

Beitrag von Michael Hirsch für „Der Sachverständige“
Vortrag vom 19.1.2001 in Zuge des Internationalen Fachseminars in Bad
Hofgastein

Der elektrische Anlagenerder im Sinne der Nullungsverordnung – zeitgemäße Meßmethoden in verbauten Gebieten (global earthing system) und die Bestimmung der Schleifenimpedanz in elektrischen Anlagen

1. Ausgangssituation

Am Anfang stand die Nullung. Mit ihr hat alles begonnen. Wesentlicher Bestandteil der Nullung und elektrische Notwendigkeit zur ordnungsgemäßen Funktion ist die Ausführung des Hauptpotentialausgleiches. Ehemals als 4. Nullungsbedingung ein integraler Bestandteil der Ausführung wird dabei der PEN-Leiter mit anderen guten Erden verbunden um so eine niederohmige Ankopplung an die Bezugserde zu erreichen. Der PEN-Leiter ist in seinem Verlauf an „Erde“ förmlich „festgenagelt“.

Durch die Ausführung des Hauptpotentialausgleiches werden alle mit Erdpotential verbundenen leitfähigen Teile zusammengefaßt. Dadurch entsteht eine ausgedehnte Äquipotentialfläche. Zwischen den über den Potentialausgleich (PA) zusammen gefaßten leitfähigen Teilen bestehen keine Potentialunterschiede. Da auch der Schutzleiter in dieses System einbezogen werden muß, kann auch im Fehlerfall keine nennenswerte Berührungsspannung auftreten.

Über den Potentialausgleich, in den der PEN-Leiter in jeder Anlage einbezogen ist, sind sämtliche Erdungsanlagen der Objekte miteinander verbunden. Ein vernetztes Erdersystem liegt vor. Jeder Erder weist dabei eine seiner Form und seiner Abmessung entsprechende Potentialverteilung im Erdreich auf. Nebeneinander liegende Erder weisen in diesem Zuge überlappende, in einander übergehende Potentialverläufe auf. Durch die Dichte der Erdungsanlagen und der Potentialgräben und Potentialtrichter werden Erdungsmessungen der konventionellen Art erschwert und in manchen Fällen unmöglich. Die zwingend erforderliche Information der Bezugserde kann mit wirtschaftlich vertretbaren Mitteln nicht eingeholt werden .

Das Erdungssystem mit seiner Vernetzung aller Erder kann Ausdehnungen der Fläche einer Großstadt annehmen. Die Bezugserde als Referenzpunkt der konventionellen Erdungsmessung ist nur äußerst kompliziert auffindbar.

2. Die Methoden der Erdungsmessung

Zur Behandlung der meßtechnischen Probleme und zur Vorstellung einer alternativen Methode zur Erfassung von Erdungswiderständen werden die Möglichkeiten der Meßtechnik zum Thema Erdungsmessung zusammengefaßt:

- Ermittlung des Erdungswiderstandes durch eine Strom- und Spannungsmessung mit Netzspannung
- Ermittlung des Erdungswiderstandes durch Strom- und Spannungsmessung mit einer Hilfsspannung mit einer Frequenz, die sowohl jenseits der verwendeten technischen Frequenzen 50 Hz und 16 2/3 Hz, als auch nicht bei 0 Hz (Gleichspannung) liegt.
- Selektive Erdungsmessung mit Stromzangen ohne Sonde (zur Erfassung des Potentials der Bezugs Erde) und ohne Hilfserder

2.1 Erdungswiderstandsmessung durch Strom- und Spannungsmessung mit Netzspannung

Die Bestimmung des Erdungswiderstandes durch Strom- und Spannungsmessung mit Netzspannung stellt die einfachste und gleichzeitig gefährlichste Art der Erdungsmessung dar und arbeitet nur in Netzen mit Betriebserder (TN oder TT). Der Erdungswiderstand wird dabei aus dem Spannungsabfall über den Erdungswiderstand bei bekanntem, oder zumindest konstantem Erderstrom I_E aus dem Ohm'schen Gesetz ermittelt. Leider sind damit eine erhebliche Potentialanhebungen des PEN-Leiters (bzw. des Schutzleiters) gegenüber Bezugs Erde möglich. Da diese Messung mit der Frequenz des speisenden Netzes durchgeführt wird, besteht die Gefahr der Verfälschung des Meßergebnisses durch in Erde vagabundierende Ströme.

