

Erdungsmessungen

Die außergewöhnliche Ausweitung des Einsatzes von Elektrizität in allen Lebensbereichen, zu Hause und im Beruf, und die immer engmaschiger werdenden Versorgungsnetze erfordern genaue Vorschriften für den Bau elektrischer Anlagen und deren Erdung. Zahlreiche nationale und internationale Normen regeln die Auflagen beim Bau elektrischer Anlagen, um die Sicherheit von Menschen, von Haustieren, von Nutztieren und von Sachwerten bei Benutzung elektrischer Anlagen zu gewährleisten.



Trotz alledem, die beim Bau vorgesehenen Sicherheitseinrichtungen müssen regelmäßig kontrolliert werden, um ihre Wirksamkeit auch im Laufe der Jahre sicher zu stellen.

Sicherheitsmängel an elektrischen Anlagen können weitreichende Folgen haben:

- ernste Gefährdung von Menschenleben
- schwerwiegende Schäden an Sachwerten oder an der elektrischen Anlage selbst.

Je nach Höhe der elektrischen Spannung, der eine Person (oder ein Tier) ausgesetzt ist, können die Auswirkungen von leichten über schwere Verletzungen bis zum Tod führen.

Für Menschen hat eine Arbeitsgruppe von Medizinern und Sicherheitsexperten die folgenden oberen Grenzwerte für eine dauerhaft ungefährliche Berührungsspannung festgelegt: 50 V_{AC} in trockenen Räumen, 25 V_{AC} in feuchten Räumen und 12 V_{AC} für wassergefüllte Räume.

Herstellung einer Erdung

Wozu braucht man eine Erdung?

Als erste Sicherheitsmaßnahme schreibt der Gesetzgeber vor, dass elektrische Anlagen mit einer Erdung versehen sein müssen. Durch sie lassen sich gefährliche Anhebungen des Massepotentials vermeiden und falls der Berührung zugängliche Masseflächen aus Metall oder leitfähigem Material durch Fehler unter Spannung stehen, kann diese zur Erde abfließen. Wenn eine solche Fehlerspannung irgendwo entsteht, fließt ein Fehlerstrom ("FI") zur Erde ab, der von Schutzeinrichtungen erkannt wird (z.B. einem Fehlerstrom- oder FI-Schutzschalter) und die Abschaltung der Stromquelle auslöst. Insofern sind also Erdungen stets mit einer solchen Abschaltvorrichtung zu verbinden, da sie sonst den Fehler nur "verdecken" und keinen wirklichen Schutz darstellen.

Wie groß darf der Erdungswiderstand sein?

In einer normgerechten und für Menschen "sicheren" Anlage müssen die Schutzeinrichtungen auslösen, sobald die Fehlerspannung in der Anlage einen Wert erreicht, der für den Menschen gefährlich werden kann. Nach den obigen Untersuchungen wollen wir daher einen Grenzwert von

$$U_{\text{Grenz}} = 25 \text{ V}_{\text{AC}} \text{ annehmen.}$$

Die in Wohneinheiten eingebauten Fehlerstrom-Schutzschalter lösen im Allgemeinen erst bei einem Fehlerstrom von 500 mA zur Erde aus. Daher gilt nach dem ohm'schen Gesetz mit

$$U = R \cdot I$$

$$R = 25 \text{ V} / 0,5 \text{ A} = 50 \Omega$$

Um die Sicherheit von Personen und Sachwerten ordnungsgemäß zu schützen, muss die Erdung also einen Widerstand von weniger als 50 Ohm aufweisen, oder $R_{\text{Erde}} < 50 \Omega$

Herstellung der Erdung

Eine gute Erdung, d.h. eine Erdung mit weniger als 50 Ω Widerstand, hängt

vor allem von drei Faktoren ab:

- Art des Erders
- Art und Widerstand des Erdreichs (spez. Erdwiderstand)
- Widerstand der Erdleitung

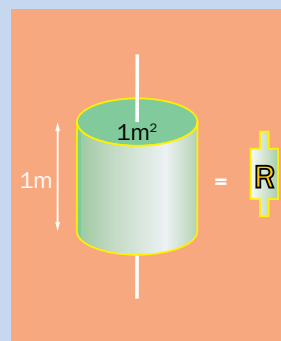
Art des Erders

Nach den einschlägigen Normen können als Erder in Frage kommen:

- senkrecht eingesteckte Metall-Pfähle oder -Rohre
- waagrecht eingelegte Metall-Bänder oder -Drähte
- eingegrabene Metallplatten
- um die Fundamentierung gelegte Metallringe
- im Boden eingelassene Beton-Armierungen
- im Boden verlegte Wasserrohre (mit Genehmigung des Wasserwerkes)
- usw...

