Beispiel 2:

Der Ausbreitungswiderstand eines Fundamenterders für ein Einfamilienhaus, Länge $L = 14$ m, Breite $B = 10{,}6$ m, ist zu bestimmen. Der spezifische Erdwiderstand ρ_E liegt bei 210 Ω m.

Lösung:

$$R_F = \frac{2\,\rho_E}{\pi \cdot D}, \quad \text{mit } D = \sqrt{\frac{4 \cdot L \cdot B}{\pi}} \text{ nach Gl. (10.6)}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 14\ \text{m} \cdot 10{,}6\ \text{m}}{\pi}} = 13{,}75\ \text{m}$$

$$R_F = \frac{2 \cdot 210\ \Omega\,\text{m}}{\pi \cdot 13{,}75\ \text{m}} = 9{,}7\ \Omega$$

10.8 Messung von Erdungswiderständen

Die Messung des Ausbreitungswiderstands eines Erders kann entweder nach dem Strom-Spannungs-Messverfahren oder mit einer Erdungsmessbrücke nach dem Kompensations-Messverfahren erfolgen.

Da dies jedoch in dicht bebauten Gebieten nicht immer möglich ist, werden in VDE 0100-600 alternative Methoden beschrieben (siehe nachfolgende Abschnitte 10.9.4 und 10.9.5).

10.8.1 Messung nach dem Strom-Spannungs-Messverfahren

Über einen Widerstand wird eine Spannung an den zu messenden Erder angelegt. Der dabei fließende Strom und die Spannung gegen das neutrale Erdreich werden gemessen. Das in **Bild 10.12** gezeigte Messverfahren ist nur in Netzen mit direkt geerdetem Sternpunkt möglich.

Der Strom, der durch das Erdreich fließt, soll nicht zu groß sein, damit durch die Stromwärmeverluste im Erdreich der Boden nicht austrocknet. Mit dieser Messmethode können bei der Messung des Gesamterdungswiderstands eines Netzes erhebliche Fehler durch Ausgleichsströme auftreten. Normalerweise – d. h. bei ungestörter Messung – liegt der Fehler unter ±5 %.

Die Messung kann auch – anstatt der Messung mit Netzspannung – mit einem Gerät, das eine eigene Spannungsquelle besitzt, durchgeführt werden. Geräte nach DIN EN 61557-5 (VDE 0413-5) „Geräte zum Prüfen, Messen oder Überwachen von Schutzmaßnahmen – Erdungswiderstand“ arbeiten mit Wechselspannung.

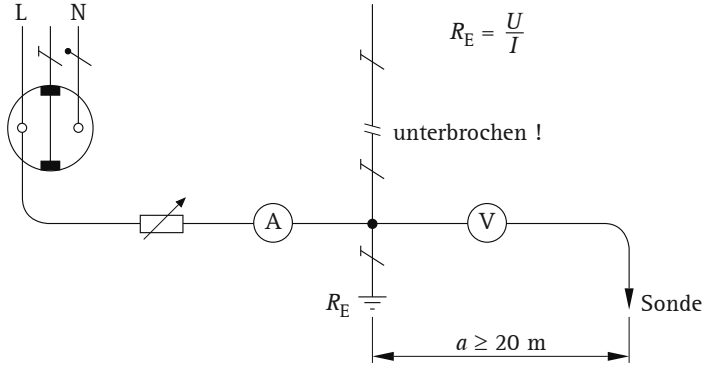


Bild 10.12 Beispiel einer Erdungsmessung nach dem *I-U*-Messverfahren

Auch mit einer Gleichspannungsquelle ist eine solche Messung möglich, es muss dabei allerdings beachtet werden, dass nach wenigen Sekunden durch Polarisation eine Messwertänderung eintritt. Die Messung eines Erders sollte nach 10 s abgeschlossen sein.

10.8.2 Messung mit der Erdungsmessbrücke nach dem Kompensations-Messverfahren

Die Messung von Ausbreitungswiderständen mit der Erdungsmessbrücke gelangt weit häufiger zur Anwendung als die Messung nach dem Strom-Spannungs-Messverfahren, besonders deshalb, weil die Messung einfacher ist und auf Netzspannung verzichtet werden kann.

Die Messgeräte müssen DIN EN 61557-5 (VDE 0413-5) „Geräte zum Prüfen, Messen oder Überwachen von Schutzmaßnahmen – Erdungswiderstand“ entsprechen. Die handelsüblichen Erdungsmessbrücken arbeiten mit Frequenzen von 70 Hz bis 140 Hz.

