

Versuch: Erdungsmessungen

Teil I - Theoretische Grundlagen

Ausgabe: Dezember 1971

Bearbeiter: Dr.-Ing. Kindler

I	<u>Inhaltsübersicht</u>	<u>Seite</u>
1.	Versuchsziel	1
2.	Ermittlung des spezifischen Erdwiderstandes	1
2.1.	Das Erdreich als elektrischer Leiter	1
2.2.	Notwendigkeit der Messung	4
2.3.	Die 4-Punkt-Methode	6
2.3.1.	Theoretische Grundlagen	6
2.3.2.	Wenner-Anordnung	8
2.3.3.	Schlumberger-Anordnung	9
2.3.4.	Kartierung	10
2.3.5.	Tiefensondierung	11
2.3.5.1.	Allgemeine Problematik	11
2.3.5.2.	Auswertung der Meßergebnisse	14
2.3.5.2.1.	Allgemeines	14
2.3.5.2.2.	Auswertung von Zweischichtkurven	15
2.3.5.2.3.	Auswertung von Mehrschichtkurven	19
2.3.5.3.	Spezielle Probleme	29
3.	Ermittlung des Erdungswiderstandes	31
3.1.	Notwendigkeit der Messung	31
3.2.	Allgemeine Grundlagen	32
3.3.	Erdungsanlagen geringer Ausdehnung	34
3.4.	Erdungsanlagen großer Ausdehnung	35
3.4.1.	Allgemeines	35
3.4.2.	Strom-Spannungs-Meßmethode	36
3.4.3.	Strom-Leistungs-Meßmethode	38
3.5.	Spezielle Probleme	40
4.	Ermittlung von Schritt- und Berührungsspan- nungen	44
5.	Erdungsmeßgeräte	45
5.1.	Prinzip der Behrend-Schaltung	45
5.2.	Erdungsmeßgerät Type A 307	48
5.3.	Erdungsmeßgerät Type A 317	50
6.	Literatur	52

II	<u>Übersicht der Bilder</u>	Seite
Bild 1:	Wettstein-Kurven	4
Bild 2:	Allgemeine 4-Punkt-Anordnung	6
Bild 3:	Wenner-Anordnung	9
Bild 4:	Schlumberger Anordnung	10
Bild 5:	Elektroden-Anordnung bei der Kartierung	11
Bild 6:	Aufschlußgebiete bei Wenner und Schlumberger.	13
Bild 7:	Möglicher geoelektrischer Aufbau des Erd- reichs	14
Bild 8:	Ebenes Mehrschichtmodell	15
Bild 9:	Prinzipieller Verlauf der gemessenen Kurven $S_B = f(a)$	16
Bild 10:	Berechnete Zweischichtkurven	17
Bild 11:	Auswertung von Zweischichtkurven	18
Bild 12:	Beispiel einer Vierschichtkurve	20
Bild 13:	Hilfspunktkurven (A-Diagramm)	22
Bild 14:	Hilfspunktkurven (VA-Diagramm)	23
Bild 15:	Hilfspunktkurven (H-Diagramm)	24
Bild 16:	Hilfspunktkurven (VH-Diagramm)	25
Bild 17:	Auswertung einer Dreischichtkurve	
	Bild 17.1.	27
	Bild 17.2.	27
	Bild 17.3.	28
	Bild 17.4.	29
Bild 18:	3-Elektroden-Anordnung zur Messung des Erdungswiderstandes	32
Bild 19:	Potentialverlauf bei der Messung von R_E	34
Bild 20:	Schaltbild für die Strom-Spannungs-Meßmethode bei ausgedehnten Erdungsanlagen	39
Bild 21:	Rückläufige Methode	42
Bild 22:	Extrapolationsmethode	43
Bild 23:	Prinzip der Behrend-Schaltung	46
Bild 24:	Schaltung des Erdungsmeßgerätes Type A 307 ..	49
Bild 25:	Schaltung des Erdungsmeßgerätes Type A 317 ..	51

III.

Übersicht der Tabellen

Seite

Tabelle 1: Spezifischer Widerstand geologischer Leiter	5
-----------------------------------------------------------------	---

1. Versuchsziel

Die Praktikumssteilnehmer sollen mit den theoretischen Grundlagen sowie den wichtigsten Methoden der meßtechnischen Ermittlung des spezifischen Erdwiderstandes (geoelektrische Sondierung) und des Erdungswiderstandes vertraut gemacht werden. Dabei besteht eine wesentliche Aufgabe in der praktischen Anwendung der in der Elektroenergieversorgung üblichen Meßgeräte sowie in der Übung bei der Auswertung der Meßergebnisse.

2. Ermittlung des spezifischen Erdwiderstandes

2.1. Das Erdreich als elektrischer Leiter

Immer dann, wenn das Erdreich mit dem Elektroenergiesystem in leitender Verbindung steht (beabsichtigt oder zufällig), führt das auf Grund der elektrischen Leitfähigkeit des Erdreichs zu speziellen Problemen. Hierzu gehören z.B. die Auslegung von Erdungsanlagen, die Reduktionsfaktorberechnung, das Verhalten von Wanderwellen auf Freileitungen, die Fortleitung von Streuströmen u. dgl. Aus diesem Grunde seien zunächst einige Betrachtungen über die physikalischen Zusammenhänge hinsichtlich der Leitfähigkeit des Erdreichs angestellt.

Die geologischen Leiter (Erdreich) setzen sich aus festen mineralischen, aus flüssigen und gasförmigen Bestandteilen zusammen. Die in Gesteinen und Sedimenten enthaltenen Minerale besitzen mit Ausnahme einiger Erze im trockenen Zustand einen derartig hohen spezifischen Widerstand (in der Erdungstechnik üblicher als Leitfähigkeit), daß sie als Nichtleiter angesehen werden können. Das eingeschlossene Gasvolumen (meist Luft) ist ebenfalls als nichtleitend zu betrachten. Der spezifische Widerstand wird somit in der Hauptsache durch die flüssigen Bestandteile (Wasser) bestimmt. Das Wasser befindet sich in den Poren zwischen den festen Partikeln.

Damit hat zwangsläufig der spezifische Widerstand des Porenwassers selbst einen wesentlichen Einfluß auf den spezifischen Widerstand des geologischen Leiters. Der spezifische

Widerstand von Wasser beträgt in Abhängigkeit von seiner Härte 1 ... 200 Ω m. Dabei liegt Gletscherwasser bei 200 Ω m, weiches Flußwasser bei 100 ... 200 Ω m, Trinkwasser bei 50 ... 100 Ω m, hartes Wasser bei 10 ... 50 Ω m und Salzwasser je nach Salzgehalt bei 1 ... 10 Ω m.

Neben dem spezifischen Widerstand des Porenwassers beeinflussen das Porenvolumen, die Gestalt und Anordnung der festen Partikel sowie der Füllungsgrad der Poren mit Wasser sehr wesentlich den spezifischen Widerstand des geologischen Leiters. Der Füllungsgrad der Poren mit Wasser ist sehr unterschiedlich. Grobporige geologische Leiter (z.B. Kies) sind im Bereich des Grundwassers nahezu vollständig mit Wasser angefüllt, während feinputrige (z.B. Ton, Lehm) auch hier noch Gase enthalten. Oberhalb des Grundwasserspiegels dagegen halten feinputrige geologische Leiter das Wasser besser als grobporige.

Die Größe des bei frisch abgelagerten Sedimenten hohen Porenvolumens nimmt mit zunehmendem Alter der Ablagerungen (steigende Verfestigung) bis auf sehr geringe Werte ab. So beträgt z.B. bei Tonen, lockeren Böden und Sanden das Porenvolumen 35 ... 55 % des Gesamtvolumens, bei Sandstein, Schiefer und Kalkstein 4 ... 34 % und bei sehr alten kristallinen Gesteinen wie Gneis und Granit 0,02 ... 1,85 %. Der spezifische Widerstand steigt daher mit zunehmendem Alter der Ablagerungen an.

Jüngere Gesteine und Sedimente sind gewöhnlich relativ gut löslich. Die aus ihnen herausgelösten Salze ergeben mit dem Porenwasser gute Elektrolyte und somit einen geringen spezifischen Widerstand. Eine Ausnahme bilden Sande und Kiese, die praktisch nicht löslich sind. Sind diese so geordnet, daß sie nicht von leitenden Wässern durchtränkt werden (Oberflächenschicht), so weisen sie zwangsläufig einen hohen spezifischen Widerstand auf. Noch ungünstiger sind die Verhältnisse bei alten kristallinen Gesteinen, da diese weder löslich noch wasserdurchlässig sind.

Das Wasser als bestimmender Faktor des spezifischen Widerstandes geologischer Leiter führt auch zu einem negativen

Temperaturkoeffizienten desselben. Dieser negative Temperaturkoeffizient hat oberhalb des Gefrierpunktes seine Ursache in der mit sinkender Temperatur geringeren Löslichkeit der Salze. Beim Erreichen und Unterschreiten des Gefrierpunktes kommt es schließlich sogar zu einem sprunghaften Anstieg des spezifischen Widerstandes geologischer Leiter. Daraus ist die wichtige Schlussfolgerung abzuleiten, daß die Eingrabbtiefe eines Erders immer größer als die Frosteindringtiefe sein muß, um auch im Winter die Erderwirkung zu erhalten.

50st

Bei vorgegebener Struktur der festen Partikel geologischer Leiter besteht also zwischen der Wassermenge sowie der Temperatur einerseits und dem spezifischen Widerstand andererseits ein direkter Zusammenhang. Im Bereich der Erdoberfläche besteht jedoch auch zwischen der Wassermenge sowie der Temperatur des geologischen Leiters einerseits und der Luftfeuchtigkeit sowie der Lufttemperatur andererseits ein direkter Zusammenhang. Damit muß es im Bereich der Erdoberfläche zwangsläufig einen Zusammenhang zwischen dem spezifischen Widerstand und der Witterung geben. Da im langjährigen Mittel der jeweiligen Jahreszeit (Monat) eine ganz bestimmte Witterung zugeordnet werden kann, wird es also im Bereich der Erdoberfläche zu einer jahreszeitlichen Schwankung des spezifischen Widerstandes kommen. Diese Erscheinung wurde von verschiedenen Fachleuten untersucht. An dieser Stelle seien die Ergebnisse von Wettstein (Wettstein-Kurven) im Bild 1, S. 4, angegeben. Die entscheidende Bedeutung dieser Wettsteinkurven liegt in der damit möglichen Umrechnung des zu einem beliebigen Zeitpunkt im Jahr gemessenen spezifischen Widerstandes auf den maximal zu erwartenden (liegt im Februar vor), der für die Dimensionierung einer Erdungsanlage ausschlaggebend ist. Die Umrechnung erfolgt nach der Beziehung:

$$\rho_{\max} = \frac{\rho_{\text{gemessen}}(t)}{w} \quad (1)$$

ρ_{\max} - maximal zu erwartender spezifischer Widerstand

gemessen (t) -- der zu einem Zeitpunkt t im Jahr
 gemessene spezifische Widerstand
 w -- Wert der Wettstein-Kurve zum Zeit-
 punkt t

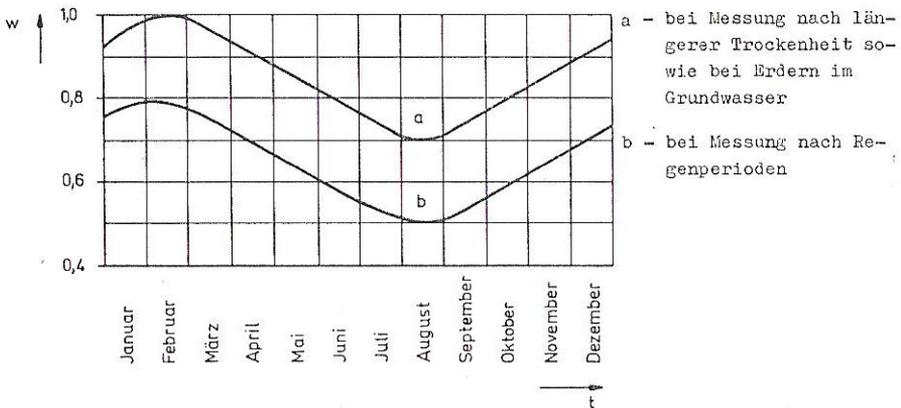


Bild 1 Wettstein - Kurven

Diese Verhältnisse spiegeln sich in der Witterungsabhängigkeit des Ausbreitungswiderstandes von Oberflächenerdern wider. Bei Tiefenerdern geht dieser Effekt verloren, da in einer Tiefe > 3 m unter der Erdoberfläche die Witterung keinen merklichen Einfluß mehr auf die Menge und die Temperatur des Porenwassers des geologischen Leiters ausübt.