Der mit einem Erder erzielte Widerstand gegen Erde hängt von seiner Form ab und von seinem Kontakt mit dem Erdreich, und letztlich natürlich vom spezifischen Erdwiderstand.

Spezifischer Erdwiderstand



Der spezifische Erdwiderstand ρ (griechischer Buchstabe Rho) wird in Ohmmeter Ωm ausgedrückt.

Er entspricht dem theoretischen Widerstand eines Erd-Zylinders mit 1 m² Querschnitt und 1 m Höhe.

Der spez. Erdwiderstand ist je nach Bodenbeschaffenheit stark unterschiedlich und hängt weiterhin sehr stark von der Feuchtigkeit und der Temperatur ab (bei Frost oder bei Trockenheit wird er höher).

Beispiele:

Bodenart	Widerstand in Ωm
Moore, Sümpfe	von 1 bis 30
Lößböden	20 bis 100
Humus	10 bis 150
Jura-Mergel	30 bis 40
Toniger Sand	50 bis 500
Quarz-Sand	200 bis 3000
Weiches Kalkgestein	1500 bis 3000
Rissiges Kalkgestein	300 bis 500
Steinige, grasbewachsene Erde	100 bis 300
Steinige Erde, nackt	500 bis 1000
Glimmerschiefer	800
Granit, Sandstein im Zerfallszustand	1500 bis 10.000
Granit, Sandstein, sehr zerfallen	100 bis 600

Wozu den Erdwiderstand messen?

- um nach Möglichkeit Einbauort und Form des Erders bzw. des Erdungsnetzes vor dem Einbau optimal zu wählen
- um die elektrischen Eigenschaften der Erdung vorher zu kennen
- um die Einbaukosten für Erder bzw. Erdungsnetze zu optimieren.

Wann sollte man den Erdwiderstand messen?

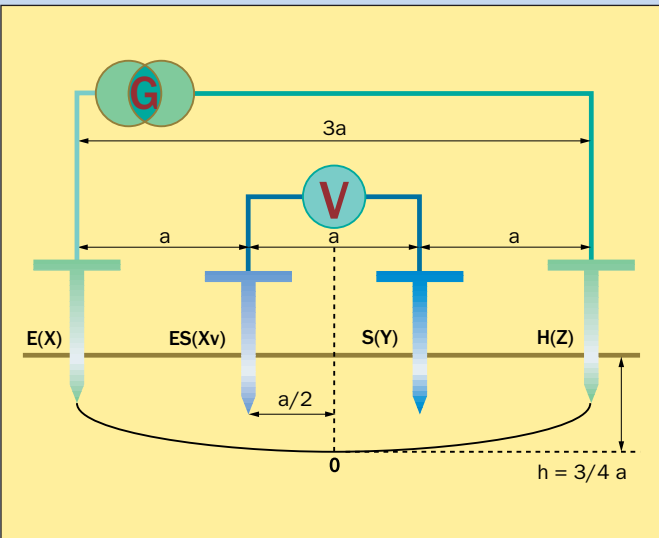
- bei Bebauung eines Grundstücks
- bei größeren Bauvorhaben und in jedem Fall bei Verteilerstationen, wo die richtige Platzierung des Erders von großer Bedeutung sein kann.

Zur Messung des Erdwiderstands sind mehrere Verfahren bekannt. Das am meisten benutzte und das zuverlässigste Verfahren ist die 4-Punkt-Messung, das auch als Wenner-Verfahren bekannt ist.

Messprinzip

Man sticht auf einer geraden Linie im jeweils gleichen Abstand a vier Elektroden (Stäbe) in den Boden. Zwischen den beiden End-Elektroden E und H speist man mit einer Stromquelle G einen Messstrom I ein und zwischen den beiden mittleren Elektroden ES und S misst man nun mit einem Voltmeter den Spannungsabfall ΔV .

Hinweis: die in der Zeichnung in Klammer eingetragenen Bezeichnungen X, Xv, Y und Z entsprechen den früher teilweise benutzten Elektroden-Bezeichnungen E, ES, S und H.



Dieses Messverfahren wird heute von jedem Erdungsmessgerät verwendet: es speist den Messstrom I ein und misst den Spannungsabfall ΔV . Daraus errechnet sich der Widerstand R zwischen den Elektroden ES und S mit dem man nach der vereinfachten Formel $\rho = 2 \pi a R$ den spezifischen Erdwiderstand ermitteln kann. Dabei ist:

ρ : spezifischer Erdwiderstand in Ωm an der Stelle 0 mitten zwischen den beiden Elektroden ES und S und in einer Tiefe $h = 3a/4$

a : Elektrodenabstand in m

R : Am Ohmmeter abgelesener Wert in Ω

Die Energieversorgungsunternehmen schlagen für a einen Wert von mindestens 4 m vor.

