Messungen von Erdungswiderständen

Teil 2: Messverfahren ohne Netzstrom

E. Hering, Dresden

Eine Übersicht und die für alle Erdungsmessverfahren zutreffenden Aussagen sind im Teil 1 [1] enthalten. Dieser Teil 2 behandelt speziell die Strom-Spannungs-Messverfahren ohne unmittelbare Stromentnahme aus dem Netz. Die Beschreibung der Messverfahren mit unmittelbarer Stromentnahme aus dem Netz folgt im Teil 3.

1 Erdungsmessgeräte

Die vier Anschlussklemmen sind gemäß Bild ❶ bezeichnet. Sie bedeuten:

- Klemmen des Pfades für Stromquelle und ggf. Strommessung: **E** Erder (Messobjekt), **H** Hilfserder,
- Klemmen des Pfades für Spannungsmessung: **ES** Erder (bei der Messung des spezifischen Erdwiderstands die erdernahe Sonde), **S** Sonde

Die Klemmen E und ES sind beim Messen des Erdungswiderstands normalerweise durch eine lösbare Brücke oder ein Schaltglied eines Umschalters miteinander verbunden, weil der zu messende Erder (Messobjekt) an beide genannten Pfade der Innenschaltung angeschlossen ist. Wenn zudem die Klemmen H und S durch eine Brücke miteinander verbunden werden, kann der Erdungsmesser wie ein einfacher Widerstandsmesser eingesetzt werden. Die Frequenz der Wechselstromquelle WQ weicht von 16,7 Hz und 50 Hz sowie den ganzzahligen Vielfachen um mindestens 5 Hz ab und liegt im Allgemeinen im Bereich von 41 Hz bis 140 Hz, bei einigen Typen auch höher. Bei manchen Erdungsmessern ist sie wählbar. Einige Geräte schalten automatisch die Frequenz ein, bei der die geringsten Störungen auftreten („AFC – Automatic Frequenz Control“).

Zum Schutz gegen elektrischen Schlag muss die vom Gerät im Leerlauf erzeugte Messspannung auf einen Effektivwert von 50 V und einen Scheitelwert von 70 V begrenzt sein, bei Erdungsmessern für den Einsatz in landwirtschaftlichen Betriebsstätten auf jeweils die Hälfte dieser Größen. Alternativ wird der Kurzschlussstrom auf einen Effektivwert von 3,5 mA und einen Scheitelwert von 5 mA begrenzt ([2], Abschn. 4.5). Wird keine der beiden Bedingungen erfüllt, muss eine selbsttätige Abschaltung erfolgen.

Der Energieversorgung des gesamten Gerätes dienen Akku- oder Primärzellen oder – heute nur noch selten – ein Kurbelinduktor. Es muss erkennbar sein, ob die Spannung (der Entladezustand) der Energiequelle die Grenze für die Funktion des Gerätes einhält ([3], Abschn. 4.3).

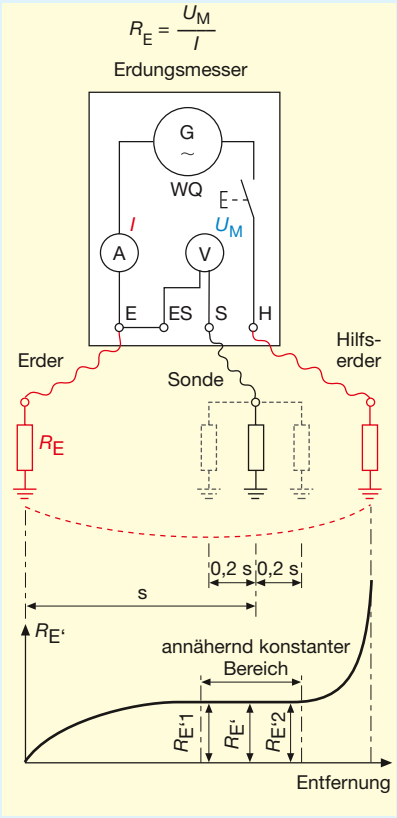
Bei den Strom-Spannungs-Messverfahren ohne unmittelbare Stromentnahme aus dem Netz wird der Erdungswiderstand R_E als Quotient aus der am Erder (und zugleich an den Klemmen ES und S) liegenden Messspannung U_M und dem (über die Klemmen E und H fließenden) Messstrom I ermittelt. Das Bild ❶ zeigt nur das Prinzip der umfangreichen Innenschaltung. Üblicherweise wird unter Verzicht auf getrennte Anzeige von Messspannung U_M und Messstrom I der Erdungswiderstand R_E direkt digital angezeigt. Wenn die Wechselstromquelle ein Konstantstromgenerator ist, erübrigen sich die Strommessung und die Quotientenbildung, sodass ein Messinstrument, dass wie ein Spannungsmesser beschaffen ist, den Erdungswiderstand anzeigen kann.