2.2. Notwendigkeit der Messung

Die Notwendigkeit einer Messung am jeweiligen Ort folgt unmittelbar aus den vorstehenden Betrachtungen zu den physikalischen Zusammenhängen bei geologischen Leitern. Um einmal diese Erkenntnisse noch quantitativ zu belegen, und zum anderen

Forts. S. 6

Geologischer Leiter	Spezif. Widerstand in Ω m	Richtwerte für ρ in versch. Vorschriften in Ω m
Ackerboden, Humus	10 ... $3 \cdot 10^2$	10^2 1)
Basalt	$2 \cdot 10^4$	
Diabas	$2 \cdot 10^2$... 10^4	
Feldspat	$4 \cdot 10^3$	
Flußsand	10 ... $8 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^2$ 1)
Glimmerschiefer	$5 \cdot 10^2$	
Gneis	$2 \cdot 10^2$... $2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^3$ 2)
Granit	$1,6 \cdot 10^2$... $> 10^5$	$3 \cdot 10^3$ 2)
Grauwacke	$1,6 \cdot 10^3$... 10^4	
Kalkstein	$2 \cdot 10^3$... 10^4	
Lehm	10 ... 10^2	10^2 1)
Löß	25 ... 40	
Mergel	5 ... 90	32 2)
Moorboden	10 ... 50	30 1)
Porphyr	10 ... $> 10^5$	
Porphyrit	60 ... 10^4	
Quarz	$> 10^4$	
Quarzit	10 ... $> 10^5$	$5 \cdot 10^2$ 2)
Sandboden	10 ... 10^4	10^3 1)
Sandstein	10^2 ... $> 10^5$	10^2 2)
Schiefer	10 ... $> 10^5$	
Schotter	10 ... 10^4	$3 \cdot 10^3$ 1)
Syenit	$2,5 \cdot 10^3$... $> 10^5$	
Ton	16 ... $15 \cdot 10^3$	50 2)
Tonerde	6 ... $6 \cdot 10^2$	10^2 1)

1) VDE 0141 / 11.58

2) VDE 0228/...61 und CCIF

Tabelle 1 Spezifischer Widerstand geologischer Leiter

eine Vorstellung über die Größenordnung des spezifischen Widerstandes geologischer Leiter zu vermitteln, ist in Tabelle 1, S. 5, eine Übersicht angegeben. Dabei gelten die niedrigen Werte für stark verwittertes Gestein bzw. für stark zerklüftete Zonen, während die hohen Werte für festes Gestein gelten. Dabei wird noch einmal ganz deutlich, wie problematisch das Arbeiten mit Richtwerten ist, wie sie in den Vorschriften verschiedener Länder angegeben werden (letzte Spalte in Tabelle 1). Die in der DDR gültige Vorschrift TGL 200-0603 verlangt grundsätzlich eine meßtechnische Ermittlung des spezifischen Ausbreitungswiderstandes am jeweiligen Ort nach der 4-Punkt-Methode (4-Elektroden-Verfahren).

2.3. Die 4-Punkt-Methode

2.3.1. Theoretische Grundlagen

Die prinzipielle Anordnung ist im Bild 2 aufgezeichnet.

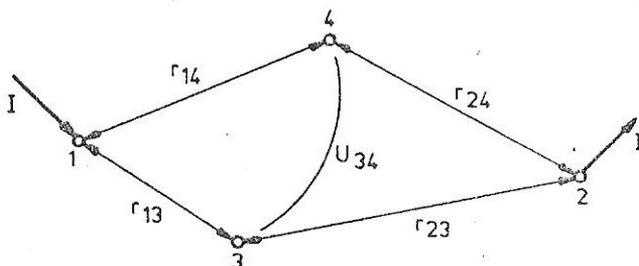


Bild 2 Allgemeine 4-Punkt-Anordnung

Hierbei wird im Erdreich ein Strömungsfeld aufgebaut, indem am Punkt 1 (Erde E) ein bekannter Strom I in das Erdreich eintritt und am Punkt 2 (Hilfserde H) wieder aus dem Erdreich austritt. Fernerhin wird die Spannung U_{34} zwischen den Punkten 3 (Sonde 1) und 4 (Sonde 2), die durch das aufgebaute

Strömungsfeld entsteht, gemessen. Unter der Voraussetzung eines homogenen und isotropen Erdreichs kann dann mit diesen beiden Größen der spezifische Widerstand des Erdreichs wie folgt berechnet werden:

$$\varrho = \frac{U_{34}}{I} \cdot K \quad (2)$$

K - Konfigurationszahl
(berücksichtigt die Geometrie der Anordnung)

Die Konfigurationszahl läßt sich unter der Voraussetzung halbkugelförmiger Erder (bedeutet kleine Einschlagtiefe der Elektroden 1 ... 4 gegenüber den Abständen der Elektroden untereinander) berechnen. Aus der Vorlesung ist für das Potential an einem beliebigen Punkt im felderfüllten Raum, wenn ein Strom I über einen Halbkugelerder in das Erdreich eintritt, folgende Beziehung bekannt:

$$\varphi(r) = \frac{\varrho I}{2\pi r} \quad (3)$$

Die Potentiale an den Punkten 3 und 4 werden verursacht durch die Ströme I (Richtung beachten) an den Punkten 1 und 2. Damit ergibt sich:

$$\varphi_3 = \frac{\varrho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{13}} - \frac{1}{r_{23}} \right) \quad (4)$$

$$\varphi_4 = \frac{\varrho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{14}} - \frac{1}{r_{24}} \right) \quad (5)$$

Daraus folgt die Spannung U_{34} zu:

$$U_{34} = \varphi_3 - \varphi_4 = \frac{\varrho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{13}} - \frac{1}{r_{14}} - \frac{1}{r_{23}} + \frac{1}{r_{24}} \right) \quad (6)$$

Diese Gleichung nach ϱ umgestellt liefert:

$$\varrho = \frac{U_{34}}{I} \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{13}} - \frac{1}{r_{14}} - \frac{1}{r_{23}} + \frac{1}{r_{24}}} \quad (7)$$

Durch einen Koeffizientenvergleich mit Gleichung (2) gilt schließlich:

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{13}} - \frac{1}{r_{14}} - \frac{1}{r_{23}} + \frac{1}{r_{24}}} \quad (8)$$

Im Prinzip wäre es möglich, die Konfigurationskonstante auch auf der Basis einer anderen Elektrodenform zu bestimmen (z.B. Staberder). Es ist bei der praktischen Durchführung der Messung nur darauf zu achten, daß man der der Ableitung für K zugrunde gelegten Elektrodenform nahekommt. Beim Arbeiten mit der Gleichung (8) bedeutet das, daß die als Elektroden in der Regel verwendeten Spieße je nach Elektrodenabstand mehr oder weniger tief in das Erdreich hineinragen sollten.

Folgende Faustregel ist zu beachten [4]:

Eindringtiefe der Spieße $\leq 10\%$ des geringsten Abstandes
zu einer benachbarten Elektrode

Dabei sollte man die Spieße jedoch maximal 1 m in das Erdreich hineintreiben, da man sie ansonsten schwer wieder herausbekommt. Das tiefere Eintreiben der Spieße bei größerem Elektrodenabstand bringt den Effekt mit sich, daß der Ausbreitungswiderstand der Elektroden geringer wird, was im Zusammenhang mit den verwendeten Meßgeräten (s. Abschnitt 5) bedeutungsvoll ist. Damit fließt bei vorgegebener Spannung zwischen den Elektroden 1 und 2 ein größerer Strom I.

2.3.2. Wenner-Anordnung

Die Wenner-Anordnung (benannt nach Wenner) zählt zu den symmetrischen 4-Punkt-Anordnungen. Hierbei sind die 4 Elektroden auf einer Geraden jeweils im Abstand a angeordnet (s. Bild 3, S. 9). Damit vereinfacht sich die Gleichung (8) wesentlich. Man erhält für die Konfigurationszahl:

$$K = 2\pi a \quad (9)$$

Diese Wenner-Anordnung stellt in der Elektroenergieversorgung für die Tiefensondierung die am weitesten verbreitete Methode

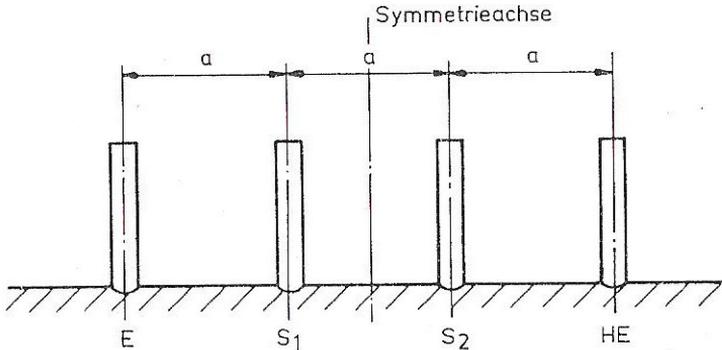


Bild 3 Wenner-Anordnung

dar, worauf später noch eingegangen wird.

2.3.3. Schlumberger-Anordnung

Die Schlumberger -Anordnung (benannt nach Schlumberger) zählt ebenfalls zu den symmetrischen 4-Punkt-Anordnungen. Hierbei sind die 4 Elektroden wiederum auf einer Geraden, jedoch in unterschiedlichem Abstand angeordnet (s. Bild 4, S. 10). Die Beziehung für die Konfigurationszahl lautet hier:

$$K = \pi \frac{L^2 - d^2}{2d} \quad (10)$$

Die Schlumberger-Anordnung hat ebenfalls im Zusammenhang mit der Tiefensondierung ihre wesentliche Bedeutung.