Messung des Widerstands an einer vorhandenen Erdung

Oft möchte man nachträglich den Erdungswiderstand eines vorhandenen Erdungssystems messen, um zu prüfen, dass es die Sicherheitsnormen erfüllt, d.h. wie oben ausgeführt, soll $R_{Erde} < 50 \Omega$ sein.

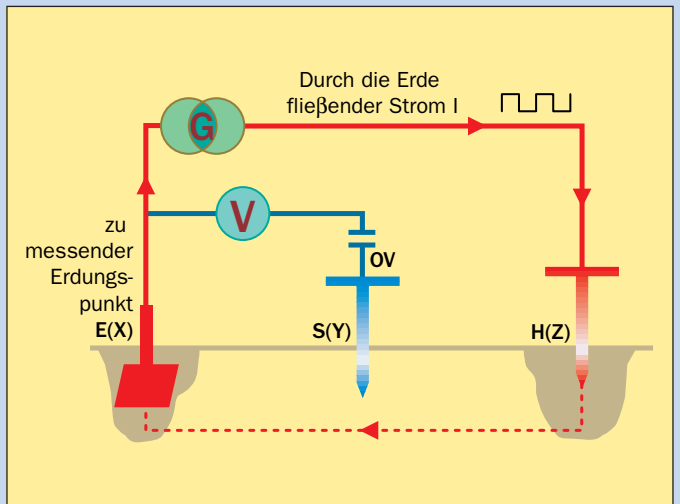
Je nach Aufbau des Erdungssystems kann man dazu verschiedene Verfahren benutzen.

Welches Verfahren soll man benutzen?

Aufbau des E-Systems	Gebäude freistehend mit der Möglichkeit Pfähle zu stecken	Gebäude in der Stadt ohne Möglichkeit Pfähle zu stecken	Mehrfache parallele Erdungsnetze
62%-Verfahren	■		
Dreieck-Verfahren	■		
Abgewandeltes 62%-Verfahren	■	■	■
Schleifenmessung Phase-PE	■	■	
Erdungsprüfzange			■

Prinzip einer Erdungsmessung

E ist der zu messende Erdungspunkt.

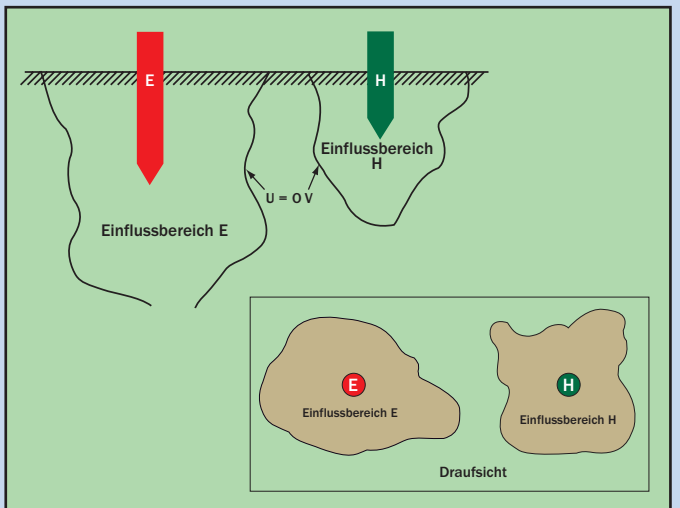


Mit einer geeigneten Stromquelle G speist man einen konstanten Wechselstrom I über den Hilfserder H ein, den sog. Einspeisepunkt, der dann über den vorhandenen Erder E zu G zurückfließt.

Nun misst man den Spannungsabfall V zwischen dem Erder E und einem Punkt im Gelände zwischen E und H, der als "Nullpotenzial-Punkt" gilt, und an dem man die Elektrode S (bzw. Y) einsteckt (siehe unten). Aus der gemessenen Spannung V und dem eingespeisten Strom I errechnet sich der Erdungswiderstand nach der einfachen Formel: $R_{Erde} = V_{ES} / I_{EH}$

Wichtiger Hinweis

Ein über eine Elektrode in die Erde geleiteter Strom fließt natürlich zunächst über den Kontaktwiderstand des Erders ins Erdreich und verteilt sich dann.



Je weiter man sich von der Elektrode entfernt um so mehr "Kontaktwiderstände" liegen im Erdreich zueinander parallel und deren Ersatzwiderstand wird praktisch zu Null. Ab diesem Punkt kann zwischen Elektroden E und H ein beliebig großer Strom fließen, an der Erdoberfläche ist das Potenzial praktisch Null. In der Nähe jeder Elektrode baut sich ein stromdurchflossener Einflussbereich auf (der sog. Potenzialtrichter) dessen Form und Größe man nicht genau kennt.