Überwiegend ist ein Umschalter für die Wahl von Messschaltung, -frequenz und/oder -bereich sowie für das Ausschalten vorhanden. Die meisten Geräte weisen auch eine Taste für den Beginn des Messvorgangs auf. Der Erdungsmesser muss erkennen lassen, ob die maximal zuträglichen Hilfserder- und Sondenwiderstände eingehalten sind ([2], Abschn. 4.4). Auf eine warnende Anzeige sollte man sich nicht allzu sehr verlassen, denn wenn eine solche erscheint, kann der Grenzwert schon weit überschritten sein.

Komfortable Geräte haben zusätzliche Funktionen wie z. B.

- Meldung oder automatische Abschaltung beim Auftreten einer zu hohen Störspannung,
- Meldung oder Messsperre, wenn der Messstrom zu klein ist,
- Anzeige des Messstroms (bei Messung mit Konstantstromerzeuger nur zur Kontrolle),
- automatische Messbereichumschaltung,
- Bestehen bleiben der Anzeige („Hold“),
- Datenspeicherung für das Übertragen oder Drucken der Messergebnisse.

Es ist ratsam, vor der Beschaffung von Geräten deren Beschreibungen und Kennblätter, nach Möglichkeit auch die Bedienungsanleitungen anzufordern und sich daraus ein Urteil zu bilden.



❶ **Strom-Spannungs-Messverfahren ohne unmittelbare Stromentnahme aus dem Netz mit Sonde und Hilfserder**
I Messstrom; R_B Erdungswiderstand des Betriebserders; R_E zu messender Erdungswiderstand; R_E gemessener Erdungswiderstand; U_M Messspannung

2 Messverfahren mit Sonde und Hilfserder

2.1 Prinzip

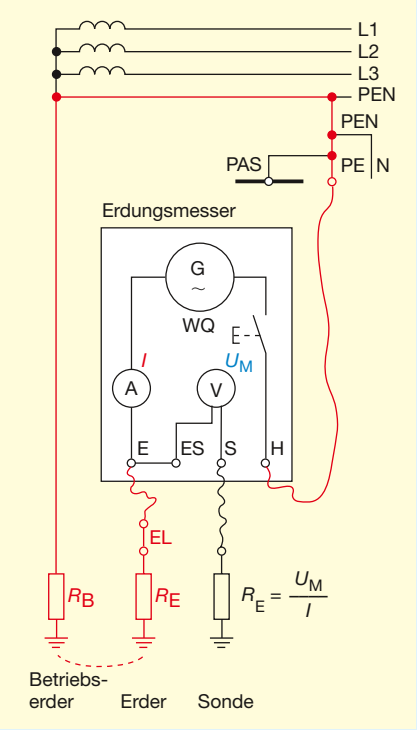
An das Erdungsmessgerät werden, wie im Bild ❶ dargestellt, der zu messende Erder, ein Hilfserder und eine Sonde angeschlossen. Über den Erder, die Erde und den Hilfserder fließt der Messstrom I. Die dadurch am Erdungswiderstand R_E entstehende Spannung U_M liegt an den Klemmen ES und S des Erdungsmessers. Der Erdungswiderstand wird als Quotient aus U_M und I angezeigt.