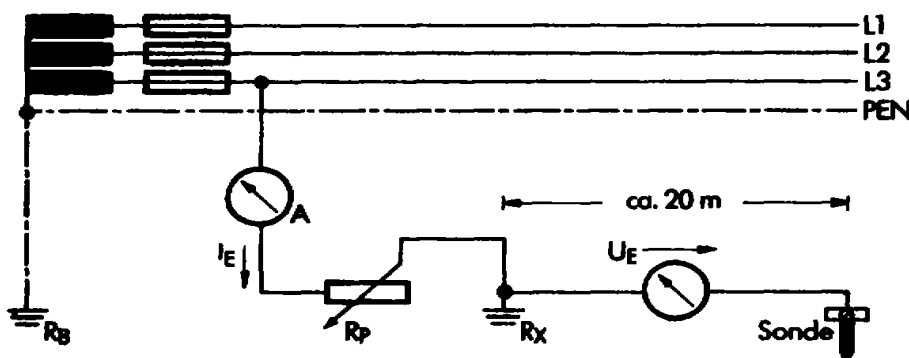


Abb. 1: Erdungswiderstandsmessung durch Strom- und Spannungsmessung

2.2 Erdungswiderstandsmessung durch Strom- und Spannungsmessung mit Hilfsspannung

Die Bestimmung des Erdungswiderstandes durch Strom- und Spannungsmessung mit einer Hilfsspannung mit einer Frequenz, die weder ein ganzzahliges Vielfaches von $16 \frac{2}{3}$ Hz noch Gleichspannung darstellt, ist eine, unter bestimmten Rahmenbedingungen wie ausreichender Platz zum Setzen von Hilfserder und Sonde, genaue und vor allem gefahrlose Methode der Erdungsmessung. Zwischen dem Anschluß E (Erder) und H (Hilfserder) wird der Meßstrom eingepreßt. Der Spannungsabfall über den zu messenden Erder wird zwischen dem Erder E und der Sonde S gemessen. Die Bestimmung des Erdungswiderstandes erfolgt über das Ohm'sche Gesetz $R_A = U_E / I_M$. Auf Grund der nicht zur allgemeinen Versorgung passenden Meßfrequenz kann es zu keinen Überlagerungen mit technischen Frequenzen $16 \frac{2}{3}$ Hz oder 50 Hz kommen. Damit kann der Meßstrom überdies so klein sein, daß in allen Fällen gesichert ist, daß keine gefährlich hohen Berührungsspannungen auftreten können.