Um die Messung nicht zu verfälschen, muss man also den Hilfserder S in einen Nullpotenzial-Punkt einstecken, der weit genug von den Potenzialtrichtern um die beiden vom Strom I durchflossenen Elektroden E und H entfernt ist.

Die verschiedenen Messverfahren

Das sog. geradlinige 62%-Verfahren (mit 2 Stäben)

Bei diesem Verfahren werden zwei zusätzliche Elektroden (oder Hilfserder) benutzt, um den Strom einzuspeisen und den Nullpotenzial-Punkt zu erhalten. Die Lage der beiden Hilfserder in Bezug zu dem zu prüfenden Erder E (X) ist dabei ganz wesentlich.

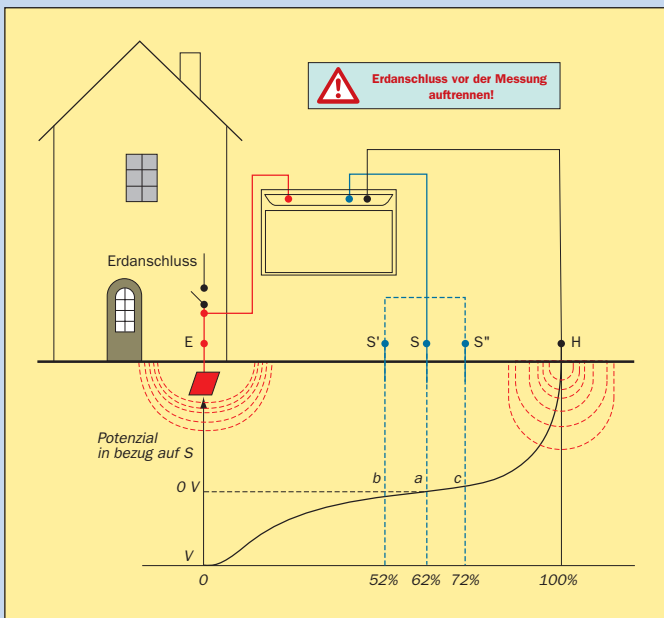
Wie oben ausgeführt, ist es wichtig, den Hilfserder S für das Nullpotenzial möglichst weit außerhalb der Potenzialtrichter um die Erder E und H durch die der Strom I fließt, anzubringen.

Zahlreiche Messungen im Gelände haben gezeigt, dass man die beste Messgenauigkeit erhält, wenn man den Hilfserder S auf der Verbindungslinie zwischen E und H (= 100%) in 62% Abstand von E einsteckt.

Danach vergewissert man sich, dass die Messung möglichst gleich bleibt, wenn man den Hilfserder S auf der Verbindungslinie E H um jeweils 10% weiter oder näher zu E einsteckt (Punkte S' und S'').

Ändert sich der Messwert gegenüber Punkt S so befindet man sich im Einflussbereich eines Potenzialtrichters. Dann sollte man den Abstand E H vergrößern und die Messungen erneut vornehmen.

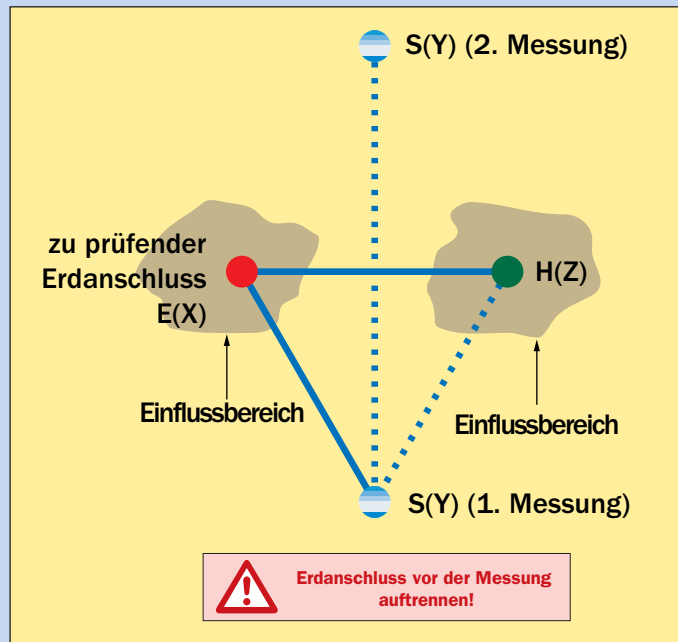
Um gute Ergebnisse zu erzielen, sollte der Abstand zwischen E und H mindestens 25 m betragen (bzw. 15,5 m zwischen E und S).