2.2 Erder (Messobjekt)

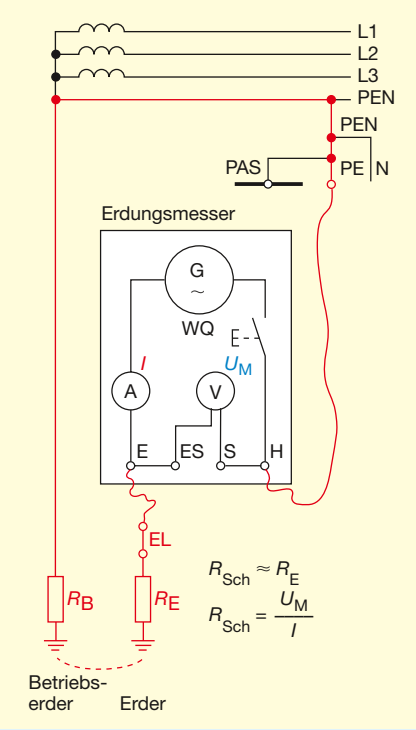
Wird die Klemme E mit dem Anfang des Erdungsleiters (bei der Potentialausgleichsschiene oder Haupterdungsschiene) verbunden, so wird dieser in die Messung des Erdungswiderstands einbezogen. Bei der Verbindung direkt mit dem Erder wird dagegen

Autor

Dipl.-Ing. (FH) *Enno Hering* ist Mitglied des AK „Blitzschutz“ und des AK „Starkstromanlagen bis 1000 V“ des VDE-Bezirksvereins Dresden.



❷ Strom-Spannungs-Messverfahren <u>ohne</u> unmittelbare Stromentnahme aus dem Netz mit Sonde, ohne Hilfserder
EL Erdungsleiter; **PAS** Potentialausgleichsschiene



❸ Strom-Spannungs-Messverfahren <u>ohne</u> unmittelbare Stromentnahme aus dem Netz ohne Sonde, ohne Hilfserder (eine Schleifenwiderstandsmessung über Erde)
R_{Sch} Schleifenwiderstand

der Widerstand des Erdungsleiters nicht mit gemessen. Der Unterschied ist jedoch meistens geringfügig.

Der Widerstand der Messleitung wird mit gemessen. Mit dem dadurch entstehenden Messfehler liegt man auf der sicheren Seite. Damit er gering bleibt, ist es zweckmäßig und üblich, den Erdungsmesser in der Nähe der Anschlussstelle zu platzieren und eine kurze Messleitung zu benutzen. Der Widerstand der Messleitung kann aber auch gemessen und vom angezeigten Wert abgezogen werden. Wenn sein Einfluss unbedingt vermieden werden soll, muss die Brücke zwischen den Klemmen E und ES geöffnet und müssen diese über zwei Messleitungen mit der Erdungsanlage verbunden werden.

Das Messobjekt darf nicht mit anderen Erdern verbunden sein, damit diese nicht das Messergebnis verfälschen. So muss in Verbraucheranlagen beim TN-System der Erdungsleiter von der Potentialausgleichsschiene getrennt sein, weil diese mit dem PEN-Leiter des Verteilungsnetzes verbunden ist. Beim TT-System ist diese Trennung nicht erforderlich, weil die Potentialausgleichsschiene nicht mit dem Neutralleiter des Verteilungsnetzes verbunden ist. Wird sie dennoch vorgenommen, so muss vorher die gesamte Anlage spannungsfrei geschaltet und gegen Wiedereinschalten gesichert sein.