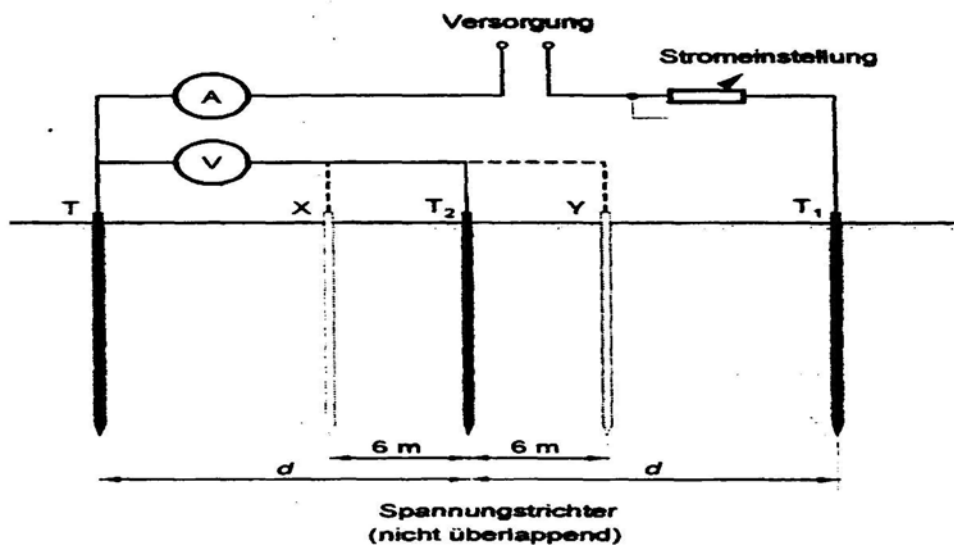


Abb. 2: Erdungsmessung mit Erdungsmesser

Der Spannungstrichter um einen Vertikalrader weist meist einen Radius von 20 m auf. Erst in einer Entfernung von 20 m kann das Potential der Bezugs Erde abgegriffen werden.

Im dargestellten Fall gilt es Sonde und Hilfserder entsprechend den Erfordernissen des Spannungstrichters, sowohl des dargestellten Strahlenerders als auch von Sonde und Hilfserder, zu setzen.

Bei einem Durchmesser des Strahlenerders von 40 m und einem Sondenabstand von mindestens 20 m vom Erder sind für den Anschluß der Sonde mindestens 40 m Sondenleitung erforderlich. Die im Beispiel dargestellte Sondenleitung mit 60 m Länge stellt mit Reserve sicher, daß sich die Sonde außerhalb des Spannungstrichters des Erders befindet. Durch die Verwendung einer 100 m langen

Meßleitung für den Hilfserder ist überdies gewährleistet, daß der Spannungstrichter des Hilfserders keinen Einfluß auf die Sonde ausübt.

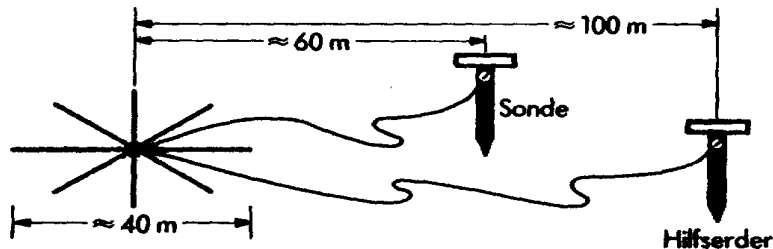


Abb. 3: Abstände bei Erdungsmessung

Speziell im Stadtgebiet sind bei Erdungsmessungen die genannten Entfernungen zwischen Erder, Sonde und Hilfserder nicht realisierbar.

Bei einer Entfernung des Hilfserders vom Erder von 40 m steht für die optimale Positionierung der Sonde S nur ein schmaler Bereich, in dem die Spannungstrichter waagrecht verlaufen (BE = Bezugserde).

Die korrekte Positionierung der Sonde hat auf das Meßergebnis gewaltigen Einfluß. Sitzt die Sonde zu nah am Erder, entspricht die abgegriffene Spannung nicht der Spannung am Erder. Im dargestellten Beispiel wird eine zu kleine Spannung ermittelt. Damit wird bei konstantem Strom ein zu kleiner Erdungswiderstand R_A ermittelt.

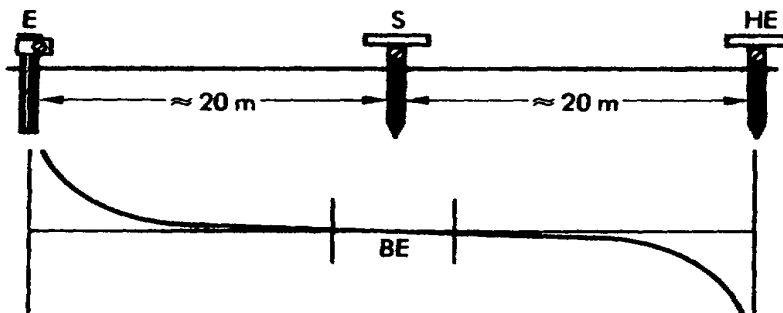


Abb. 4: Spannungstrichter bei Vertikalerder

Sitzt die Sonde zu nah am Hilfserder, entspricht die abgegriffene Spannung nicht der Spannung am Erder. Im dargestellten Beispiel wird eine zu große Spannung ermittelt. Damit wird bei konstantem Strom ein zu großer Erdungswiderstand R_A ermittelt.