Das Dreieck-Verfahren (mit 2 Stäben)

Auch bei diesem Verfahren werden zwei zusätzliche Elektroden (oder Hilfserder) eingesetzt. Man benutzt es, wenn das obere Verfahren aufgrund von Platzverhältnissen nicht durchführbar ist. Das Dreieck-Verfahren ist allerdings prinzipbedingt weniger genau als das 62%-Verfahren.

- in einem gewissen Abstand zur zu prüfenden Erdung E wird Hilfserder H eingesteckt



- nun wird der zweite Hilfserder S einmal links und einmal rechts von der Verbindungslinie E H so eingesteckt, dass ein gleichseitiges Dreieck E H S entsteht und an diesen Punkten sind zwei Messungen vorzunehmen.

Ergeben die 1. und die 2. Messung sehr unterschiedliche Werte, befindet sich Hilfserder S in einem Potenzialtrichter. Die Abstände sind dann zu vergrößern und die Messungen sind erneut vorzunehmen. Erhält man nur um wenige % unterschiedliche Werte, kann die Messung als korrekt angesehen werden.

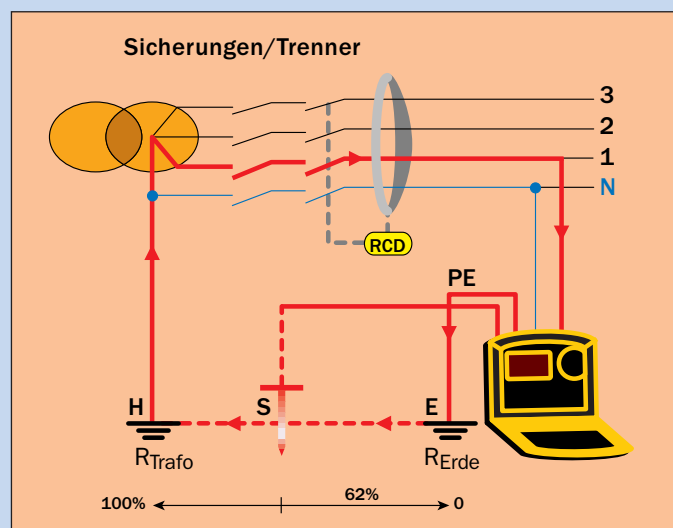
Prinzipbedingt liefert dieses Messverfahren ungenauere Werte, denn auch bei nahe beieinander liegenden Ergebnissen der beiden Messungen kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich die Einflussbereiche der Potenzialtrichter überlappen. Um diesen Effekt auszuschließen, sollte man den Abstand EH vergrößern und eine zweite Serie von Messung vornehmen.

Abgewandeltes 62%-Verfahren (1 Stab)

(gilt nur für TT- oder IT-Netze mit Impedanz)

Bei diesem Verfahren muss der Erdanschluss nicht aufgetrennt werden und man benötigt nur einen Hilfserder S.

Man betrachtet hierbei die Erdung H des Verteilerttransformators als den zweiten Hilfserder und der zu prüfende Erdanschluss E kann entweder direkt an der Gebäudeerdung (soweit zugänglich) oder am Schutzleiter PE der Anlage abgegriffen werden.



Das Messprinzip ist dasselbe wie beim 62%-Verfahren: der Hilfsleiter S ist in 62% Abstand von E in Bezug zum Gesamtabstand E H (= 100%) einzustecken, um einen Nullpotential-Punkt zu erhalten.

Der gemessene Spannungsabfall ist durch den eingespeisten Strom zu dividieren und man erhält den Erdungswiderstand.

Die Unterschiede zum "normalen" 62%-Verfahren sind:

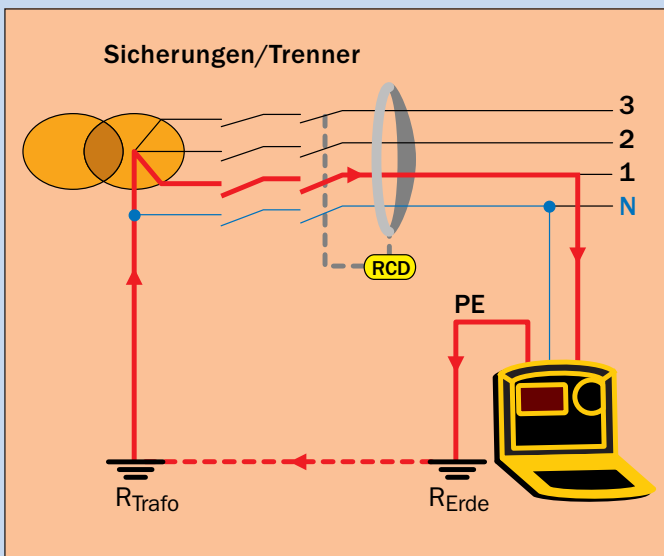
- der eingespeiste Strom wird dem Netz entnommen und keiner zusätzlichen Stromquelle (Batterie) im Messgerät
- es ist nur ein Hilfsleiter S einzustecken, was die Messung vereinfacht
- der Gebäude-Erdanschluss muss nicht aufgetrennt werden; das spart ebenfalls Zeit und die Sicherheit der Anlage ist während der Messung nicht gefährdet.