Bei der Messung werden durch einen Widerstandsabgleich die Spannungen zwischen dem Erder und der Sonde sowie dem Hilfserder verglichen (Aufbau der Messbrücke siehe **Bild 10.13**). Je nach Messaufgabe sind unterschiedliche Messanordnungen zu empfehlen. Für Einzelerder mit geringen räumlichen Ausdehnungen ist die „Linienmethode“ besonders geeignet. Sie ist einfach im Aufbau (**Bild 10.14**), und der Aufwand ist relativ gering. Bei dieser Messmethode ist besonders auf das richtige Einbringen von Sonde und Hilfserder zu achten. Geeignet sind Stäbe (z. B. ½ Zoll bis 1 Zoll Durchmesser und 0,5 m bis 0,8 m Länge), die eine Anschlussmöglichkeit für die Messleitung bieten. Sonde und Hilfserder sollten in einer Linie liegen, wobei die Sonde im neutralen Erdreich (Bereich für die Sonde) einzubringen ist. Für das Einbringen von Sonde und Hilfserder sind bei Einzelerdern mit geringer räumlicher Ausdehnung (Tiefenerder) 30 m bis 60 m für die Sonde und 60 m bis 100 m für den Hilfserder ausreichend.

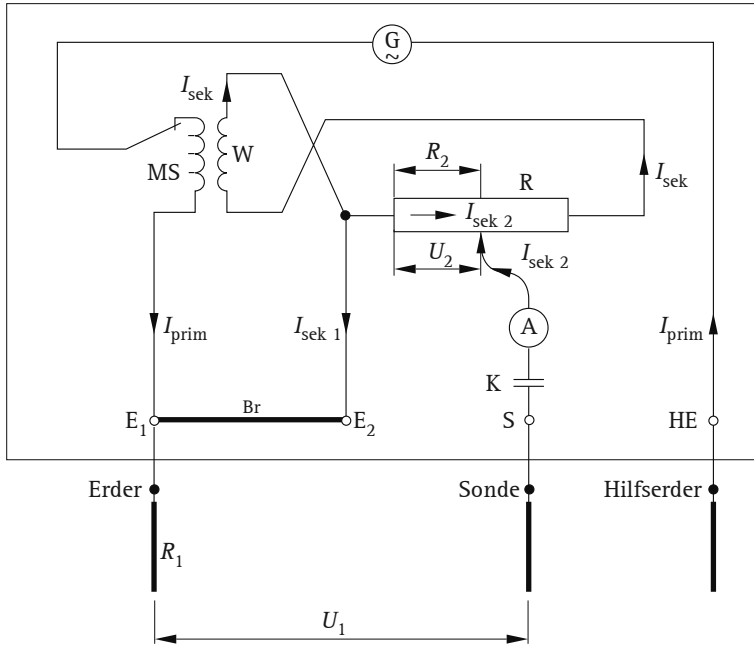


Bild 10.13 Erdungsmessbrücke

Einzelteile:
W Wandler; $\ddot{u} = I_{sek}/I_{prim} = 0{,}1;\ 1;\ 10;\ 100$
MS Messbereichschalter
R Schiebewiderstand
A Amperemeter
G Generator 10 V bis 100 V
K Kondensator
Br Brücke

Funktion – Abgleich:
Forderung: $I_{sek\ 1} = 0$ A; $U_1 = U_2$
also ist mit $U_1 = R_1 \cdot I_{prim}$ und $U_2 = R_2 \cdot I_{sek\ 2}$ auch:
$R_1 = (I_{sek\ 2}/I_{prim}) \cdot R_2$
Durch Kalibrieren des Widerstands R kann $R_1 = \ddot{u} \cdot R_2$ bestimmt werden.

Bei flächenmäßig großen Erdern oder größeren Anlagen ist für den Erder bzw. die Erdungsanlage ein mittlerer Durchmesser D_m zu bestimmen. Von diesem Wert aus ist der Sondenabstand mit etwa $2 \cdot D_m$ und der Abstand des Hilfserders mit etwa $3 \cdot D_m$ oder größer zu bestimmen.

Besonders für räumlich größere Erder oder Erdungsanlagen eignet sich auch die „Winkelmethode“ (in der Literatur auch 90°-Methode genannt) zur Bestimmung des Erdungswiderstands. Diese Messmethode ist aufwändiger als die Linienmethode; sie ist allerdings auch genauer, und Fehler durch falsche Sonden- bzw.