Die genannte Zusammenhänge mit falsch abgegriffenen Erderspannungen können in Anlagen unbewußt auftreten, da die zu beurteilende Erdungsanlage einen unbekanntem Aufbau und Verlauf aufweist. Durch unbekanntem Potentialverläufe sind fehlerhafte Messungen möglich.

Ergänzend zu den Möglichkeiten der Fehlmessung eröffnet ein derart empfindliches Meßverfahren ungeahnte Möglichkeiten der Manipulation der Meßergebnisse. Die eigene zu beurteilende Anlage kann dabei nach Gutdünken des Prüfers wesentlich besser als in Wirklichkeit dargestellt werden und nach belieben „schön gefärbt“ werden.

Ähnliche Zusammenhänge sind mit umgekehrtem Vorzeichen umsetzbar.

2.3 Selektive Erdungsmessung mit Stromzangen

2.3.1 Das Messverfahren

Die selektive Erdungsmessung mit Stromzangen gestattet die Messung des Erdungswiderstandes einer einzelnen Erdungsanlage ohne Verwendung von Hilfserder und Sonde. Dieses Messverfahren ist speziell in Gebieten mit geschlossener Bebauung unter der zusätzlichen Bedingung geeignet, dass es sich um eine einzelne Erdungsanlage handelt und die benachbarten Erdungsanlagen über PEN-Leiter mit dieser und miteinander verbunden sind.

Dieses Messverfahren wird im neuen Vorschriftenentwurf ÖVE/ÖNORM E 8001-6-61 im informativen Anhang C als eine der beiden Möglichkeiten für die Bestimmung des Erdungswiderstandes angeführt.

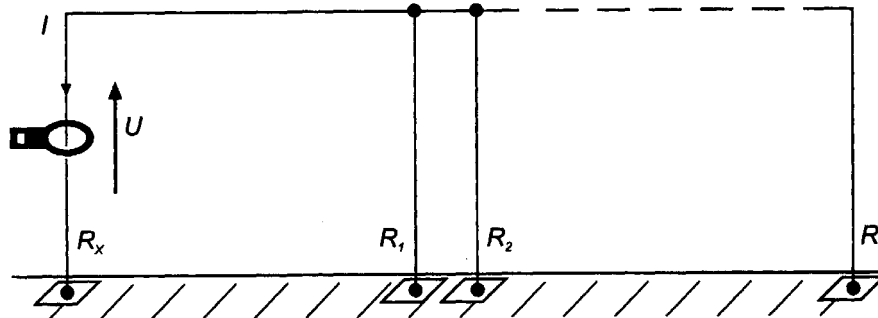
Das Messverfahren arbeitet mit zwei Stromwandlern. Ein Stromwandler induziert in einer Schleife, die auch den zu ermittelnden Erdungswiderstand enthält, eine Spannung. Der von dieser Spannung in der Schleife getriebene Strom wird mit dem zweiten Stromwandler gemessen, so dass der Gesamtwiderstand der Schleife errechenbar ist. Das Messverfahren kann jedoch nur dann zu richtigen Ergebnissen führen, wenn die jeweils zu messende Erdungsanlage nur durch die mit der Messzange erfasste Erdungsleitung, im Allgemeinen über die PAS, mit dem PEN- oder N-Leiter des Netzes verbunden ist und alle anderen allenfalls vorhandenen Erdungsleitungen der zu messenden Erdungsanlage geöffnet sind.