Schleifenmessung Phase-PE (gilt nur für TT-Netze)

Bei Gebäuden in der Stadt ist die Messung des Erdungswiderstands oft problematisch, da keine Hilfsleiter eingesteckt werden können.

Durch eine Messung des Erdschleifenwiderstands über das Stromnetz muss man im Stadtgelände keine Hilfsleiter setzen und kann die Messung direkt an der Steckdose vornehmen.

Der so gemessene Erdschleifenwiderstand enthält bei diesem Verfahren natürlich zusätzlich zum Widerstand der Gebäudeerdung den Widerstand der Transformatorerdung und die ganzen Kabelwiderstände, die allerdings im Normalfall sehr klein sind.



In jedem Fall gilt hier: $R_{\text{gemessen}} > R_{\text{Erde}}$

Der größere Messwert bedeutet ein Plus an Sicherheit, da der tatsächliche Erdungswiderstand kleiner ist.

Die Sicherheitsnormen gehen davon aus, dass man den Erdschleifenwiderstand als Maß für den Erdungswiderstand benutzen kann, um die Sicherheit einer Anlage gegen indirekte Berührungsspannungen zu gewährleisten.

Hinweis: Bei TN- oder impedanten IT-Netzen kann man durch Messung des Schleifenwiderstands auch den Kurzschlussstrom berechnen und so die Schutzvorrichtungen entsprechend dimensionieren.

Messungen mit der Erdungsprüfzange

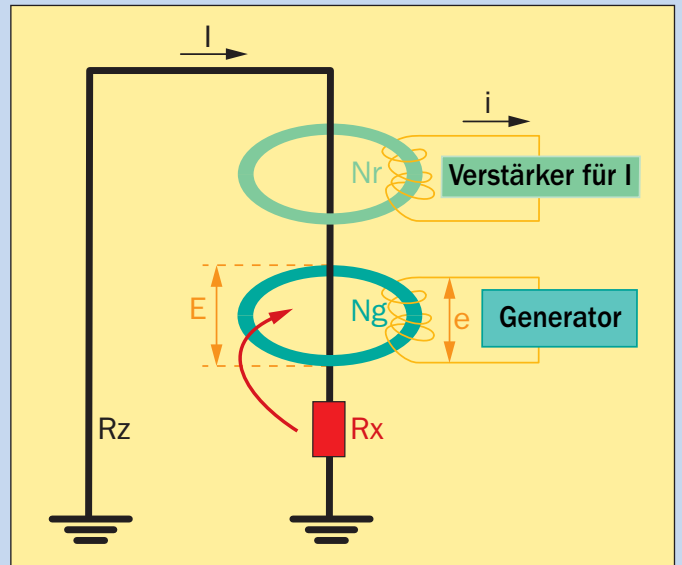
Manche elektrischen Anlagen sind mit mehreren parallelen Erdungsanschlüssen versehen, insbesondere in Ländern, in denen die Energieversorger die Erde zusammen mit der Elektrizität in die Haushalte verteilen.

Besonders in Gebäuden mit empfindlichen elektronischen Geräten empfiehlt sich eine Vermaschung der Erdleiter mit mehreren Erdanschlüssen um eine große äquipotenziale Massefläche zu erhalten.

Bei solchen Netzen kann die Sicherheit sehr schnell durch die Benutzung von Erdungsprüfzangen sicher gestellt und geprüft werden.

Die Anlage muss dazu nicht von der Erdung getrennt und es müssen keine Hilfsleiter eingesteckt werden. Durch einfaches Umschließen des Erdungskabels mit der Prüfzange kann man den Erdungswiderstand und die zur Erde abfließenden Ströme messen.

Eine Erdungsprüfzange verfügt über zwei Wicklungen: eine "Generatorwicklung", die im umschlossenen Leiter einen Strom erzeugt, und eine "Messwicklung", die den durch ihn fließenden Strom misst.



- Die Generatorwicklung der Prüfzange erzeugt im umschlossenen Leiter eine Wechselspannung E. Über die Erdschleife fließt daher ein Strom nach der Formel $I = E / R_{\text{Schleife}}$
- Die Messwicklung der Zange misst diesen Strom.
- Da man E kennt und I misst, lässt sich leicht der Schleifenwiderstand berechnen.