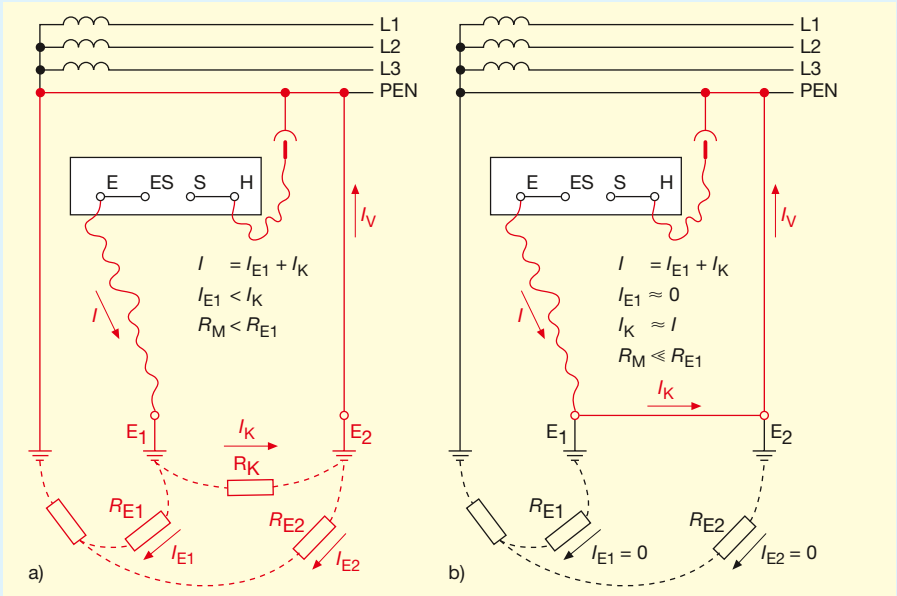
2.3 Hilfserder

Der Hilfserder soll möglichst weit vom Messobjekt entfernt in den Erdstoff eingebracht werden, damit sich die Potentialtrichter dieser beiden Elektroden so wenig wie möglich überschneiden. Je größer der Erder ist, desto größer muss der Abstand sein. Als Richtwert für die minimale Entfernung kann man das Dreifache der Tiefe von Staberdern oder des mittleren Durchmessers von Ringerdern annehmen. Der in den Unterlagen mancher Hersteller angegebene Abstand von 40 m kann nur als Durchschnitt gelten. Ob im Einzelfall der gewählte Abstand ausreicht, wird sich beim Ermitteln der richtigen Sondenanordnung (s. Abschn. 2.4) zeigen.

Der Hilfserder muss umso länger sein und umso tiefer eingebracht werden, je größer der spezifische Erdwiderstand ist. Ein zu großer Hilfserdungswiderstand kann zu Messfehlern führen, z. B. dadurch, dass der von der Wechselstromquelle normalerweise erzeugte Konstantstrom nicht zum Fließen kommt. Es kann evtl. hilfreich sein, die Einbringungsstelle für die Messung mit Wasser zu tränken.

2.4 Sonde

Der Innenwiderstand des Pfades für Spannungsmessung ist sehr groß, sodass es auf den Sondenwiderstand und somit auf die Größe der Sonde nicht so sehr ankommt. Diese



❹ Fälle der Nichteignung des Messverfahrens von Bild 3 im TN-System
a) Kleiner Abstand und dadurch kleiner Koppelwiderstand R_K zwischen dem Messobjekt **E1** und einem zweiten Erder **E2**, der mit dem PEN-Leiter verbunden ist.
b) metallene Verbindung zu einem zweiten Erder, der seinerseits mit dem PEN-Leiter verbunden ist
I_K das Messergebnis verfälschender Strom; R_{E1} zu messender Erdungswiderstand; R_M vom Erdungsmesser angezeigter Widerstand

wird vorzugsweise auf der Geraden zwischen Erder und Hilfserder eingebracht, und zwar an einer Stelle, die so weit wie möglich außerhalb der Potentialtrichter liegt und mit dem Diagramm im Bild ❶ veranschaulicht wird.
Würde man eine Vielzahl von Messungen mit unterschiedlichem Abstand zwischen Erder und Sonde durchführen, dann würden die Messergebnisse eine Kurve bilden, die an den Enden relativ steil und dazwischen weniger steil ist. Bei genügend großem Abstand zwischen Erder und Hilfserder hat die Kurve einen annähernd konstanten Bereich, d. h. einen Bereich mit annähernd waagerechtem Verlauf. Dieser Bereich ist mit mindestens drei Messungen zu ermitteln. Sein Zentrum liegt nicht in der Mitte zwischen Erder und Hilfserder, sondern näher bei diesem, weil die Potentialtrichter unterschiedliche Ausdehnung haben. Im Allgemeinen beträgt der optimale Abstand zwischen Erder und Sonde etwa 2/3 des Abstandes zwischen Erder und Hilfserder [1].