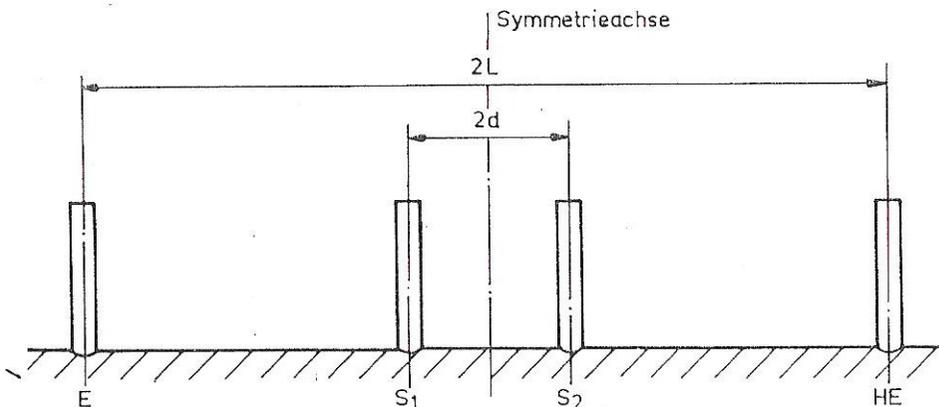


Bild 4 Schlumberger-Anordnung

2.3.4. Kartierung

Bei der Kartierung geht es darum, sich einen Überblick über die Widerstandsverhältnisse des Erdreichs unterhalb eines bestimmten Geländes (Kraftwerks- oder Umspannwerksbaustelle) zu verschaffen. Es wird gewissermaßen eine Widerstandskarte dieses Geländes aufgestellt. In diesem Falle ist es rationell, die 4 Elektroden so anzuordnen, daß sie eine Fläche einschließen und den jeweiligen Meßwert der eingeschlossenen Fläche zuzuordnen. Als Form der eingeschlossenen Fläche wählt man zweckmäßigerweise ein Rechteck oder Quadrat (s. Bild 5, S. 11). Damit ist es erstens möglich, ein vorgegebenes Gelände lückenlos zu erfassen und zweitens ist bei benachbarten Rechtecken bzw. Quadraten jeweils nur ein Umstecken von zwei Elektroden erforderlich. Mit den Bezeichnungen im Bild 6 erhält man auf der Basis von Gleichung (8) hier folgende Konfigurationszahl:

$$K = \pi \frac{b\sqrt{a^2 + b^2}}{\sqrt{a^2 + b^2} - b} \quad (11)$$

Gleichung (2) führt dabei zu einem scheinbaren spezifischen Widerstand ϱ_B , der seinerseits sehr wesentlich von den Elektrodenabständen beeinflusst wird. Man wird also je nach Meßanordnung Kurvenverläufe für ϱ_B in Abhängigkeit von den Elektrodenabständen erhalten. Wegen der praktischen Bedeutung sollen hier nur die Wenner- und die Schlumberger-Anordnung näher betrachtet werden. Es ergibt sich also

1. bei Wenner $\varrho_B = f(a)$
2. bei Schlumberger $\varrho_B = f(L, d)$

Diese Kurven werden in der Praxis auf meßtechnischem Wege gewonnen. Dabei geht man bei Wenner so vor, daß man, beginnend mit einem möglichst kleinen Abstand a , diesen stufenweise vergrößert. Bei Schlumberger dagegen hält man den Abstand d fest und verändert nur den Abstand L stufenweise. Man erhält damit Kurven $\varrho_B = f(L)$ mit d als Parameter. Da der Abstand der beiden äußeren Elektroden ($3a$ bei Wenner bzw. $2L$ bei Schlumberger) die Eindringtiefe des Stromes I zwischen diesen beiden Elektroden in das Erdreich sehr wesentlich beeinflusst, hat man es also durch die Wahl dieses Abstandes in der Hand, bis zu welcher Tiefe unter der Erdoberfläche der geologische Leiter Erdreich in das Meßergebnis eingeht. Die Abstände a bzw. L sind also ein Maß für die Tiefe der Sondierung (Aufschlußtiefe), womit auch die Bezeichnung Tiefensondierung ihre Erklärung gefunden hat. Die Kurven für ϱ_B stellen also gewissermaßen ein Abbild des geoelektrischen Aufbaus des Erdreichs in Abhängigkeit von der Tiefe unter der Erdoberfläche dar (beachten: a bzw. L nicht identisch mit der Aufschlußtiefe).

Bezüglich des bei der Messung erfaßten Erdreichs ergibt sich zwischen dem Wenner- und dem Schlumberger-Verfahren ein wesentlicher Unterschied, der besonders bei großen Aufschlußtiefen (große Abstände $3a$ bzw. $2L$) wirksam wird. Das entscheidende Kriterium für die Messung ist die Spannung U_{34} zwischen den Sonden S_1 und S_2 . Damit wird jeweils das Erdreich zwischen den beiden Äquipotentialflächen φ_{S1} und φ_{S2} erfaßt, in denen diese Sonden liegen (s. Bild 6, S. 13).

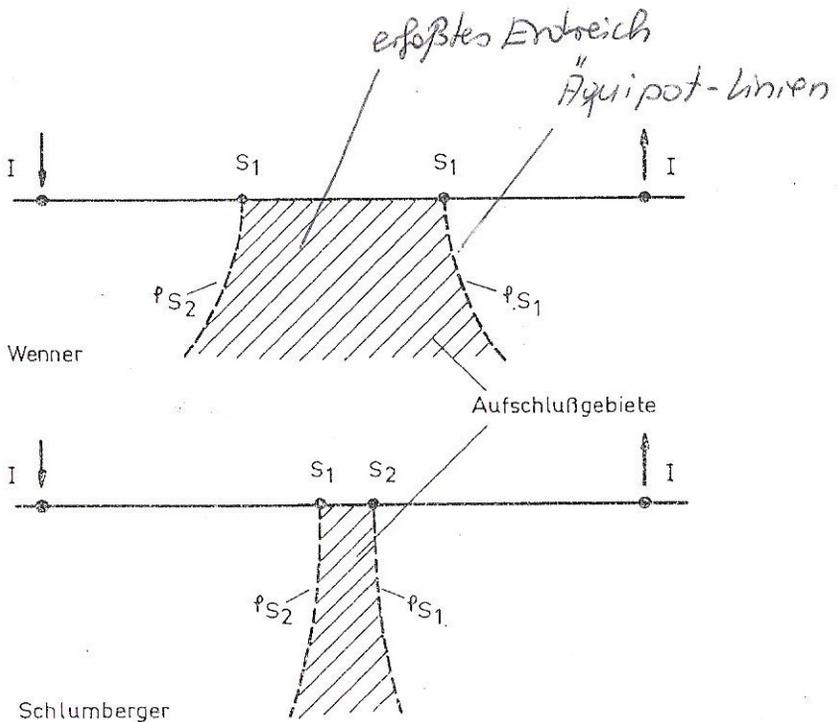


Bild 6 Aufschlußgebiete bei Wenner und Schlumberger

Es ist deutlich zu erkennen, daß bei dem Wenner-Verfahren ein großräumiger Aufschluß erfolgt, während der Aufschluß bei dem Schlumberger-Verfahren mehr punktförmig erfolgt. Das ist eine der wesentlichen Ursachen dafür, weshalb in der Elektroenergieversorgung das Wenner-Verfahren bevorzugt wird, da ja die Stromausbreitung im Erdreich kein punktförmiges Problem ist. Das Schlumberger-Verfahren hat vor allem für geologische Untersuchungen bzw. spezielle Untersuchungen in blitzgefährdeten Gebieten Bedeutung, wenn für einen eng begrenzten Raum in größeren Tiefen Aussagen gemacht werden sollen.

Das Schlumberger-Verfahren bereitet bei großen Aufschlußtiefen auch meßtechnische Probleme. Bei $2d \ll 2L$ ist der Potentialunterschied zwischen S_1 und S_2 sehr gering, so daß die

Empfindlichkeit der Meßgeräte sehr bald nicht mehr ausreicht. Es wird dann eine Vergrößerung des Abstandes $2d$ erforderlich, was wieder zu Anpassungsschwierigkeiten der Meßergebnisse führt. Da es bei diesem Versuch ausschließlich um die Probleme der Elektroenergieversorgung geht, soll nachfolgend nur das Wenner-Verfahren näher betrachtet werden. Für darüber hinausgehende Probleme sei auf die Literatur [2] [3] verwiesen.

2.3.5.2. Auswertung der Meßergebnisse

2.3.5.2.1. Allgemeines

Das Ziel der Auswertung besteht in der Ermittlung des geoelektrischen Aufbaus des untersuchten Erdreichs. Hier ist zunächst mit einer Vielfalt der Möglichkeiten zu rechnen, von denen im Bild 7 ein möglicher Aufbau skizziert ist.

Realität

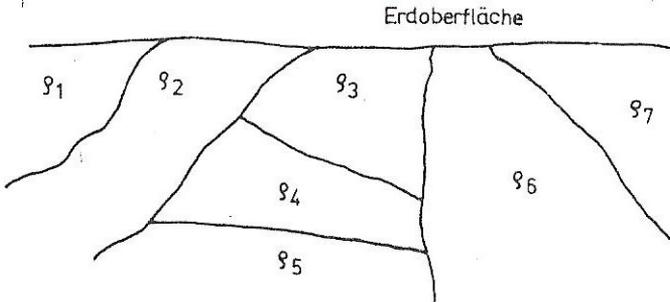
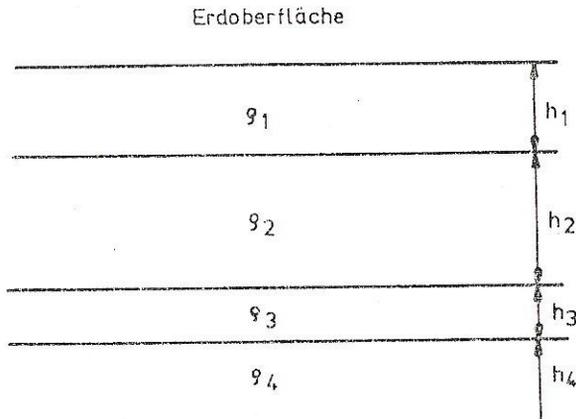


Bild 7 Möglicher geoelektrischer Aufbau des Erdreiches

Dabei stellen die eingezeichneten Grenzen zwischen den einzelnen Gebieten gleichen spezifischen Widerstands bereits gewisse Annahmen dar, denn in Wirklichkeit sind dies mehr oder weniger ausgeprägte kontinuierliche Übergänge. Nun ist erstens die meßtechnische Erfassung eines solch heterogenen Aufbaus unmöglich und zweitens bereitet die mathematische

Behandlung desselben praktisch kaum überwindbare Schwierigkeiten. Man führt daher die Meßergebnisse auf ein Modell zurück, bei dem das Erdreich als aus mehreren ebenen isotropen Schichten bestehend angenommen wird (s. Bild 8).



vereinfachtes Modell

Bild 8 Ebenes Mehrschichtmodell

Diese Modellvorstellung ist für die meisten praktischen Probleme als ausreichend anzusehen. Damit besteht also die Problematik bei der Auswertung der Meßergebnisse in der Bestimmung der spezifischen Widerstände ρ_1 sowie der Mächtigkeiten h_1 der einzelnen Schichten. Hierbei geht man grundsätzlich so vor, daß man auf rechnerischem Wege bestimmte Kurvenscharen für ρ_B mit den Werten ρ_1 als Parameter auf grafischem Wege mit den gemessenen Kurven vergleicht und bei Deckungsgleichheit zwischen der gemessenen und einer gerechneten Kurve die Parameter der gerechneten Kurve abliest.

2.3.5.2.2. Auswertung von Zweischichtkurven

Hierbei besteht das Erdreich aus einer Oberschicht mit der Mächtigkeit h_1 und dem spezifischen Widerstand ρ_1 sowie einer Unterschicht mit der Mächtigkeit $h_2 \rightarrow \infty$ und dem spezifischen Widerstand ρ_2 . Die nach dem Wenner-Verfahren erhaltenen Kurven $\rho_B = f(a)$ haben hier die im Bild 9, S. 16, gezeigten

scheinbarer spezif. Wdl.

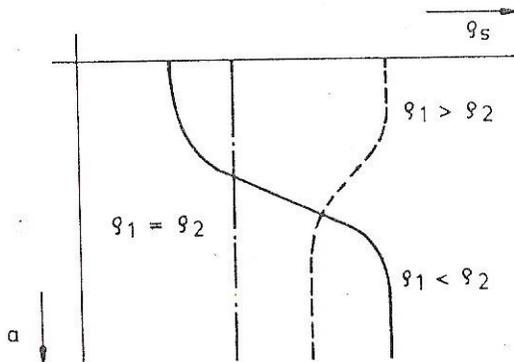


Bild 9 Prinzipieller Verlauf der gemessenen Kurven $g_B = f(a)$

prinzipiellen Kurvenverläufe. Die hiermit zu vergleichenden, auf rechnerischem Wege ermittelten Kurvenscharen erhält man durch die Lösung der Laplace-Gleichung für den allgemeinen Zweischichtfall (g_1 , g_2 und h_1 als Parameter).

Hierfür ergibt sich:

$$\frac{g_B}{g_1} = 1 + 4 \left(\frac{a}{h_1} \right) \sum_{n=1}^{\infty} k_{12} \left[\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{a}{h_1} \right)^2 + 4n^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 \left(\frac{a}{h_1} \right)^2 + 4n^2}} \right] \quad (12)$$

$$k_{12} = \frac{g_2 - g_1}{g_2 + g_1} \quad (13)$$

k_{12} - Refraktionsfaktor

Die auf der Basis der Gleichung (12) errechneten Kurvenscharen sind im Bild 10, S. 17, mit dem Verhältnis g_2/g_1 als Parameter dargestellt. Der im Bild 10 gewählte doppellogarithmische Maßstab bietet für die grafische Auswertung entscheidende Vorteile.