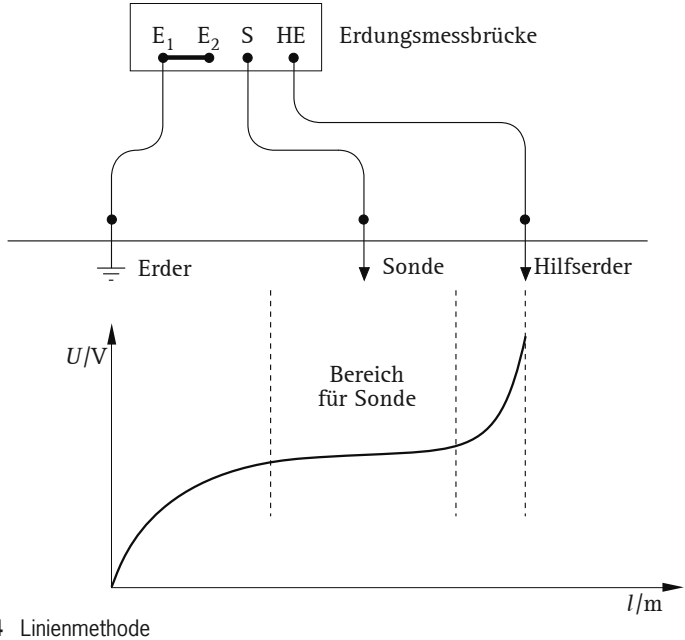


Bild 10.14 Linienmethode

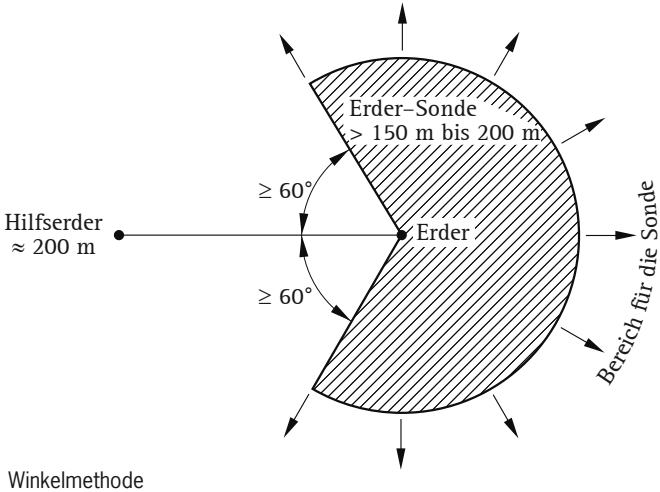


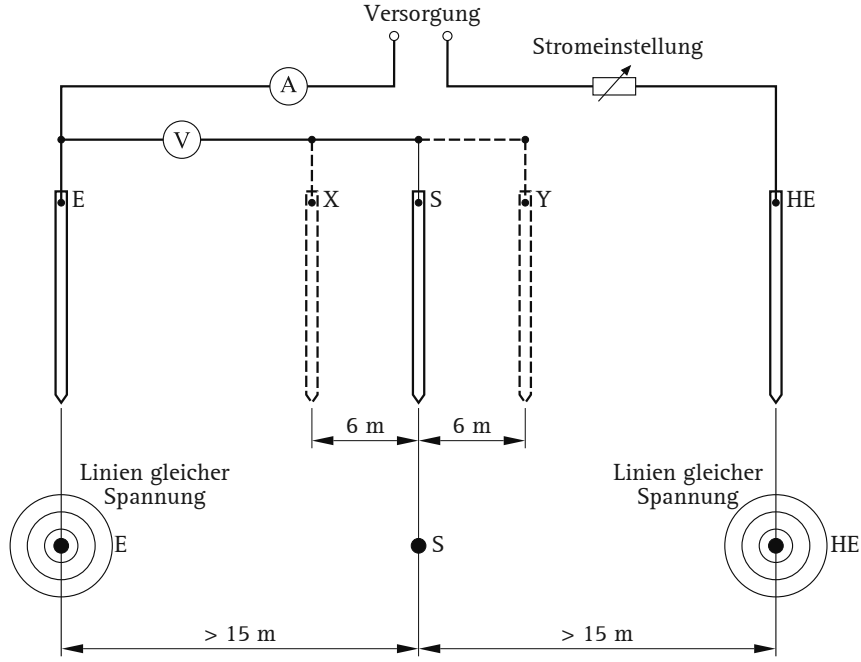
Bild 10.15 Winkelmethode

Hilfserderanordnung sind nicht möglich oder können leicht erkannt werden. Die Anordnung der Messung ist in **Bild 10.15** dargestellt. Der Abstand von Erder zu Hilfserder sollte etwa 200 m, der von Erder zu Sonde sollte über 150 m liegen, besser bei 200 m. Die Messung kann durch einfaches Umstecken (Vertauschen)