2.5 Anwendungsbeschränkungen

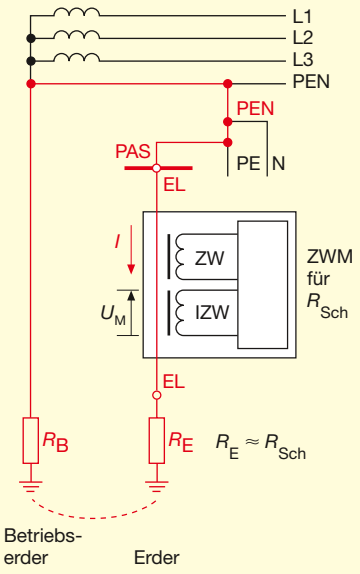
Kann kein Bereich mit annähernd waagerechtem Verlauf der Kurve festgestellt werden, so ist der Abstand zwischen Messobjekt und Hilfserder zu klein. Hat die Kurve einen ungewöhnlichen Verlauf, wird vermutlich durch unterirdische metallene Anlagen (z. B. Wasserleitung) die Messung beeinflusst. Unter diesen Umständen ist kein brauchbares Messeergebnis erzielbar. Es kann versucht werden, mit einer Messtrasse, die vorzugsweise rechtwinklig zur ursprünglichen oder zur Längsachse der unterirdischen metallenen Anlage oder entgegengesetzt liegt, zum Ziel zu kommen.
Die Messung ist auch unmöglich, wenn das Messobjekt von benachbarten Erdern umgeben ist, z. B. in dicht bebauten Gebieten. Ferner ist sie undurchführbar, wenn Hilfserder und Sonde nicht an den richtigen Stellen eingebracht werden können. In all diesen Fällen muss ein anderes Messverfahren angewendet werden.

3 Messverfahren mit Sonde, ohne Hilfserder

3.1 Prinzip

Gemäß Bild ❷ dient der Betriebserder des Verteilungsnetzes als Ersatz für den eingesparten Hilfserder. Es ist peinlich darauf zu achten, dass der Anschluss nicht versehentlich an einen Außenleiter erfolgt.
Beim TN-System wird die Klemme H des Messgeräts – z. B über den Schutzkontakt eines Steckers – an den Schutzleiter (PE) angeschlossen, der seinerseits vom PEN-Leiter abgezweigt ist. Die Klemme E wird an den Er-

[1] Manche Hersteller schreiben, dass der Abstand Erder/Sonde die Hälfte des Abstands Erder/Hilfserder betragen soll. Das ist falsch! Ein bekannter Hersteller empfiehlt, die Entfernung Erder/Sonde immer 62 % der Entfernung Erder/Hilfserder zu wählen und bezeichnet das als „62%-Verfahren“. Damit trifft man im Allgemeinen etwa die richtige Stelle. Diese muss jedoch in jedem Fall durch Versetzen der Sonde ermittelt werden.



❺ Messverfahren wie im Bild 3, jedoch mit Zangenwiderstandsmesser statt Erdungsmesser
EL Erdungsleiter; **IZW** Zangeninduzierwandler; **ZW** Zangenstromwandler; **ZWM** Zangenwiderstandsmesser

dungsleiter angeschlossen, der von der Potentialausgleichsschiene getrennt sein muss, weil diese mit dem PEN-Leiter verbunden ist. Verteilungsnetze mit dem TT-System haben statt des PEN-Leiters einen Neutralleiter. Dieser muss als ein unter Spannung stehender Leiter behandelt werden, obwohl auch er an einen Betriebserder angeschlossen ist. Deswegen kann der Anschluss des Erdungsmessers an den Neutralleiter und somit die Anwendung dieses Messverfahrens im TT-System nicht gutgeheißen werden.

3.2 Probleme im TN-System

Im TN-System funktioniert dieses Messverfahren nicht, wenn das Messobjekt eine starke Kopplung oder eine metallene Verbindung mit einem anderen Erder hat, der seinerseits mit dem PEN-Leiter verbunden ist. Der Messstrom fließt dadurch teilweise auf falschem Weg, sodass die Anzeige des Erdungsmessers viel kleiner als der wahre Erdungswiderstand ist. Darauf wird noch im Abschnitt 4.2 eingegangen.

4 Messverfahren ohne Sonde, ohne Hilfserder

4.1 Prinzip

Dieses im Bild ❸ dargestellte Messverfahren ist eine Schleifenwiderstandsmessung über Erde, weil der Widerstand einer Leiterschleife gemessen wird, die über die Erde führt. Die Klemmen S und H des Erdungsmessers sind miteinander verbunden. Es ist vorteilhaft, dass weder Hilfserder noch Sonde eingebracht werden müssen.

Im TN-System wird der Erdungsleiter von der Potentialausgleichsschiene (PAS) getrennt und der Erdungsmesser dazwischen eingefügt. In Verbraucheranlagen mit dem TT-System ist dieses Messverfahren nicht geeignet. Der Erdungswiderstand des Betriebserders und der Widerstand des PEN-Leiters werden mitgemessen. Sie könnten vom angezeigten Widerstand abgezogen werden, wenn sie genau bekannt wären. Sie sind jedoch schwer ermittelbar, zumal im TN-System die Betriebserdung nicht nur aus dem im Bild ❸ dargestellten Betriebserder besteht, sondern von den zahlreichen Erdern der Häuser mit den Verbraucheranlagen unterstützt wird. Mit dem Fehler, der durch die mitgemessenen Widerstände entsteht, liegt man auf der sicheren Seite.