Fortsetzung S. 18

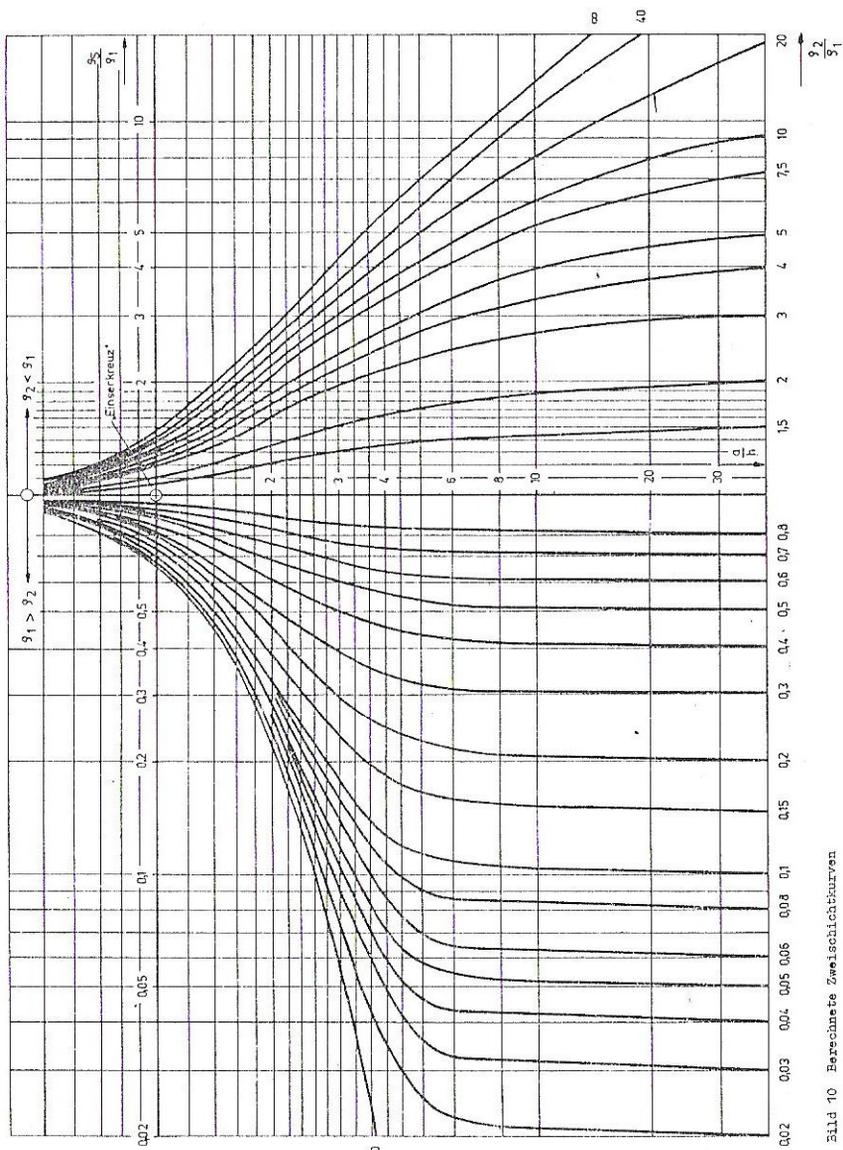


Bild 10 Berechnete Zweischichtkurven

Auf diese Weise liegt der Zusammenhang

$$\log \frac{\varrho_B}{\varrho_A} = f\left(\log \frac{a}{h_A}\right) \quad (14)$$

$$\text{bzw.} \quad \log \varrho_B - \log \varrho_A = f(\log a - \log h_A) \quad (15)$$

vor. Trägt man auch die Meßergebnisse $\varrho_B = f(a)$ im doppelt-logarithmischen Maßstab auf, so liefert das den Zusammenhang

$$\log \varrho_B = f(\log a) \quad (16)$$

Für einen konkreten Fall, mit dem man es bei einem vorliegenden Meßergebnis zu tun hat, sind die Größen ϱ_A und h_A Konstanten, auch wenn sie erst bestimmt werden müssen. Damit stellt aber die Gleichung (15) nichts anderes als die Transformation der Gleichung (16) in ein anderes, parallelverschobenes Koordinatensystem dar (s. Bild 11).

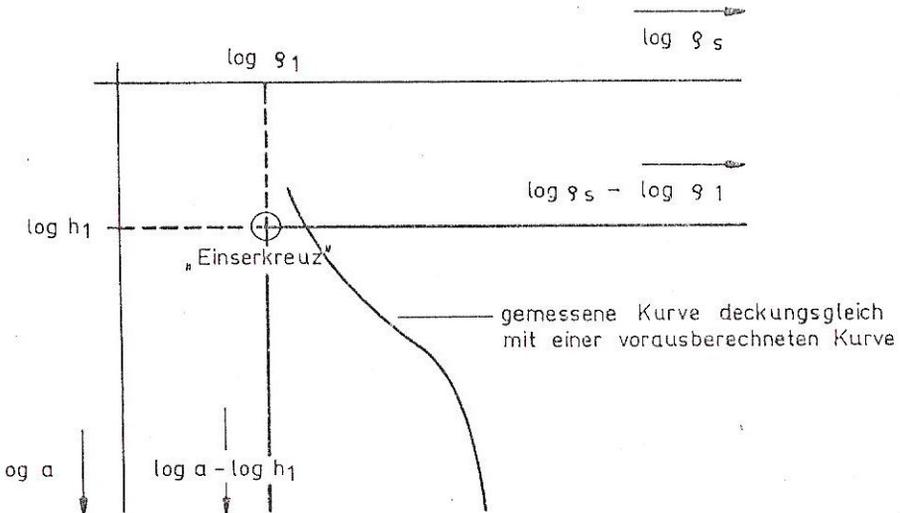


Bild 11 Auswertung von Zweischichtkurven

Daraus kann unmittelbar die Vorgehensweise für die Auswertung von Zweischichtkurven abgeleitet werden:

1. Eintragen der Meßergebnisse $\varrho_g = f(a)$ in ein rechtwinkliges Koordinatensystem mit doppelt-logarithmischem Maßstab auf transparentem Papier.
2. Auflegen des transparenten Papiers mit der gemessenen Kurve auf das Blatt mit den vorausberechneten Zweischichtkurven und bei parallelen Achsen solange verschieben, bis die gemessene Kurve mit einer berechneten Kurve deckungsgleich ist oder zwischen zwei Kurven interpoliert werden kann.
3. Ablesen der Koordinaten des "Einserkreuzes", so genannt, weil an dieser Stelle bei den berechneten Zweischichtkurven $\varrho_g/\varrho_1 = 1$ und $a/h_1 = 1$ gilt, in dem Diagramm mit der gemessenen Kurve (transparentes Papier).
4. Ablesen des Parameters ϱ_2/ϱ_1 an der deckungsgleichen bzw. interpolierten berechneten Kurve. Daraus kann mit dem über die Lage des "Einserkreuzes" bestimmten ϱ_1 der Wert ϱ_2 bestimmt werden.

2.3.5.2.3. Auswertung von Mehrschichtkurven

Im Prinzip kann hier genauso vorgegangen werden wie bei den Zweischichtkurven. Allerdings bringt jede neu hinzukommende Schicht jeweils zwei neue Parameter (ϱ und h) mit, wodurch eine Vielzahl von Varianten entsteht. Das führt dazu, daß zur Auswertung schließlich ein ganzer Atlas vorausberechneter Mehrschichtkurven erforderlich wird. Aus diesem Grunde lag der Wunsch nach einer rationelleren Verfahrensweise nahe. Eine solche stellt das von Hummel angegebene Hilfspunkteverfahren dar. Dabei wird durch rechnerisch ermittelte Hilfspunktkurven ein beliebiges Mehrschichtproblem schrittweise auf Zweischichtprobleme zurückgeführt. Die theoretischen Grundlagen hierzu führen an dieser Stelle zu weit, diesbezüglich sei auf die Literatur verwiesen [5] [6]. Es soll lediglich der formale Ablauf dieser Verfahrensweise aufgezeigt werden.

Die Anzahl der Schichten kann man unmittelbar aus dem Verlauf der gemessenen Kurve $\varrho_g = f(a)$ entnehmen (s. Bild 12, S. 20).

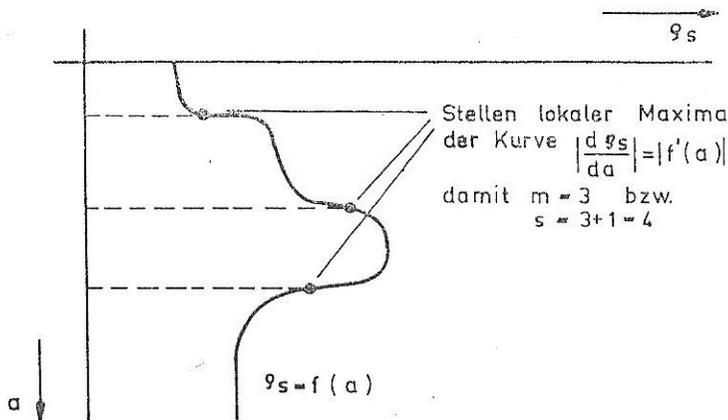


Bild 12 Beispiel einer Vierschichtkurve

Sie ergibt sich nach der Beziehung:

$$s = m + 1 \quad (17)$$

s - Anzahl der Schichten
 m - Anzahl der lokalen Maxima der

$$\text{Kurve } \left| \frac{d g_s}{d a} \right| = |f'(a)|$$

(Speziell bei Schichten geringer Mächtigkeit sowie nur wenig unterschiedlichem g zu den angrenzenden Schichten treten diese Maxima nicht in Erscheinung. In diesen Fällen hilft nur die praktische Erfahrung bzw. zielgerichtetes Probieren weiter).

Die Auswertung geht nun so vonstatten, daß man zunächst den Teil der Kurve $g_s = f(a)$ von der Erdoberfläche bis in den Bereich um die Stelle des ersten lokalen Maximums der Kurve $|f'(a)|$ in der bereits bekannten Weise als Zweischichtkurve auswertet. Damit liegen die Werte g_1 , g_2 und h_1 fest. Anschließend werden auf der Basis der Hilfspunktkurven die beiden oberen Schichten zu einer äquivalenten Schicht mit den Parametern \bar{g} und \bar{h} zusammengefaßt. Damit liegt von der Erdoberfläche bis in den Bereich um die Stelle des zweiten lokalen Maximums der Kurve $|f'(a)|$ wiederum ein Zweischichtproblem vor,

das dann in bekannter Weise ausgewertet werden kann. Dadurch gewinnt man zusätzlich die Werte ρ_3 und h_2 . In dieser Weise fährt man bis zum letzten lokalen Maximum der Kurve $|f'(a)|$ fort und hat damit schließlich die Auswertung beendet.

Die Genauigkeit dieser Vorgehensweise hängt sehr stark von der Mächtigkeit der tieferliegenden Schichten ab. Sie liefert immer dann gute Ergebnisse, wenn die Mächtigkeit der Schichten mit der Tiefe zunimmt. Die Ermittlung dünner Schichten in großer Tiefe, die für Erdungsuntersuchungen glücklicherweise keine Bedeutung haben, ist meist ungenau.