Abb. 5: Erdungsmesszange C.A 64XX von Chauvin Arnoux

Die beiden Stromwandler sind z.B. samt der erforderlichen Speisung und der Mess- und Rechenelektronik in einem Zangengehäuse (mit magnetischer Schirmung zwischen den Wandlerkernen) untergebracht (siehe dazu Abb. 1: Erdungsmesszange C.A 6415 von Chauvin Arnoux). Alternativ dazu kann der Aufbau auch mit zwei unabhängigen Stromwandlern erfolgen, die an ein Grundgerät angeschlossen sind, das die Speisung sowie Mess- und Rechenelektronik beinhaltet.

PEN-Leiter (Verbindungsleiter zu „benachbarten“ Erdungsanlagen)



- R_x gesuchter Erdungswiderstand
- $R_1, R_2 \dots R_n$ über den PEN-Leiter parallel geschaltete andere Erdungsanlagen im Netz einschließlich Erderwirkungen fremder leitfähiger Teile
- R_{PEN} Widerstand des Verbindungsleiters netzseitig bis zur Hauptpotentialausgleichsschiene, z.B. PEN-Leiter
- $R_{Schleife}$ Widerstand der gesamten Messschleife
- U für die Messung induzierte Spannung
- I gemessener Strom in der Messschleife

Abb. 6: Schema der selektiven Messung des Erdungswiderstandes mit zwei Stromwandlern in einem ausgedehnten Erdernetz

Die Schaltung und das Funktionsprinzip sind in Abb. 6 schematisch dargestellt. R_x ist der zu ermittelnde Erdungswiderstand der Anlage. Als Verbindungsleiter wird der PEN-Leiter (oder in Netzen, in denen auf Grund früher gültiger Bestimmungen der Anlagenerder mit dem Neutralleiter verbunden ist, der Neutralleiter) verwendet. Die Widerstände R_1, R_2 bis R_N stellen die Erdungswiderstände der im selben Netz befindlichen Anlagenerder der benachbarten Anlagen und der Erder der Betriebs- und Ausläufererdung des Netzes dar, welche über den PEN-Leiter parallel geschaltet sind. Mit diesen Erdern verbundene fremde leitfähige Teile behindern die Messung nicht, sofern sie keine zusätzliche Verbindung zu der zu messenden Erdungsanlage haben.

Der Widerstand der Parallelschaltung von R_1 bis R_N unter Einbeziehung der vorhandenen fremden leitfähigen Teile ist in einem Gebiet mit geschlossener Bebauung im Allgemeinen sehr klein. Ebenso ist der Widerstand des PEN-Leiters (oder des Verbindungsleiters) im Allgemeinen sehr gering. Die Werte dieser beiden Widerstände können daher gegenüber dem Widerstand des zu messenden Einzelerders vernachlässigt werden.

Da in der zu betrachtenden Messschleife der Erdungswiderstand R_X nur mit dem geringen Widerstand des PEN-Leiters und mit der Parallelschaltung aller zusammengeschlossenen Erdungsanlagen in Serie geschaltet ist, wird der Widerstand der Messschleife hauptsächlich vom Widerstand R_X bestimmt. Daher gilt näherungsweise:

$$R_X \approx R_{\text{Schleife}} = R_X + (R_1 // R_2 // \dots // R_n) + R_{\text{PEN}} = U / I$$

R_X kann maximal den Wert R_{Schleife} aufweisen, womit man sich durch die angeführte Vernachlässigung der Widerstände des PEN-Leiters und der anderen von der Schleife umfassten Erdungswiderstände auf der sicheren Seite befindet.

Für echte TT-Systeme ist dieses Messverfahren wegen des fehlenden niederohmigen Rückschlusses über den Hauptpotentialausgleich und den N-Leiter nicht einsetzbar.