der Leitungen von Sonde und Hilfserder an der Messbrücke auf Richtigkeit kontrolliert werden. Die Messung ist richtig, wenn die Ergebnisse gleich (Größenordnung) sind. Bei beiden Messmethoden liegt die Genauigkeit der jeweiligen Messung in der Praxis bei ±10 %, obwohl nach DIN EN 61557-5 (VDE 0413-5) die Betriebsmessunsicherheit einer Erdungsmessbrücke bei ±30 % liegen darf. Die jahreszeitlichen Schwankungen des spezifischen Erdwiderstands (siehe Bild 10.8), die dem Erdungswiderstand proportional sind, sind dabei nicht berücksichtigt.

10.8.3 Messung von Erdungswiderständen nach VDE 0100-600

Der Widerstand eines Erders kann nach der nachfolgend beschriebenen Messmethode gemessen werden (**Bild 10.16**).



Bevorzugte Abmessungen für Hilfserder und Sonde
Länge 1 m; Durchmesser 1 Zoll bzw. 25 mm
oder
Länge 0,7 m; Durchmesser $^1/_2$ Zoll bzw. 12,5 mm

Bild 10.16 Messung des Ausbreitungswiderstands eines Erders
Seitenansicht (oben)
Draufsicht (unten)
(Quelle: DIN VDE 0100-600:2008-06 Bild B.1)

Zwischen dem zu messenden Erder E und einem Hilfserder (Hilfselektrode) HE, der so weit vom Erder entfernt einzubringen ist, dass sich die Spannungslinien nicht überschneiden, wird ein konstanter Wechselstrom I zum Fließen gebracht. Die Stromquelle, die für die Messung verwendet wird, muss von der Einspeisung getrennt sein, z. B. durch einen Transformator mit getrennten Wicklungen.

In Bild 10.16 bedeuten:

E Erder (zu messendes Objekt), während der Messung von der Stromversorgung getrennt
HE Hilfserder
S Sonde
X alternative Position der Sonde S
Y weitere alternative Position der Sonde S

Der Ausbreitungswiderstand des Erders R_E ergibt sich zu

$$R_E = \frac{U_M}{I_M} \tag{10.9}$$

mit:

R_E Ausbreitungswiderstand des Erders in Ω
U_M gemessene Spannung in V
I_M gemessener Strom in A

Dabei wird vorausgesetzt, dass sich Erder und Hilfserder gegenseitig nicht beeinflussen, das bedeutet, dass sich die Linien der Spannungswerte nicht schneiden bzw. überlappen.

Zum Nachweis, dass der gemessene Erdungswiderstand richtig ist, werden noch zwei weitere Messungen (X und Y) durchgeführt, bei denen der Abstand der Sonde jeweils um 6 m von der ursprünglichen Sonde S aus verändert wird. Wenn die Ergebnisse annähernd übereinstimmen, wird der Mittelwert aus den drei Messungen als Erdungswiderstand angenommen. Falls es keine solche Übereinstimmung ergibt, muss die Messung mit einem größeren Abstand zwischen Erder und Hilfserder wiederholt werden.

Wird die Messung bei Netzfrequenz durchgeführt, muss der Innenwiderstand des Spannungsmessers mindestens 200 Ω/V betragen.

10.8.4 Messung des Erdschleifenwiderstands mit Stromzange

Das Verfahren ist anwendbar in TN-Systemen und in TT-Systemen, wenn sehr viele Erdverbindungen vorhanden sind, sodass der Erdungswiderstand eines Einzelerders in der Regel sehr viel größer ist als der Gesamterdungswiderstand der übrigen Erder.