Die konkrete Auswertung soll am Beispiel der Dreischichtkurven nachfolgend näher aufgezeigt werden. Vorangestellt sei zunächst der Verlauf der Hilfspunktkurven. Diese haben je nach vorliegendem Fall einen anderen Verlauf und sind in den Bildern 13 ... 16 dargestellt:

1. Fall: $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3$ (Bild 13, S. 22)

man nennt dies das Diagramm der Anisotropiepunkte (A-Diagramm)

2. Fall: $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ (Bild 14, S. 23)

man nennt dies das Diagramm der verschobenen Anisotropiepunkte (VA-Diagramm)

3. Fall: $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ (Bild 15, S. 24)

man nennt dies das Diagramm der Hummel-Punkte (H-Diagramm)

4. Fall: $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3$ (Bild 16, S. 25)

man nennt dies das Diagramm der verschobenen Hummel-Punkte (VH-Diagramm)

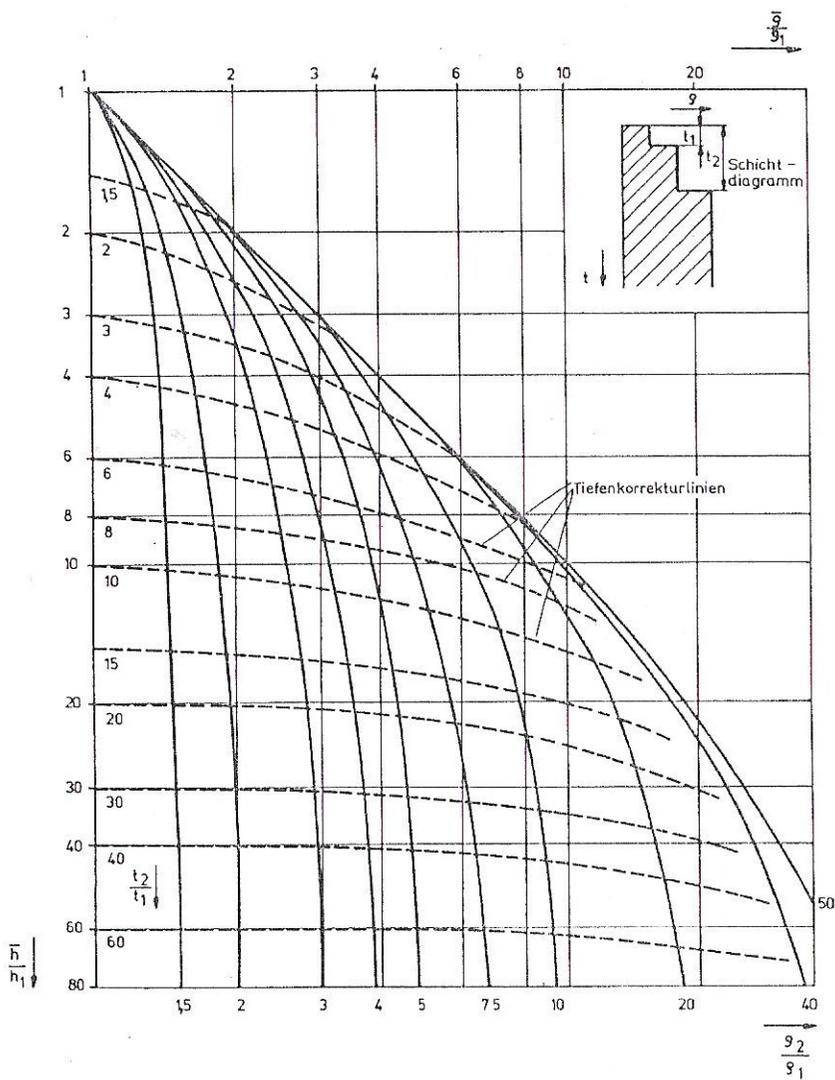


Bild 13 Hilfspunktkurven für den Fall

(A-Diagramm)

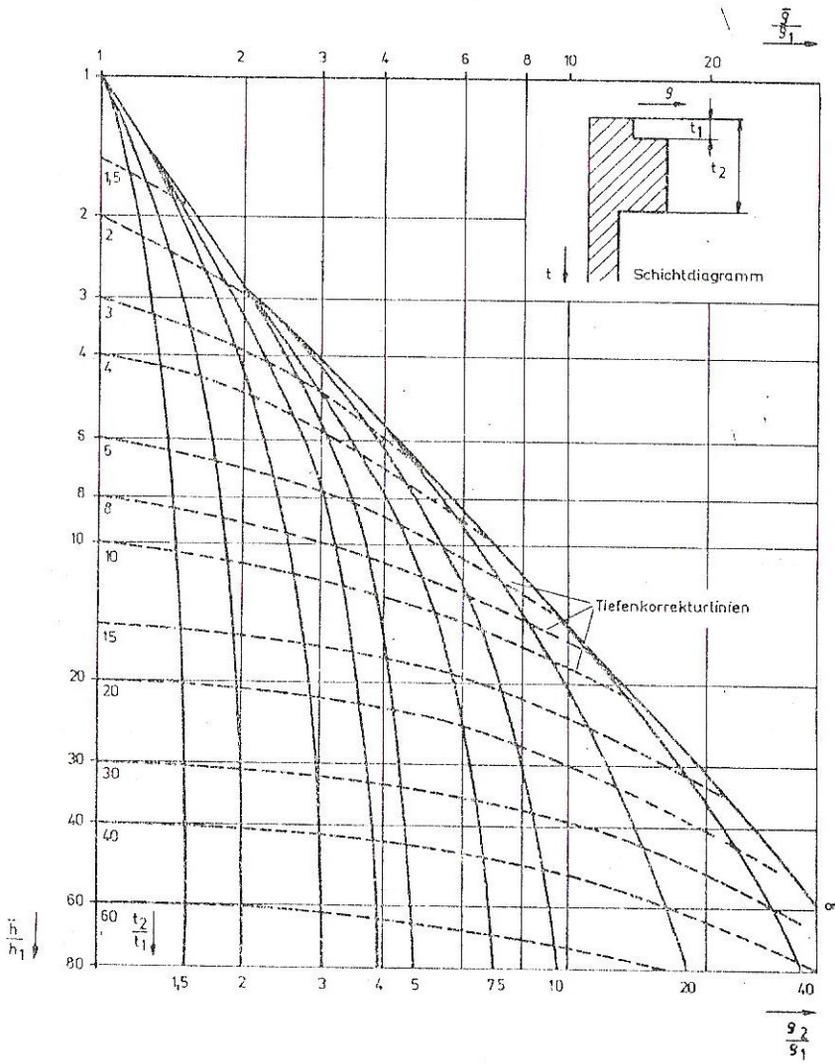


Bild 14 Hilfspunktkurven für den Fall $g_1 < g_2 > g_3$ (VA-Diagramm)

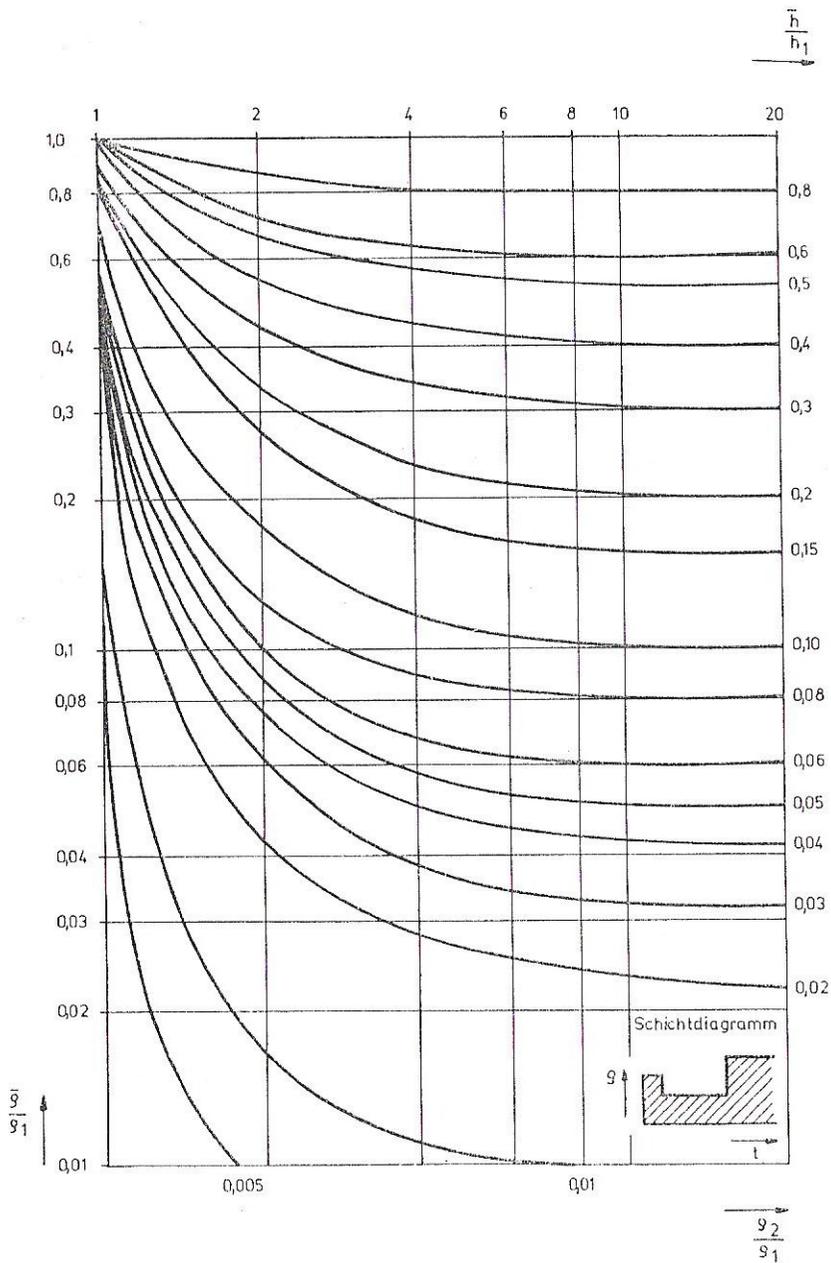


Bild 15: Hilfspunktkurven für den Fall $g_1 > g_2 < g_3$ (H-Diagramm)

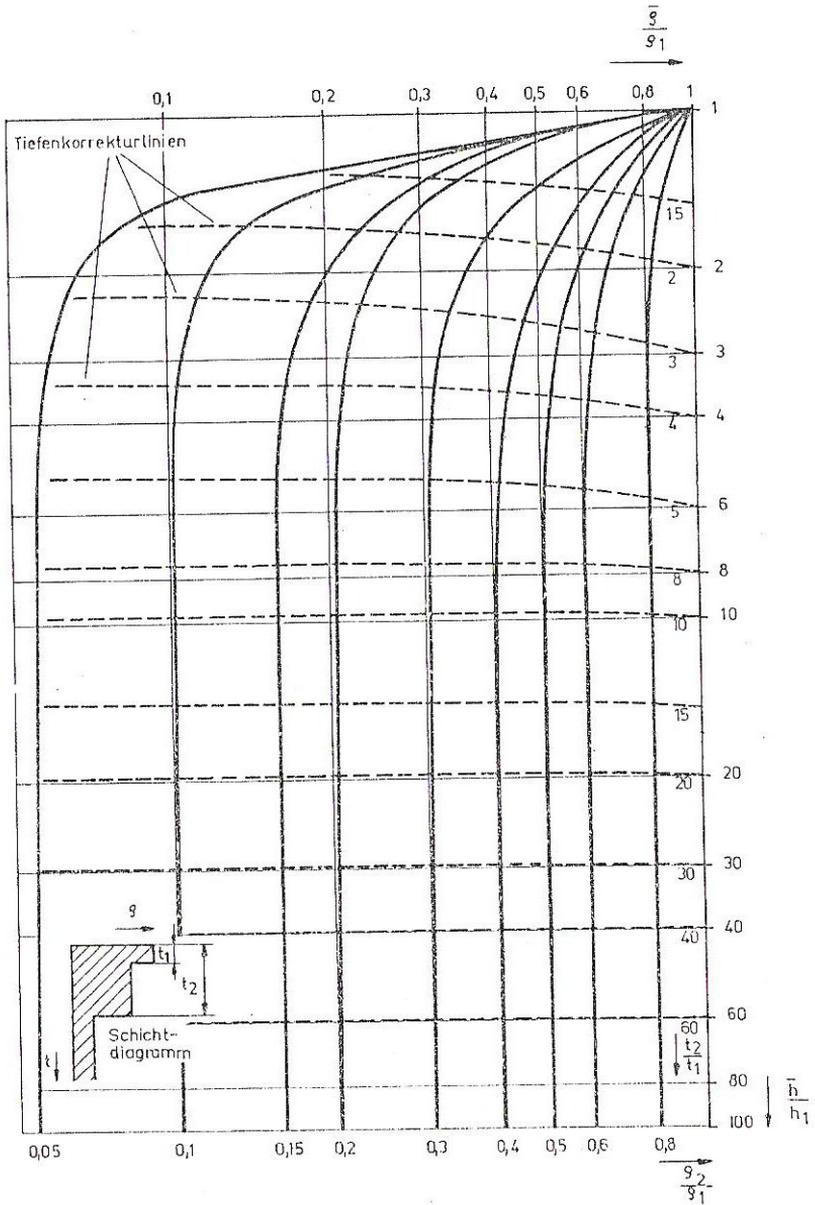


Bild 16 Hilfspunktkurven für den Fall $s_1 > s_2 > s_3$ (VH-Diagramm)