4.2 Probleme im TN-System

Das bereits im Abschnitt 3.2 geschilderte Problem kann auch hier auftreten. Das Bild ❹ zeigt Beispiele dafür. Abhilfe können folgende vorübergehende Maßnahmen schaffen:

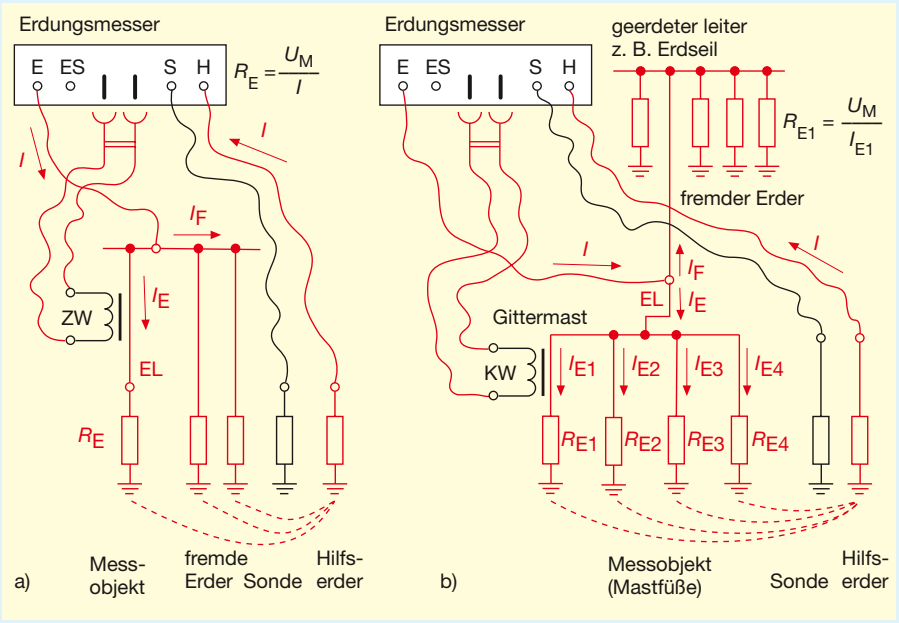
- Trennen der im Teilbild ❹ b) vorhandenen metallenen Verbindung zwischen den Erdern,
- Trennen des zweiten Erders vom PEN-Leiter, wenn der Besitzer das gestattet.

Für Näheres hierzu siehe Beitrag [4].

5 Messung mit Zangenwiderstandsmesser

Dieses Messverfahren ist eine Variante des im Abschnitt 4 beschriebenen Messverfahrens. Der Unterschied besteht darin, dass hier kein Erdungsmesser in einen Leiter eingefügt werden muss und dieser stattdessen gemäß Bild ❺ von einem Zangenwiderstandsmesser ZWM („Erdungsprüfzange“, Typ „C.A 6410“, „C.A 6412“ oder „C.A 6415“, Hersteller: Chauvin Arnoux"); „Erdschleifenmessgerät", Typ „HEME Geo 30“, Hersteller: LEM) umfasst wird, der einen Spannungsinduzierwandler IZW und einen Stromwandler ZW enthält. Der Quotient aus der in den Erdungsleiter induzierten Spannung und dem dadurch fließenden Prüfstrom wird als Widerstand angezeigt. Hier ist es der Schleifenwiderstand R_{Sch} (siehe Abschnitt 4.1). Genau genommen ist es eine Schleifenimpedanz.

Bei einer anderen, hier nicht grafisch dargestellten Lösung umfassen zwei Zangenstromwandler, von denen der Eine als Spannungsinduzierwandler (Typ „PR 1200 ACI“) fungiert und der Andere der Strommessung dient (Typ „PR 1200 X“), den Erdungsleiter. Sie sind an ein spezielles Erdungsmessgerät (Typ „Saturn Geo plus“) angeschlossen, und zwar einer über einen „Adapter für spießlose Erdungsmessung" – Geräte von LEM – an die Klemmen E, S und H sowie einer direkt an eine mehrpolige Buchse.