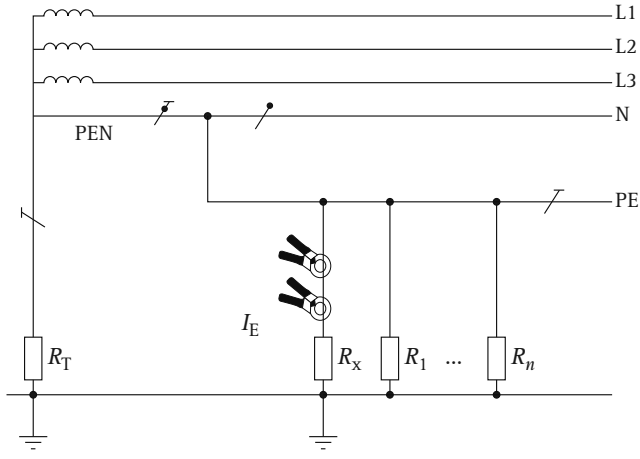


Bild 10.17 Messung des Erdschleifenwiderstands mit Stromzangen
R_T Erdverbindung des Transformators
R_X zu messender unbekannter Erdwiderstand
$R_1 \ldots R_n$ parallele Erdverbindungen, verbunden über einen Schutzpotentialausgleich oder einen PEN-Leiter
(Quelle: DIN VDE 0100-600:2008-06 Bild B.3)

In **Bild 10.17** wird die Messanordnung mit zwei Stromzangen in einem TN-System gezeigt. Mit der ersten Zange wird eine Messspannung in die Schleife induziert, während mit der zweiten Zange der Strom, der in der Schleife zum Fließen kommt, gemessen wird.

Da der Gesamtwiderstand der parallelen Erdungswiderstände vernachlässigbar ist, ist der unbekannte Erderwiderstand in etwa gleich dem gemessenen Schleifenwiderstand. Es gilt:

$$R_X = \frac{U_M}{I_M} \tag{10.10}$$

Es sind:

R_X zu messender unbekannter Erdwiderstand in Ω

U_M Messspannung in V

I_M Messstrom in A

Die Zangen können einzeln an einem Messgerät angeschlossen werden, oder sie können in einer Spezialzange kombiniert sein.

In TT-Systemen, wo nur die unbekannte Verbindung zur Erde zur Verfügung steht, kann die Schleife durch eine kurzzeitige Verbindung zwischen dem Erder und dem Neutralleiter während der Messung geschlossen werden (Quasi-TN-System).

Um mögliche Risiken aufgrund von Strömen, die durch Spannungsunterschiede zwischen Neutralleiter und Erde hervorgerufen werden, zu vermeiden, sollte die Anlage beim Herstellen und Trennen dieser Verbindung vom speisenden Netz getrennt werden, was heute im Zeichen einer sicheren Stromversorgung fast nicht mehr möglich sein dürfte.

In einem TN-System kann diese Messung zwar ohne große Probleme ausgeführt werden, aber es bestehen zahlreiche Möglichkeiten der falschen Anwendung. Damit bei der Messung keine niederohmigen Schleifen von leitfähigen Verbindungen zwischen Fundamenterder und daran angeschlossenen fremden leitfähigen Teilen oder der äußeren Blitzschutzanlage (falls vorhanden) gemessen werden, sollten die Zangen über die Verbindungsleitung zwischen dem vom Netz kommenden PEN-Leiter und der Haupterdungsschiene gelegt werden.

10.8.5 Messung der Fehlerschleifenimpedanz

In VDE 0100-600, Abschnitt 61.3.6.2 wird in einer Anmerkung erläutert, dass es z. B. in dicht bebauten Gebieten in der Regel kaum möglich ist, einen Hilfserder für die Messung des Erderwiderstands zu setzen. In diesem Fällen ist es möglich, eine Messung der Fehlerschleifenimpedanz nach VDE 0100-600, Abschnitt 61.3.6.3 vorzunehmen. Natürlich liefert die Gleichsetzung der Fehlerschleifenimpedanz mit dem Widerstandswert für den Anlagenerder R_A kein genaues Ergebnis. Allerdings liegen die so gemessenen Werte auf der sicheren Seite. Die auftretende Ungenauigkeit ist somit vertretbar.