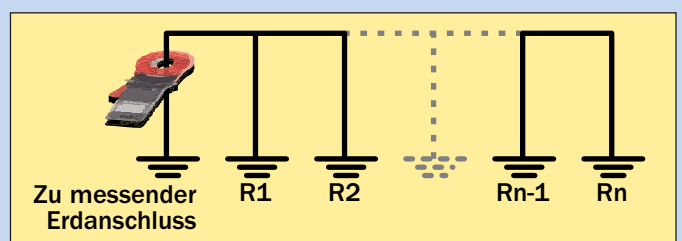
Wir haben es hier mit einer Vielzahl paralleler Erdanschlüsse zu tun, so dass der sich daraus ergebende Ersatzwiderstand R_{Ersatz} praktisch vernachlässigbar klein wird. Für den Gesamtwiderstand der Erdschleife gilt:

$R_{\text{Schleife}} = R_x + R_{\text{Ersatz}}$ mit R_{Ersatz} = Parallelschaltung von n Einzelwiderständen

Da $R_x \gg R_{\text{Ersatz}}$ kann man näherungsweise sagen, dass $R_{\text{Schleife}} \approx R_x$

Eine Erdungsprüfzange kann man besonders gut für die Erdungswiderstandsmessungen an

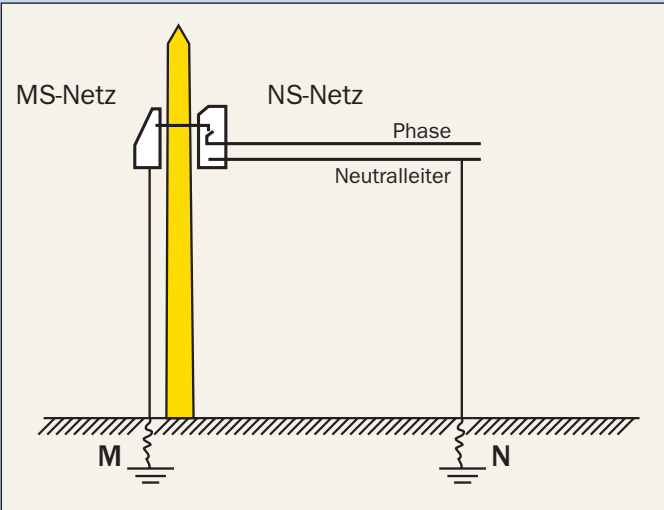
- Mittelspannungs-/Niederspannungs-Transformatoren
- Gebäuden mit Faraday-Käfigen
- Telekommunikationsleitungen
- Durchgangsprüfungen von Fundamenterdern einsetzen.



Die Kopplungsmessung

Eine hohe Kopplung zwischen zwei Erden kann eine Gefahr für die Sicherheit von Personen und/oder Sachwerten darstellen.

Wenn z.B. durch einen Fehler im Mittelspannungsnetz (MS) ein hoher Fehlerstrom bei M zur Erde abfließt, kann dies zu einer Anhebung des Massepotenzials führen und damit den Neutralleiter über dessen Erdung N auf eine gefährliche Höhe anheben.



Wenn beispielsweise ein Blitz in den MS/NS-Transformator einschlägt, kann die kurzzeitige Potenzialerhöhung mehrere kV betragen.

Das für Erdkopplungsmessungen verwendete Verfahren entspricht dem geradlinigen 62%-Verfahren.

Die Einstechpunkte für die Helferster H (Stromrückführung) und S (Null-Bezugspotenzial) sind dabei so zu wählen, dass:

- eine ausreichende Entkopplung zum zu messenden Erdanschluss besteht, unter Beachtung der in den Bildern unten angegebenen Entfernungen
- das Null-Bezugspotenzial in S in Ordnung ist.