Diese Hilfspunktkurven stellen den Zusammenhang

$$\frac{\bar{g}}{g_1} = f\left(\frac{\bar{h}}{h_1}\right) \text{ mit } \frac{g_2}{g_1} \text{ als Parameter}$$

dar. Außerdem sind in den Diagrammen (außer dem 3. Fall, H-Diagramm) noch Tiefenkorrekturlinien angebracht. Bei diesen dient das Tiefenverhältnis der beiden oberen Schichten

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{h_1 + h_2}{h_1} \quad (19)$$

als Parameter. Dieser Parameter stellt ein Maß für die Korrektur der äquivalenten Mächtigkeit \bar{h} zur Bestimmung der Mächtigkeit h_2 dar. Allgemein gilt:

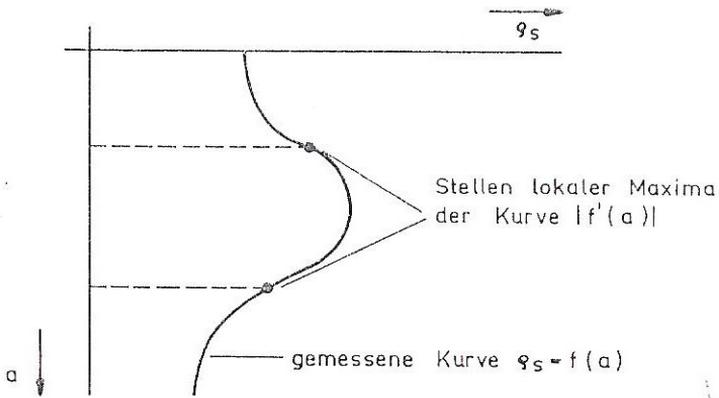
$$h_2 = \bar{h} \cdot K - h_1 \quad (20)$$

K - Korrekturfaktor

(Für den 3. Fall gilt $K = 1$, in den anderen Fällen wird die Korrektur grafisch vorgenommen)

Damit ergibt sich schließlich folgender Ablauf für die Auswertung:

1. Eintragen der Meßergebnisse $g_B = f(a)$ in ein rechtwinkliges Koordinatensystem mit doppelt-logarithmischem Maßstab auf transparentes Papier.
2. Bestimmung des vorliegenden Falles und Markierung der Stellen der lokalen Maxima der Kurve $|f'(a)|$. (Siehe Bild 17.1, S. 27).
3. Zweischichtauswertung bis in den Bereich um die Stelle des ersten lokalen Maximums der Kurve $|f'(a)|$. (Siehe Bild 17.2, S. 27).
4. Auflegen des transparenten Papiers auf die entsprechende Hilfspunktkurve so, daß bei parallelen Koordinatenachsen das "Einserkreuz" von der Zweischichtauswertung unter 3. mit dem Koordinatenursprung der Hilfspunktkurve übereinstimmt. Anschließend die Hilfspunktkurve mit dem gleichen Parameter $g_2/g_1 = x$, wie er sich bei der Zweischichtauswertung unter 3. ergeben hat, übertragen. (S. Bild 17.3).



2. Fall $g_1 < g_2 > g_3$

VA - Diagramm

Bild 17.1 Auswertung einer Dreischichtkurve

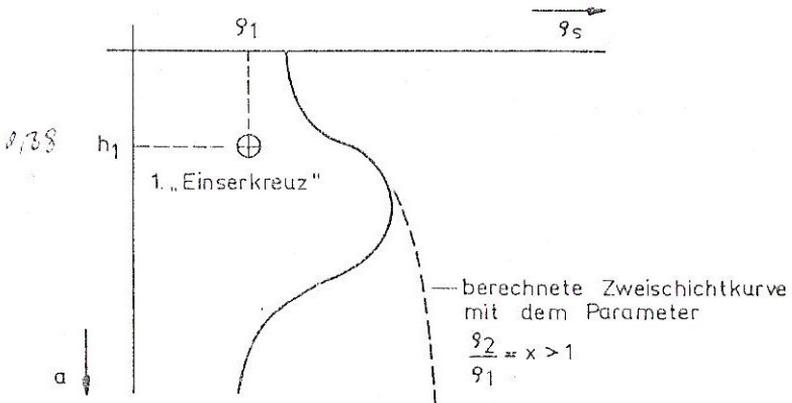


Bild 17.2 Auswertung einer Dreischichtkurve

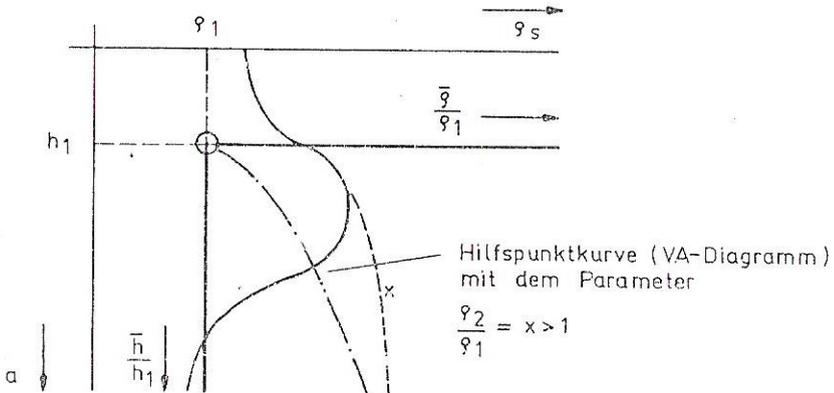


Bild 17.3 Auswertung einer Dreischichtkurve

5. Auflegen des so vorbereiteten transparenten Papiers auf die berechneten Zweischichtkurven und dieses bei parallelen Koordinatenachsen solange entlang der eingetragenen Hilfspunktkurve auf dem "Einserkreuz" verschieben, bis eine berechnete Kurve in dem Bereich um die Stelle des zweiten lokalen Maximums der Kurve $|f'(a)|$ mit der gemessenen Kurve $g_s = f(a)$ deckungsgleich ist, bzw. eine Interpolation möglich ist. (Siehe Bild 17.4, S. 29).
6. Die neue Lage des "Einserkreuzes" liefert unmittelbar die Werte \bar{g} und \bar{h} (s. Bild 17.4, S. 29). Damit ist es auf der Basis des Parameters $g_2/g_1 = y$ der unter 5. ermittelten berechneten Zweischichtkurve möglich, den Wert g_3 wie folgt zu bestimmen:

$$g_3 = \bar{g} \cdot y \quad (21)$$

7. Der Wert h_2 wird auf der Basis von Gleichung (20) bestimmt. Dabei ist im 3. Fall (H-Diagramm) die Berechnung mit $K = 1$ unmittelbar möglich. In den anderen Fällen erfolgt die Auswertung grafisch, indem man die Tiefenkorrekturlinie, die durch das zweite "Einserkreuz" verläuft,

notwendig:

- es sind andere künstliche bzw. natürliche Erder am vorgeesehenen Standort vorhanden,
- aus der Erfahrung ist bekannt (z.B. bei zu schließenden Baulücken in Stadtgebieten), daß die aus z.B. rein konstruktiven Gründen entstehende Erdungsanlage in jedem Fall das Unterschreiten der zulässigen Gefährdungsspannungen garantiert.

Es ist also in vielen Fällen rationeller, an Stelle einer Tiefensondierung bei der Projektierung eine sorgfältige Abschätzung vorzunehmen. Hierzu gehört z.B. durchaus auch eine Messung des Erdungswiderstandes von in der Nähe befindlichen und in jedem Falle zusammenzuschließenden künstlichen und natürlichen Erdern. Mit einer solchen Abschätzung kann man sich durchaus begnügen, da der Nachweis über die Einhaltung der gestellten Forderungen gemäß TGL 200-0603 Bl. 3 unbedingt durch eine Messung (s. nachfolgendes Kapitel) an der errichteten Anlage geführt werden muß.

Bei der Tiefensondierung ist auf eine Reihe von Effekten zu achten, die ihre Ursache in einer natürlichen bzw. künstlichen Beeinflussung des Untergrundes haben. So fallen z.B. die Meßergebnisse in dem Bereich von $0 \leq a \leq 0,5$ m sehr oft aus dem Rahmen, da dieser Bereich sehr stark von der Witterung beeinflusst wird. Hierdurch wird häufig eine besondere Schicht vorgetäuscht. Man sollte diesen Bereich bei der Auswertung dann nicht berücksichtigen, da das Erdmaterial ohnehin unterhalb der Frostgrenze verlagert wird.

Wenn in das Erdreich leitende bzw. nichtleitende Rohre oder Kanäle eingebracht sind, dann täuschen diese ebenfalls gewisse Schichtungen vor. Wenn z.B. parallel zur Meßstrasse in der Nähe eine Rohrleitung oder eine mit dem Erdreich in leitender Verbindung stehende Gleisanlage vorhanden ist, dann wird dadurch eine gut leitende Unterschicht vorgetäuscht. Andererseits wird eine schlecht leitende Unterschicht vorgetäuscht, wenn sich die Meßstrasse über einem Fernheizkanal befindet. Bei der Auswertung der Meßergebnisse sind also unbedingt alle

vorhandenen Informationen über im Erdreich verlegte Objekte mit einzubeziehen. Da diese Einflüsse besonders stark in Erscheinung treten, wenn die Meßstrasse parallel zu solchen Objekten verläuft, sollte man im Zweifelsfalle an der gleichen Stelle zwei senkrecht aufeinanderstehende Meßstrassen auswählen.

3. Ermittlung des Erdungswiderstandes

3.1. Notwendigkeit der Messung

Die Notwendigkeit einer Messung des Erdungswiderstandes ergibt sich aus zwei Gesichtspunkten:

1. Ungenauigkeiten bei der Bestimmung des spezifischen Erdwiderstandes
2. Zeitliche Veränderung der Erdungsanlage

Aus dem 1. Gesichtspunkt ergibt sich die Erkenntnis, daß eine exakte Vorausberechnung der Kenngrößen einer Erdungsanlage im Stadium der Projektierung unmöglich ist. Aus diesem Grunde müssen bei einer neu errichteten Erdungsanlage die elektrischen Kenngrößen entsprechend der Festlegung in TGL 200-0603 Bl. 8 durch eine Messung belegt werden.

Der 2. Gesichtspunkt ist vor allem im Zusammenhang mit der Langlebigkeit von Elektroenergieanlagen bedeutungsvoll. Es ist also damit zu rechnen, daß die Erdungsanlage im Laufe der Zeit durch menschliche Eingriffe verändert wird (z.B. Beseitigung von natürlichen Erdern) bzw. das Erdermaterial durch chemische Einflüsse zerstört wird. Aus diesem Grunde ist es notwendig, daß in gewissen Zeitabständen Kontrollmessungen durchgeführt werden. So verlangt z.B. die TGL 200-0619 Bl. 2 eine Wiederholungsprüfung in Zeitabständen von 6 Jahren.