Der zu beurteilende Erder muss entweder ein Einzelerder sein oder auf Grund seines Anschlusses als Einzelerder zu betrachten sein. Bei einer Erdungsanlage, die aus mehreren Vertikalerdern besteht, kann auch jeder Einzelerder gemessen werden, indem die jeweilige Erdungsleitung mit der Zange umfasst wird. Das Messergebnis ist in diesem Fall jedoch nur dann richtig, wenn gesichert ist, dass die einzelnen Erder im Erdreich keine weitere Verbindung haben. Im Fall eines Fundamenterders, der meist als geschlossener Ringerder in Beton verlegt ist, ist das Einzelerderkriterium nur dann gegeben, wenn die Erdungsanlage nur über eine Erdungsleitung mit der Haupterdungsschiene(-klemme) verbunden ist und keine weiteren Anschlussfahnen besitzt, die während der Messung mit anderen Erdungsanlagen oder fremden leitfähigen Teilen verbunden sind.

Wenn eine zu messende, umfangreiche Erdungsanlage mit mehreren Haupterdungsschienen(-klemmen) verbunden ist, muss sichergestellt sein, dass außer der Verbindung an der Messstelle keine weitere galvanische Verbindung des Erders mit dem System der Messschleife besteht. Falls dies nicht ermöglicht werden kann, weil die zusätzlichen Verbindungen während des Betriebes der Anlage nicht geöffnet werden dürfen, so ist das Messverfahren für diese Anlage nicht anwendbar, weil in diesem Falle nur die Schleife in der Anlage selbst gemessen wird. Die Messanordnung ist in einem solchen Falle jedoch geeignet, wenigstens die Niederohmigkeit der einzelnen Anschlussverbindungen oder Ableitungen nachzuweisen (siehe dazu Abb. 7).

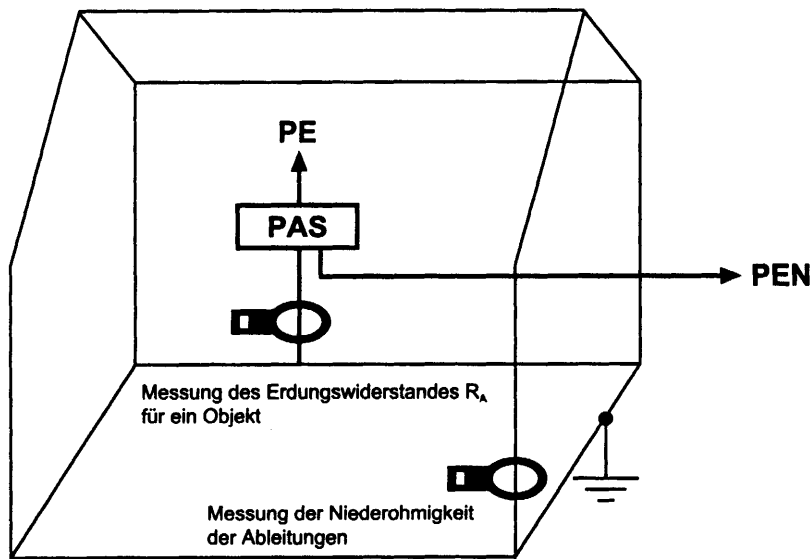


Abb. 7: Messung der Erdungsanlage eines Objektes mit Fundamenterder und Blitzschutzanlage

- * Meßvorgang an Erdungsanlage mit Einzelerdern
Erdungsanlage (Blitzschutzanlage) muß an Potentialausgleich angeschlossen sein.
PEN-Leiter muß an Potentialausgleich angeschlossen sein (TN-System).
Die Messung erfolgt an jedem einzelnen Vertikalerder, womit der Widerstand jedes Einzelerders bekannt ist.
Der Gesamterdungswiderstand dieser Erdungsanlage bestehend aus Einzelerdern kann ohne Zuhilfenahme eines konventionellen Erdungsmeßgerätes nur rechnerisch ermittelt werden (Parallelschaltung von Erdern) oder die Erdungsmessung mit Erdungsmeßzange/n erfolgt an der PA-Leitung zwischen Erdungsanlage und Hauptpotentialausgleichsschiene.