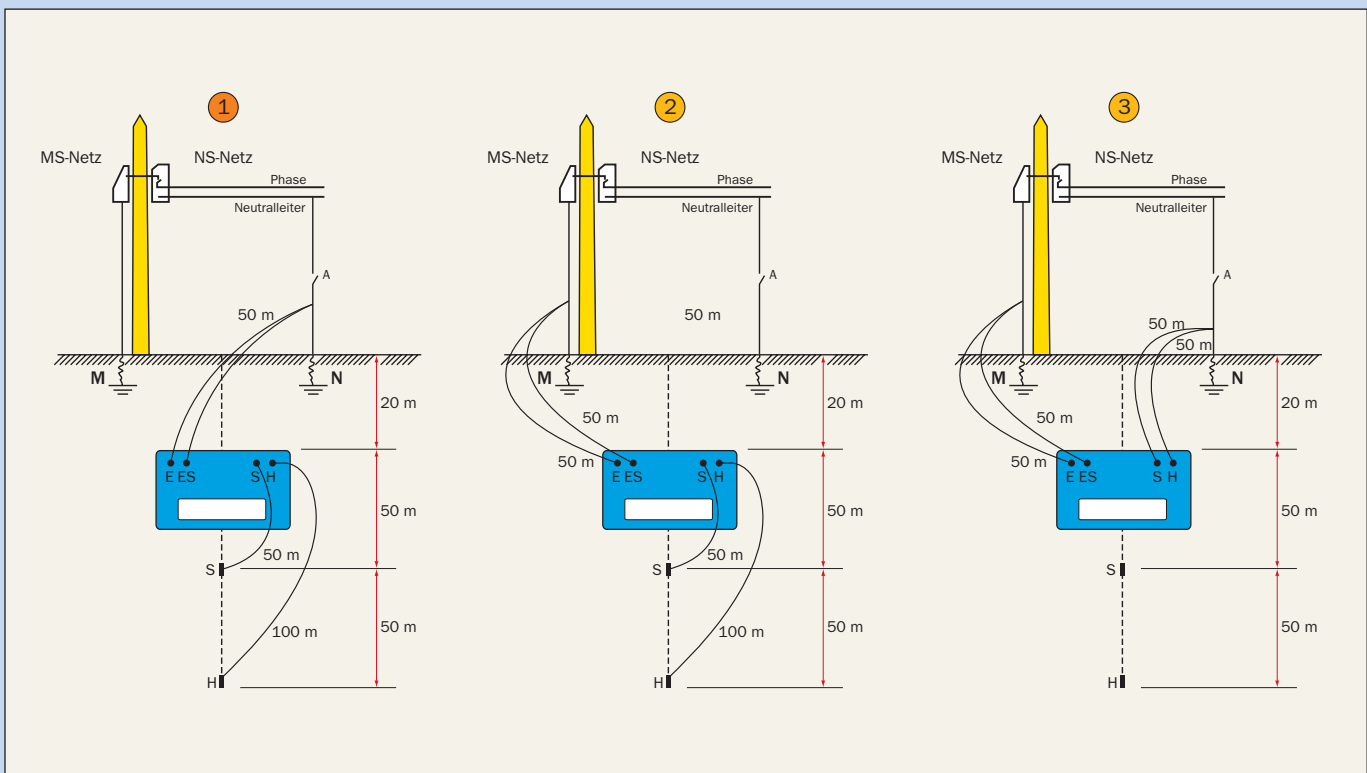
Die Messung der Erdkopplung wird nun wie folgt vorgenommen:

- 1) - Am NS-Netz die Erdung des Neutralleiters auftrennen* (A öffnen). ①
 - Eingänge E und ES des Messgeräts durch zwei 50 m lange Kabel mit Erdung N des NS-Netzes verbinden.
 - An Eingang S einen ersten Helferster mit einem 50 m langen Kabel anschließen.
 - An Eingang H einen zweiten Helferster mit einem 100 m langen Kabel anschließen.
 - Messgerät mittig zwischen M und N in ca. 20 m Abstand zur Verbindungslinie aufstellen.
 - Erdungswiderstand $R_{Neutral}$ des Neutralleiteranschlusses messen. (* Verbindung A muss aufgetrennt werden, damit nur die Kopplung des ersten Erdanschlusses des Neutralleiters gemessen wird)
- 2) - Gleich vorgehen wie oben, jedoch diesmal die Eingänge E und ES an die Erdung M des MS-Netzes anschließen (die Erdung des NS-Netzes ist immer noch aufgetrennt!) ②
 - Nun den Erdungswiderstand R_{Masse} des Mittelspannungsnetzes messen.
- 3) - Eingänge E und ES des Messgeräts durch zwei 50 m lange Kabel mit Erdung M des MS-Netzes verbinden.
 - Eingänge S und H des Messgeräts durch zwei 50 m lange Kabel mit Erdung N des NS-Netzes verbinden.
 - Nun den Widerstand $R_{Masse/Neutral}$ zwischen Erdung M und Erdung N messen. ③
- 4) - Die Kopplung wie folgt berechnen:

$$R_{Koppel} = (R_{Masse} + R_{Neutral} - R_{Masse/Neutral}) / 2$$
- 5) - Kopplungskoeffizient wie folgt berechnen: $k = R_{Koppel} / R_{Masse}$
 - Die Kopplung muss geringer als 0,15 sein (Vorgabe der Energieversorger).

Wichtig : Nicht vergessen die Erdung des NS-Netzes wieder herzustellen (A schließen!)

Leserdienst Nr. 5



Messverfahren der Erdkopplung