10.8.6 Messung des Gesamterdungswiderstands eines Netzes

Wenn für ein umfangreiches Netz mit einer Vielzahl von Erdern der Gesamterdungswiderstand bestimmt werden soll, muss dieser auf messtechnischem Wege ermittelt werden. Eine Berechnung aller Einzelerder und Berechnung als Parallelschaltung führt zu einem zu kleinen Gesamterdungswiderstand, da die Einzelerder sich im Netz gegenseitig beeinflussen. Bei der Messung ist es von entscheidender Bedeutung, welcher Messpunkt gewählt wird. Ein genaues Ergebnis ist zu erzielen, wenn von mehreren Messpunkten an der Peripherie des Netzes (nicht Ausläufer) gemessen wird. Der Abstand der Messpunkte sollte je nach Größe des Netzes zwischen 400 m und 1 000 m liegen (**Bild 10.18**). Aus diesen Einzelmessungen kann dann der Gesamterdungswiderstand des Netzes durch Berechnung des arithmetischen Mittels bestimmt werden. In der Regel liegt die Abweichung des so ermittelten Werts bei ±10 % vom richtigen Wert des wirksamen Gesamterdungswiderstands. Als Messmethode ist die Winkelmethode – wie in Abschnitt 10.7.2 in diesem Buch beschrieben – für Abstände zwischen Sonde und Hilfserder von jeweils 200 m bis 300 m geeignet. Sonde und Hilfserder sind – entfernt vom zu messenden Objekt – im freien Gelände einzubringen. Auch hier kann durch einfaches Umstecken

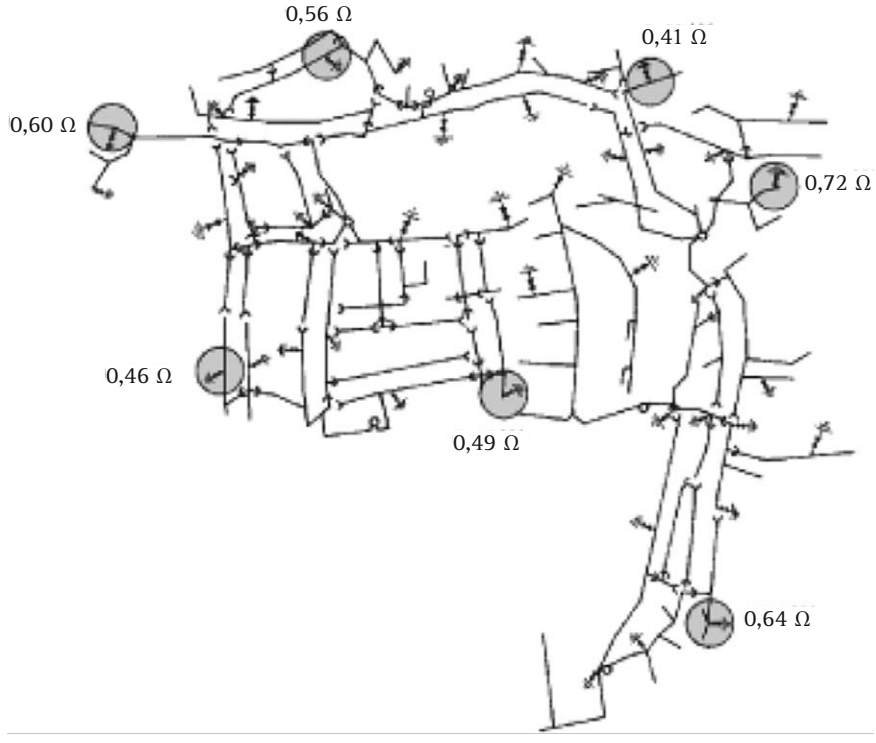


Bild 10.18 Messung von R_{ges} in einem Niederspannungsnetz

(Vertauschen) von Sonde und Hilfserder an der Messbrücke leicht und einfach das Ergebnis kontrolliert werden, da bei beiden Messungen das gleiche Ergebnis angezeigt werden muss. Es ist zu empfehlen, Sonden- und Hilfserder-Abstände sowie deren Messrichtung in einem Plan zu dokumentieren.

10.9 Messung des spezifischen Erdwiderstands

In der Praxis haben sich zwei Messmethoden durchgesetzt, um den spezifischen Erdwiderstand bzw. seine Änderung in tieferen Erdschichten zu bestimmen.

10.9.1 Messung mit fest definiertem Messstab

Ein in seinen Abmessungen fest definierter Messstab (üblich ist 1 Zoll Außendurchmesser, 1 m Länge) wird in das Erdreich eingebracht. Mit der Messbrücke wird sein Ausbreitungswiderstand wie bei einem Erder gemessen (**Bild 10.19 a**).