- * Messung an Erdungsanlage mit Fundamenterder als geschlossener Ring
Die Erdungsanlage (Blitzschutzanlage) muß an den Potentialausgleich angeschlossen sein.
PEN-Leiter muß an Potentialausgleich angeschlossen sein (TN-System).
Die Messung an jedem einzelnen Ableiter gibt Auskunft über die Niederohmigkeit der Ableitungen und Verbindungen über die Fangeinrichtung.
Der Messung des Gesamterdungswiderstandes dieser Erdungsanlage bestehend aus einem Fundamenterder erfolgt an der PA-Leitung zwischen Erdungsanlage und Hauptpotentialausgleichsschiene.

3.2 Vorteile der Erdungsmessung mit Erdungsmeßzange/n

Es erfolgt eine unbeeinflusste Beurteilung der Verbindungsstellen, weil diese ungeöffnet gemessen werden können. Damit entstehen im zeitlichen Ablauf der Erdungsmessung wesentliche Einsparungen.

Es können glaubwürdige und verifizierbare Erdungswiderstände, ohne das Setzen von Sonde und Hilfsleiter, ermittelt werden.

Unsicherheiten durch benachbarte Erdungsanlagen mit für den Prüfer unbekanntem Verlauf und unbekannter Ausdehnung werden minimiert.

Um mit diesem Meßverfahren bestehen zu können sind allerdings einige wenige Voraussetzungen einzuhalten:

Vorerst muß eine grundsätzliche Zugänglichkeit und Erreichbarkeit der zu beurteilenden Erder vorhanden sein, da die Stromzange/n mechanisch den Erder umfassen müssen (Öffnungsweite der Zange, Abmessungen des Zangenkopfes) Unlösbare oder unbekannte Verbindungen in der Erdungsanlage, speziell von Vertikalerdern durch unter dem Erdniveau verlaufende Ringerder oder Mehrfachverbindungen der Erdungsanlage mit Potentialausgleichsleitern führen zur Beurteilungen der Niederohmigkeit von Verbindungen.

Wie bei allen Beurteilungen von Erdungsanlagen ist grundsätzlich das Vorhandensein einer aussagekräftigen Dokumentation mit Lageplänen und Beschriftungen der PA-Leiter und PA-Schienen erforderlich.

Eine einfache und zielführende Beurteilung wird letztendlich durch die Vermeidung von Schleifen innerhalb der Blitzschutz- und Erdungsanlage möglich sein. Überdies ist der baumartige Aufbau des Potentialausgleichs ein Garant für bessere Meßbarkeit und für klaglose Funktion von in der Anlage befindlichen Systemen der Informationstechnik.

3. Beurteilung der Schleifenimpedanz

Abschließend wird im Zusammenhang mit den Veränderungen durch die Umstellung der Versorgungsnetze auf Nullung die Messung und Beurteilung der Schleifenimpedanz behandelt.

Für die Beurteilung der Nullung stellt die Beurteilung der Ausschaltbedingung (ehemals 1. Nullungsbedingung) eine Schlüsselaufgabe dar. Die Ausschaltbedingung gewährleistet, daß im Fehlerfall ein derart großer Kurzschlußstrom fließen kann, damit die vorgelagerte Sicherung auslösen kann.

Diese grundsätzliche Bedeutung der Ausschaltbedingung setzt sich bis zu den Versorgungsstellen der Verbrauchsmittel in der elektrischen Anlage (Steckdosen, Leuchten,..) fort. Die Ausschaltbedingung muß auch bei Vorhandensein eines Fehlerstromschutzschalters zum Aufbau von Nullung mit Zusatzschutz erfüllt sein. Daher ist die Überprüfung der Ausschaltbedingung auch an Anlagenteilen nach Fehlerstromschutzschaltern mit Auslösefehlerennströmen von maximal 30 mA

erforderlich. Die meßtechnische Umsetzung dieser Aufgabe kann mittels geeigneter Meßgerätewahl durchgeführt werden.

Die Schleifenimpedanz (speziell wenn zu groß) ist in elektrischen Anlagen für folgende Störungen verantwortlich:

Spannungsschwankungen

Spannungsabfälle

Flickererscheinungen

Um diese Störungen auszuschalten, reicht es eine Verringerung der Schleifenimpedanz durch Querschnittsvergrößerung auszuführen.