Da der Erdungswiderstand definitionsgemäß der wirksame Gesamtwiderstand einer Erdungsanlage ist, müssen natürlich auch bei der Messung die tatsächlichen Verhältnisse vorliegen. Es müssen also alle im Betrieb vorhandenen Verbindungen bei der Messung bestehen bleiben. Eine Ausnahme bildet lediglich die

Messung des Stoßerdnungswiderstandes von Freileitungsmasten, wobei die Parallelschaltung mehrerer Masten durch das Erdseil aufgehoben werden muß. Diese Maßnahme ist notwendig, da diese Parallelschaltung durch den Stoßcharakter des Blitzstromes ebenfalls nicht wirksam wird. Da allerdings das notwendige Abheben nicht isolierter Erdseile sehr aufwendig ist, hat man spezielle Maßverfahren hierfür entwickelt. Diese Dinge gehen jedoch über den Rahmen dieses Versuches hinaus, weshalb lediglich auf die Literatur verwiesen sei [1], [2, S. 688], [9], [10].

3.2. Allgemeine Grundlagen

Das Grundprinzip zur Messung des Erdungswiderstandes besteht in der Messung der Potentialverteilung, die sich an der Erdoberfläche zwischen der jeweiligen Erdungsanlage und einem Hilfserder (Erdungsspieß) einstellt, wenn man zwischen diesen beiden Punkten (Erdungsanlage - Hilfserder) einen bekannten Strom I_E durch das Erdreich treibt. Zur Messung der Potentialverteilung bedient man sich einer Sonde (Erdungsspieß), so daß eine 3-Elektroden-Anordnung entsteht. Wenn man diese drei Elektroden auf einer Geraden anordnet, dann ergibt sich die im Bild 18 gezeigte prinzipielle Situation.

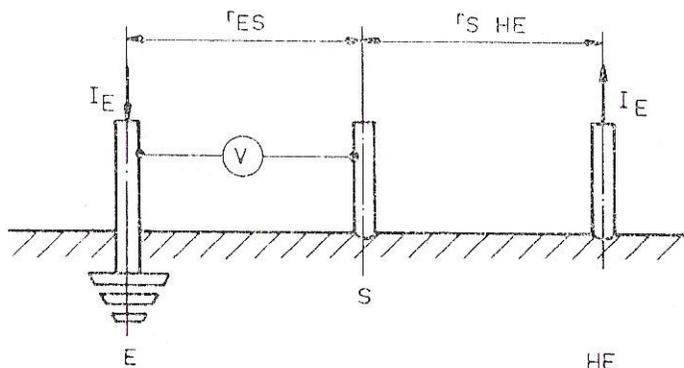


Bild 18 3-Elektroden-Anordnung zur Messung des Erdungswiderstandes

Gemessen wird hierbei die Spannung

$$U_{ES} = \varphi_E - \varphi_S \quad (22)$$

Damit diese Spannung U_{ES} ein unmittelbares Maß für den Erdungswiderstand R_E darstellt, müssen die Abstände r_{ES} und $r_{S HE}$ bestimmte Bedingungen erfüllen. Für den Fall des homogenen Erdreichs lassen sich diese Bedingungen mathematisch wie folgt formulieren. Nimmt man für den Hilfserder analog wie bei der Sondierung wieder eine Halbkugelgestalt an, dann gilt:

$$\varphi_E = I_E R_E - \frac{9 I_E}{2\pi(r_{ES} + r_{S HE})} \quad (23)$$

$$\varphi_S = \frac{9 I_E}{2\pi} \left[f(r_{ES}) - \frac{1}{r_{S HE}} \right] \quad (24)$$

$f(r_{ES})$ - hyperbolisch abfallender Potentialverlauf um den Erder, der wegen einer beliebig anzunehmenden Geometrie derselben nicht explizit angegeben werden kann.

Damit entsteht:

$$U_{ES} = I_E R_E - \frac{9 I_E}{2\pi} \left[f(r_{ES}) - \frac{1}{r_{S HE}} + \frac{1}{r_{ES} + r_{S HE}} \right] \quad (25)$$

Hieraus ist unmittelbar zu erkennen, daß der Zusammenhang

$$U_{ES} = U_E = I_E R_E \quad (26)$$

immer exakter zutrifft, je stärker der Ausdruck in der eckigen Klammer gegen Null strebt. Diese Situation ist aber genau dann gegeben, wenn die Sonde soweit von der Erdungsanlage und von dem Hilfserder entfernt ist, daß ihre örtliche Lage als Bezugs Erde angesehen werden kann. Das bedeutet nichts anderes, als daß der Potentialverlauf von Erder und Hilfserder im Bereich der Sonde bereits soweit abgeflacht ist, so daß dort ein horizontaler Potentialverlauf vorliegt (s. Bild 19, S. 34). Dieser horizontale Bereich ist somit ein eindeutiges Kriterium für die Zulässigkeit der Gleichung (26).

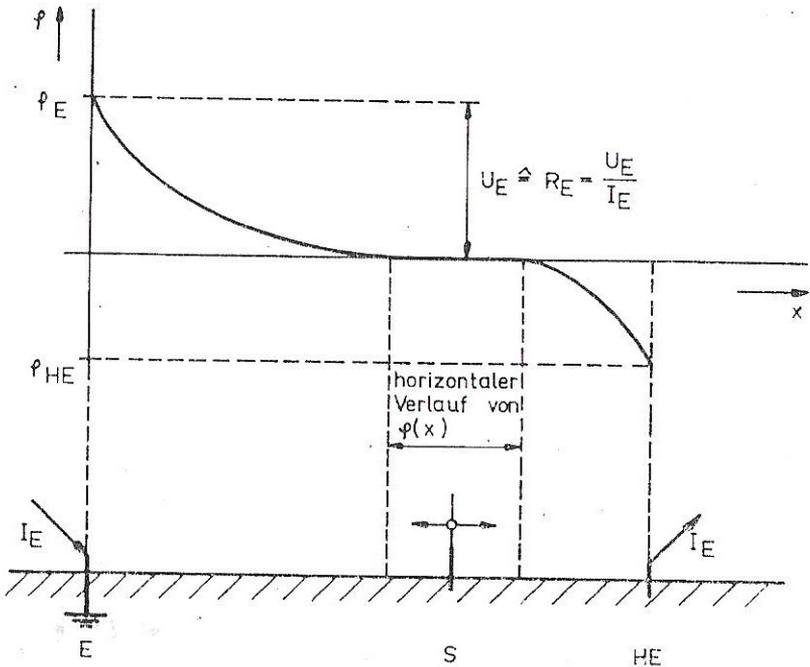


Bild 19 Potentialverlauf bei der Messung von R_E

Man kann die Sonde an einer beliebigen Stelle in diesem horizontalen Bereich anordnen und wird stets die Spannung U_E messen. Da man fernerhin mit einem klar definierten Strom I_E arbeitet, kann man die Skala des Meßinstrumentes z.B. unmittelbar in Widerstandswerten eichen und somit den Wert R_E in dem horizontalen Bereich unmittelbar ablesen.

Im Sinne der Vorschrift (TGL 200-0603 RI. 8) liegt dieser horizontale Bereich vor, wenn man, ausgehend von der gewählten Lage der Sonde, diese jeweils um 20 % der Entfernung (\overline{ES} bzw. \overline{HE}) in Richtung des Erders bzw. Hilferders versetzt und dabei keine größere Abweichung der Meßwerte als 10 % auftritt.

3.3. Erdungsanlagen geringer Ausdehnung

Für Erdungsanlagen geringer räumlicher Ausdehnung (z.B. bei

Mastschaltern, Maststationen, kleine Schalt- und Transformatorstationen) hat man spezielle Erdungsmeßgeräte (s. Abschnitt 5) entwickelt. Diese Meßgeräte besitzen eine geeignete Stromquelle sowie eine entsprechende Meßschaltung mit direkter Anzeige der Widerstandswerte. Hierbei kommt es vor allem darauf an, diese Meßgeräte möglich klein und damit für den Einsatz im Gelände zweckmäßig zu gestalten. Damit sind natürlich der Leistungsfähigkeit der Stromquelle Grenzen gesetzt. Hierbei ist bei flächenhaften Erdern (Maschenerder) darauf zu achten, daß der Abstand $E \overline{HE}$ nicht kleiner als das Fünffache der größten Längenabmessung der Erdungsanlage sein sollte, da man auf diese Weise erfahrungsgemäß sicher einen horizontalen Bereich vorliegen hat.

3.4. Erdungsanlagen großer Ausdehnung

3.4.1. Allgemeines

Bei ausgedehnten Erdungsanlagen von Kraft- und Umspannwerken mit Erdungswiderständen in der Größenordnung $0,01 \dots 0,1 \Omega$ (unmittelbare Sternpunkterdung) reicht die Leistungsfähigkeit (einige Milliampere) der in den Erdungsmeßgeräten vorhandenen Stromquelle nicht mehr aus, um die Erderspannung auf einen für eine zuverlässige Messung notwendigen Wert anzuheben. Außerdem sind in solchen Anlagen immer Störströme vorhanden, die als betriebsfrequente Wechselströme aus Mittelpunktleitern der Niederspannungsanlagen oder Erdschlußspulen bei kapazitiver Unsymmetrie der Leitungen herrühren können. Es ist dann meist keine genaue Messung möglich, da ein Abgleich des Meßgerätes nicht erreicht werden kann. Aus diesen Gründen werden die Messungen mit Strömen in der Größenordnung von $50 \dots 200 \text{ A}$ ausgeführt.

Als Stromquelle wird hierbei ein Eigenbedarfsumspanner der jeweiligen Anlage oder ein aus dem Niederspannungsnetz gespeister Isoliertransformator verwendet. Die prinzipielle Schaltung ist im Bild 20, Seite 39 angegeben. Bei der Verwendung eines Eigenbedarfsumspanners ist dessen Erdung der

Niederspannungswicklung aufzuheben, damit sich darüber nicht ein die Messung verfälschender Stromkreis ausbildet. Als Hilfserder werden hier die in genügender Entfernung und über das Erdseil parallel geschalteten Freileitungsmaste verwendet. Dazu sind folgende Maßnahmen erforderlich:

1. Abtrennung des Erdseils von der Anlage und Isolierung (abheben) desselben von den Masten bis zu einer Entfernung von der Anlage, die größer oder gleich dem fünffachen Wert der größten Längsausdehnung (z.B. Diagonale) der Erdungsanlage ist.
2. Als Zuleitung zum "Hilfserder" (ab Mast i) wird ein Leiterseil verwendet. Dazu muß dieses von der Anlage getrennt und am Mast i mit dem Mast leitend verbunden werden. Aus diesem Grunde ist für den Mast i ein Abspannmast zu wählen, an dem dann nur die Stromschlaufe geöffnet werden muß.