❻ Selektive Erdungsmessung mit Sonde, Hilfserder und Zangenstromwandler
a) Messobjekt, dessen Erdungsleiter von einem Zangenstromwandler umfasst werden kann. **b)** Gittermast, bei dem die Eckstiele am Fundament mit einem Klappstromwandler umfasst werden können.
I_E über das Messobjekt zum Hilfserder fließender Anteil des Messstroms; I_{E1} bis I_{E4} Anteile von I_E in den Eckstielen und Mastfüßen; I_F über die fremden Erder zum Hilfserder fließender Messstromanteil, dessen Stromverlauf durch die Erde nicht mit dargestellt ist.

Vorteilhaft ist bei beiden Lösungen, dass der Erdungsleiter nicht getrennt werden muss. Das vermindert den Aufwand und vermeidet Gefahren. Das Problem nach Abschnitt 4.2 kann auch hier auftreten.
In Verbraucheranlagen ist dieses Messverfahren nur beim TN-System geeignet. In Freileitungsnetzen ist es für Masterder anwendbar, wenn der Erdungsleiter von den Zangenmessgeräten umfasst werden kann.

6 Selektive Messung mit Zangenstrommesser

Die hier beschriebene Erdungsmessung[2)] mit Sonde, Hilfserder und Zangenstrommesser wird angewendet, wenn das Messobjekt nicht von anderen, mit ihm verbundenen Erdern (nachstehend „fremde Erder" genannt) getrennt werden kann oder soll. Sie beruht auf dem Messverfahren mit Sonde und Hilfserder nach Abschnitt 2, arbeitet jedoch gemäß Bild ❻ a) mit einem speziellen Erdungsmessgerät (Typ „Saturn Geo plus") und einem zusätzlich eingesetzten Zangenstromwandler ZW. Dieser ist an eine mehrpolige Buchse des Erdungsmessers angeschlossen und umfasst den Erdungsleiter EL des Messobjekts. Durch die besondere Schaltung des Erdungsmessers bei entsprechender Stellung des Umschalters hat der zu den fremden Erdern fließende Anteil I_F des Messstroms I keinen Einfluss auf das Messergebnis, sodass der vom Zangenstromwandler ZW erfasste Zweigstrom I_E allein für die Anzeige des Erdungswiderstands R_E maßgebend ist. Das Bild ❻ b) zeigt die Messschaltung für einen Gittermast, der sich elektrisch nicht vom geerdeten Leiter (z. B. Erdseil, PEN-Leiter, Neutralleiter) trennen lässt. Weil der als Erdungsleiter EL dienende Gittermast wegen seiner Gestalt nicht wie im Bild ❻ a) mit einem Zangenstromwandler umfasst werden kann, wird nacheinander an den vier Eckstielen, die mit den vier als Erder wirkenden Mastfüßen verbunden sind, mit dem Klappstromwandler KW („Klappwandler") gemessen. Der Erdungsmesser zeigt dabei nacheinander die Widerstände R_{E1} bis R_{E4} an. Der resultierende Erdungswiderstand R_E der vier durch den Mast elektrisch miteinander verbundenen Mastfüße errechnet sich nach Gleichung (1).

$$R_E = \frac{1}{\frac{1}{R_{E1}} + \frac{1}{R_{E2}} + \frac{1}{R_{E3}} + \frac{1}{R_{E4}}} \qquad (1)$$

2) Der Ausdruck „selektive Erdungsmessung" für sich allein ist nicht eindeutig, weil auch andere Messverfahren selektiv sind, z. B. die in den Abschnitten 4 und 5 behandelten.

Literatur

[1] *Hering, E.*: Messungen von Erdungswiderständen – Teil 1: Übersicht und Allgemeingültiges. Elektropraktiker, Berlin 60 (2006) 9 S. 732-735
[2] DIN EN 61557-5/**VDE 0413-5:1998-05** – Geräte zum Prüfen, Messen und Überwachen von Schutzmaßnahmen; Teil 5: Erdungswiderstand (entspricht IEC 61557-5).
[3] DIN EN 61557-1/**VDE 0413-1:1998-05** –; Teil 1: Allgemeine Anforderungen (entspricht IEC 61557-1).
[4] *Hering, E.*: Probleme mit einem der Erdungsmessverfahren beim TN-System. Elektropraktiker, Berlin 53 (1999) 9, S. 820-822.