Das Funktionsprinzip nahezu jeder Schleifenimpedanzmessung beruht auf der Messung des Spannungsabfalls durch einen bekannten Meßstrom an der Netzimpedanz. Im Fall der Belastung verringert sich durch den internen Spannungsabfall die Ausgangsspannung eines Stromkreises.

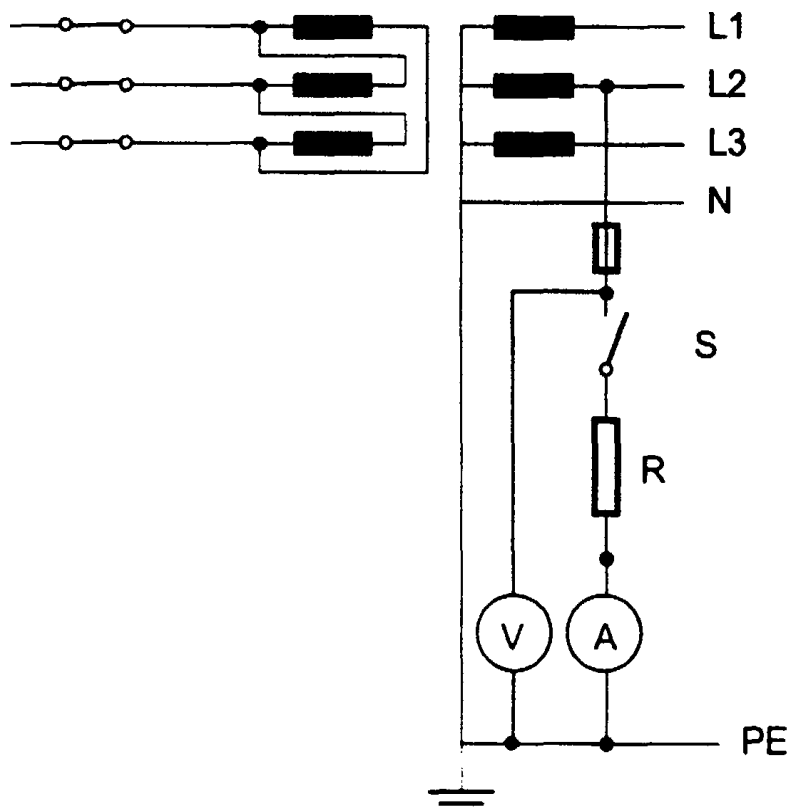


Abb. 9: Prinzip der Schleifenimpedanzmessung

$$Z_{\text{Schl}} = (U_1 - U_2) / I_R$$

Schalter S offen: $U_1, I_R = 0A$

Schalter S geschlossen: $U_2, I_R = U_{L2}/R$

In der Praxis treten im Zuge der Schleifenimpedanzmessung immer wieder Probleme auf, die als stark schwankende Anzeige, scheinbar instabile Meßwerte sichtbar werden.

Ursache für diese Erscheinungen sind:

- * die äußerst geringe Impedanz der Schleife
- * Störungen durch Spannungsschwankungen durch Belastungswechsel im Netz und Schaltvorgängen der Trafostufenschalter
- * Störungen durch Oberschwingungen

Abhilfe kann durch entsprechende Amplituden der Meßströme erreicht werden, wobei diese Möglichkeit in erster Linie eine Frage des Gewichtes des jeweiligen Meßgerätes und der Abfuhr der Verlustwärme darstellt. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Ausführung mehrerer Einzelmessungen und Zusammenfassung mit Mittelwertbildung für ein stabiles Meßergebnis.

Abschließend kann nur mehr die Meßdurchführung während störungsarmer Zeiten empfohlen werden (Nachtmessung oder automatischer Meßablauf und Aufzeichnung der Ergebnisse in einem Speicher).

Wien, 11. Juni 2001

Dipl.-Ing. Michael Hirsch