Omega$  bis  $200 \text{ k}\Omega$  messen, eine Schlüsselfunktion für die Erdwiderstandsprüfung. DET4TC2 und DET4TCR2 verfügen außerdem über die Möglichkeit der Strommessung für ART.

Die Modelle DET4TD2 und DET4TC2 werden von acht AA-Batterien versorgt, während DET4TR2 und DET4TCR2 über wiederaufladbare AA-Zellen verfügen.

Die Geräte werden komplett mit einem robusten Tragekoffer, Prüfleitungen, Stäben und Kalibrierungszertifikat geliefert.

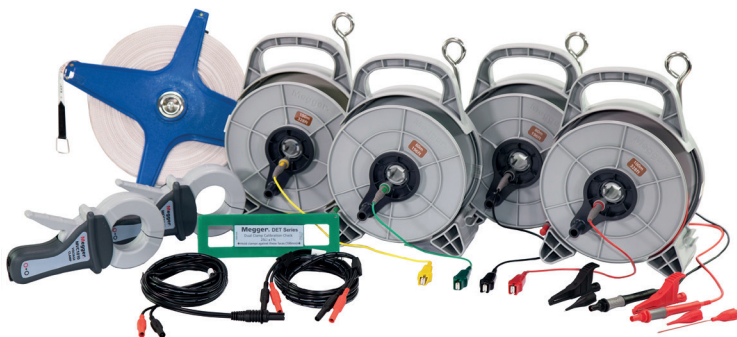


## So prüfen Sie die Erde

### VON MEGGER® ERHÄLTliches ZUBEHÖR FÜR DIE BODENPRÜFUNG

#### ETK (Erdungsmessgeräte-Prüfkit)

Die Erdungsmessgeräte-Prüfkits (ETK-Modelle) von Megger sind auf optimale Praxistauglichkeit ausgelegt. Die Prüfkits sind ordentlich und gut geschützt in einer Tragetasche untergebracht und leicht zu transportieren. Im Einsatz werden die Messleitungen auf Rollen mit leichtgängigem Lauf montiert und gehalten. Sie brauchen lediglich die Messleitung vom Gerät zum Messpunkt herauszuführen, das Ende direkt an der Spitze anzuklemmen und die Prüfung durchzuführen. Wenn der Test abgeschlossen ist, lösen Sie die Messleitungen und wickeln Sie sie ein. Die Kits sind in verschiedenen Kombinationen erhältlich, um unterschiedlichen Bedürfnissen und Einschränkungen gerecht zu werden. Sie werden mit einem Maßband geliefert, um eine genaue Platzierung der Prüfspieße zu gewährleisten. Die Rollen können miteinander verkettet werden, um größere Längen in handlichen Abschnitten zu erhalten.





## Literaturverzeichnis

- [1] „A Method of Measuring Earth Resistivity“, F. Wenner, Bericht Nr. 258, Bulletin of Bureau of Standards, Bd. 12, Nr. 3, 11. Okt. 1915.
- [2] „An Experience With the Megger“, W.H. Simpson, Oil and Gas Journal.
- [3] „Grounding Electric Circuits Effectively“, J.R. Eaton, General Electric Review, Juni, Juli, August 1941.
- [4] „Calculation of Resistance to Ground“, H.B. Dwight, AIEE (IEEE) Transactions, Band 55, 1936.
- [5] „Ground Connections for Electrical Systems“, O.S. Peters, U.S. National Bureau of Standards, Technological Paper 108, 10. Juni 1918 (224 Seiten, vergriffen).
- [6] Veröffentlichung 4619S aus den Proceedings des IEE-Bandes III Nr. 12, Dezember 1964 von Dr. G.F. Tagg

# So prüfen Sie die Erde

## Zusätzliche Ressourcen

1. Earth Conduction Effects in Transmission System, E.D. Sunde, D. Van Nostrand Co.
2. Principles and Practices in Grounding, Pub. Nr. D9, Edison Electric Institute.
3. Guide for Safety in AC Substation Grounding, AIEE (IEEE) Nr. 80.
4. Recommended Guide for Measuring Ground Resistance and Potential Gradients in the Earth. AIEE (IEEE) Nr. 81.
5. Master Test Code for Resistance Measurement, AIEE (IEEE) Nr. 550.
6. Einige der grundlegenden Aspekte der Erdwiderstandsmessung, E.B. Curdts, AIEE (IEEE) Paper Nr. 58–106, Transactions, Band 77, 1958.
7. Equipment Grounding, Industrial Power System Data Book, General Electric Co.
8. Lightning Arrester Grounds, H.M. Towne, General Electric Review, Teile I, II, III, Band 35, S. 173, 215, 280, März, April, Mai 1932.
9. Grounding Principles and Practices – Fundamental Considerations on Ground Currents, R. Rudenberg AIEE (IEEE), Elect. Motor, Januar 1946, auch AIEE (IEEE) Publication S2.
10. Grounding Principles and Practices – Establishing Grounds, C.H. Jensen, AIEE (IEEE), Elect. Eng., Februar 1945, auch AIEE (IEEE) Publications S2.
11. Deep Driven Grounds, C.H. Jensen, EEI, T&D Committee, Mai 1951.
12. Grounding Principles and Practices – Static Electricity in Industry, Beach, AIEE (IEEE) Publication S2.
13. Corrosion of Buried Metals and Cathodic Protection, M.C. Miller, Petroleum Engineer, März, April, Mai, Juni 1944.

## So prüfen Sie die Erde



Megger  
2621 Van Buren Ave  
Norristown, PA 19403

[us.megger.com](http://us.megger.com)

GDTE2020

Das Wort „Megger“ ist eine eingetragene  
Marke. Copyright © 2018

**Megger**<sup>®</sup>