3.4.2. Strom-Spannungs-Meßmethode

Hierbei wird der Erderstrom mit Hilfe eines Stromwandlers an einem Strommesser und die Erderspannung an dem zwischen E und S eingeschalteten Spannungsmesser angezeigt. Der Quotient aus diesen beiden Werten liefert dann den gesuchten Erdungswiderstand. Auf Grund der großen räumlichen Entfernungen ist es wegen der notwendigen zeitgleichen Messung von Strom und Spannung zweckmäßig, mit schreibenden Meßgeräten zu arbeiten. Hierbei ist bei der örtlichen Lage der Sonde darauf zu achten, daß sie sich im Bereich der Bezugserde (horizontaler Bereich) befindet. Weiterhin empfiehlt die Vorschrift zwei senkrecht aufeinanderstehende Meßstrassen auszuwählen, wobei die eine in Richtung der Verbindungslinie vom Erder zum Hilfserder verlaufen soll. Zur Vermeidung von Meßfehlern bei der Spannungsmessung soll hierbei der Innenwiderstand des Spannungsmessers mindest gleich dem zehnfachen Wert des Sondenausbreitungswiderstandes sein. Wenn dies nicht eingehalten werden kann, dann muß der Sondenausbreitungswiderstand mit

einer Wechselstrommeßbrücke bestimmt werden und der gemessene Erdungswiderstand R_E gem. der Anlage wie folgt korrigiert werden:

$$R_E = R_E \text{ gem. } \frac{R_i + R_S}{R_i} \quad (27)$$

R_i - Innenwiderstand des Spannungsmessers

R_S - Sondenausbreitungswiderstand

Für den Fall, daß durch vorhandene größere Stör- und Fremdströme das Meßergebnis stark beeinflußt wird, ist dieser Einfluß durch geeignete Maßnahmen zu eliminieren. Zu diesem Zweck sind folgende Messungen durchzuführen:

1. Bestimmung des Fremdstromeinflusses dadurch, daß man den Stelltransformator abklemmt und zwischen A-B eine Kurzschlußverbindung einlegt. Die dabei registrierten Meßwerte werden mit I_0 und U_0 bezeichnet.
2. Messung von Strom und Spannung bei angeschlossener Stromquelle. Die Meßwerte werden mit I_1 und U_1 bezeichnet.
3. Messung von Strom und Spannung bei veränderter Phasenlage des Meßstromes. Zu diesem Zweck werden die Anschlüsse an dem Eigenbedarfs- bzw. Isoliertransformator vertauscht. Die dabei erhaltenen Meßwerte werden mit I_2 und U_2 bzw. I_3 und U_3 (bei dem Eigenbedarfstransformator sind zwei Vertauschungen durch eine aufeinanderfolgende Verwendung der drei Stränge notwendig) bezeichnet. Auf diese Weise wird die Phasenverschiebung zwischen dem eingespeisten Meßstrom und dem Fremdstrom I_0 eliminiert.

Auf der Basis des Zeigerbildes erhält man dann für die vom Fremdstrom bereinigten Meßwerte folgende Beziehungen:

1. Isoliertransformator als Stromquelle

$$I_M = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2}{2} - I_0^2} \quad (28)$$

$$U_M = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2}{2} - U_0^2} \quad (29)$$

2. Eigenbedarfstransformator als Stromquelle

$$I_M = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2}{3} - I_0^2} \quad (30)$$

$$U_M = \sqrt{\frac{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2}{3} - U_0^2} \quad (31)$$

Den Erdungswiderstand erhält man dann wie folgt:

$$R_E = \frac{U_M}{I_M} \quad (32)$$

3.4.3. Strom-Leistungs-Meßmethode

Aus dem Bild 20, S. 39, geht eindeutig hervor, daß relativ große Entfernungen auch mit den Meßleitungen zu überbrücken sind. Dadurch kann es infolge der hohen Meßströme vor allem dann zu einer erheblichen induktiven Beeinflussung kommen, wenn die Sonde auf der Verbindungslinie zwischen Erder und Hilfserder liegt. Der dadurch mögliche Fehler bei der Spannungsmessung wird bei der Strom-Leistungs-Meßmethode ausgeschlossen. Hierbei handelt es sich um eine Wirkleistungsmessung, so daß die auftretende Beeinflussungsspannung, die entsprechend dem Induktionsgesetz gegenüber dem Meßstrom eine Phasenverschiebung von $\frac{\pi}{2}$ aufweist, bei der Messung nicht erfaßt wird. Diese Wirkleistungsmessung führt aber auf der anderen Seite dazu, daß die Messung bei ausgedehnten Erdungsanlagen, deren Erdungswiderstand eine induktive Komponente aufweist, nicht angewendet werden kann, da diese induktive Komponente nicht erfaßt wird.

Die prinzipielle Schaltung ist im Bild 20, S. 39, angedeutet.

Fortsetzung S. 40

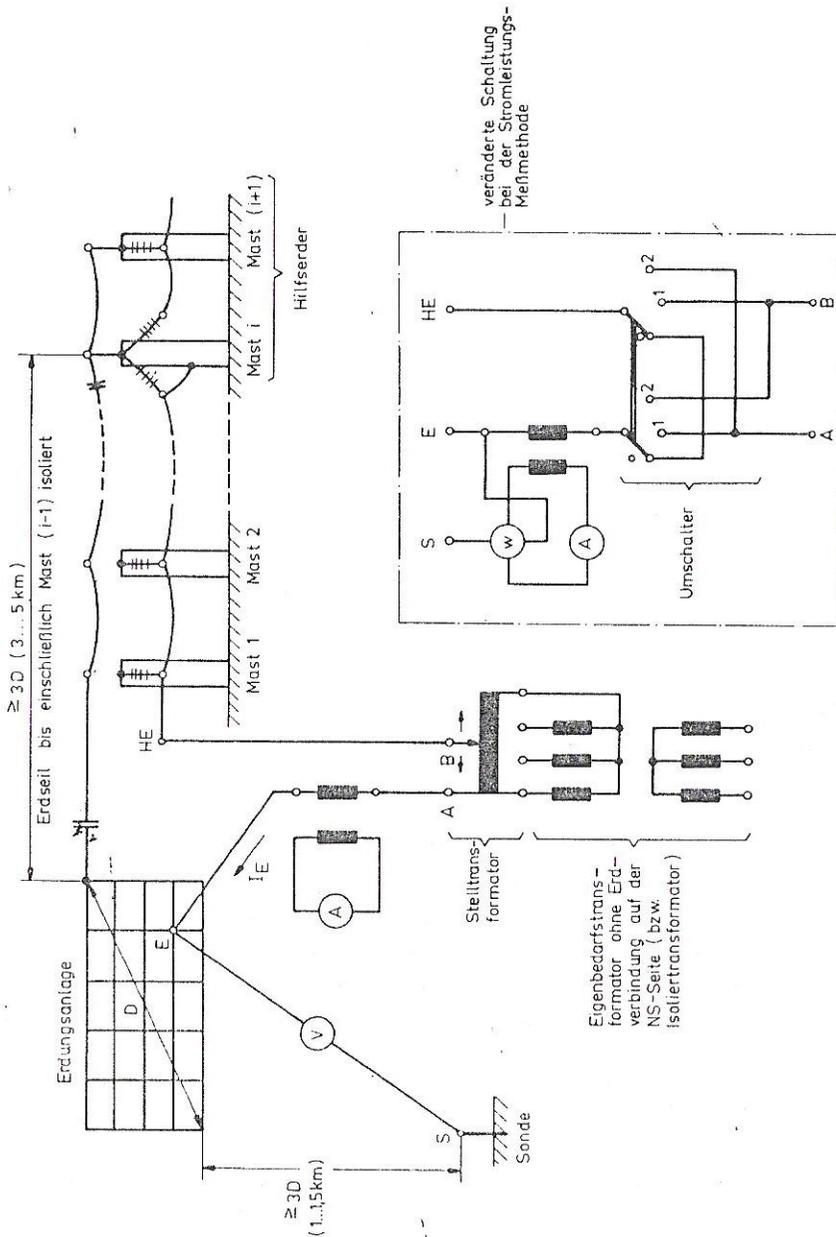


Bild 20 Schaltbild für die Strom-Spannungs-Meßmethode bei ausgedehnten Erdungsanlagen

Dabei ist bereits ein Umschalter für die drei Messungen zur Elimination des Fremdstromeinflusses bei Verwendung eines Isoliertransformators als Stromquelle mit angegeben. Diesbezüglich gelten natürlich hier die gleichen Überlegungen wie bei der Strom-Spannungs-Meßmethode. Die entsprechenden Beziehungen für die vom Fremdstrom bereinigten Meßwerte der Leistung lauten hier:

1. Isoliertransformator als Stromquelle

$$P_M = \frac{P_1 + P_2}{2} - P_0 \quad (33)$$

2. Eigenbedarfstransformator als Stromquelle

$$P_M = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} - P_0 \quad (34)$$

Den Erdungswiderstand erhält man dann nach der Beziehung:

$$R_E = \frac{P_M}{I_M^2} \quad (35)$$

Dieser Wert muß noch, entsprechend Gleichung (27), korrigiert werden, wenn der Widerstand des Spannungspfades des Leistungsmessers nicht größer oder gleich dem Zehnfachen des Sonden-ausbreitungswiderstandes ist.

3.5. Spezielle Probleme

Solche speziellen Probleme liegen bei komplizierten Geländebedingungen in Wohn- und Industriegebieten (Bebauung, im Erdreich vorhandene natürliche Erder) vor, bei denen das Auffinden einer geeigneten Meßstrasse sehr schwierig ist. Aufbauend auf den im Abschnitt 3.2. dargestellten Grundlagen muß jedoch die Meßstrasse grundsätzlich eine solche Ausdehnung haben, daß die Lage der Bezugserde (horizontaler Bereich) eindeutig angebbar ist. Dazu ist im Prinzip die Messung des gesamten Potentialverlaufs zwischen Erder und Hilfsender erforderlich, da das Arbeiten mit Richtwerten für die einzelnen Abstände in bebauten Gebieten in der Regel zu Fehlmessungen führt.

Nachfolgend sollen daher einige Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie man in solchen Fällen vorgehen kann.

1. Rückläufige Methode

Diese Methode kann angewandt werden, wenn die Messung des Potentialverlaufs von der Erdungsanlage beginnend infolge dichter Bebauung nicht möglich ist, bzw. die Messung infolge vorhandener natürlicher Erder in diesem Bereich nicht aussagekräftig ist. Man wählt in diesem Fall für den Hilfserder einen solchen Standort aus, der durchaus mehrere hundert Meter von der Erdungsanlage entfernt sein kann, aber bei dem mit großer Sicherheit im Umkreis von 60 ... 80 m keine natürlichen Erder vorhanden sind (z.B. Sportplatz, Parkanlage). Hierbei wird dann die Messung des Potentialverlaufs, vom Hilfserder beginnend (rückläufig), vorgenommen. Dabei genügt es, die Messung nach Erreichen des horizontalen Bereichs abzubrechen, da es lediglich darauf ankommt, die Lage der Bezugserde zu bestimmen (s. Bild 21, S. 42).

Bei der Verwendung von Erdungsmeßbrücken auf der Basis der Behrend-Schaltung mit nur drei Anschlüssen (s. Abschnitt 5) ist es zur Erzielung einer größeren Meßgenauigkeit bei der großen Entfernung zwischen Erder und Hilfserder zweckmäßig, die Klemme E mit dem Hilfserder und die Klemme HE mit dem Erder zu verbinden. Es ist dann jedoch darauf zu achten, daß zunächst nicht R_E , sondern R_{HE} gemessen wird. Es muß zusätzlich der Wert ($R_E + R_{EH}$) gemessen werden, um dann durch eine Differenzbildung R_E zu bestimmen.

2. Extrapolationsmethode

Diese Methode stellt ein grafisches Näherungsverfahren dar, die verwendet werden kann, wenn für den Hilfserder kein genügend weit entfernter Standort zugänglich ist, um einen ausgeprägten horizontalen Bereich (Bezugserde) zu erhalten. In diesem Fall wird der Potentialverlauf zwischen Erder und Hilfserder in einem Diagramm aufgetragen und durch eine grafische Extrapolation ein horizontaler Bereich festgelegt (siehe Bild 22, S. 43). Diese Vorgehensweise ist um so

Fortsetzung S. 43

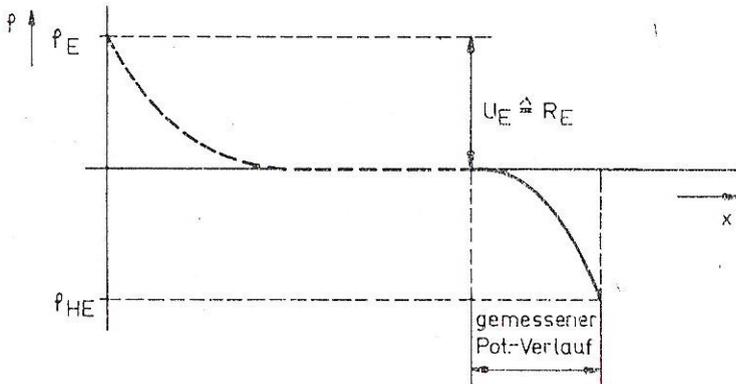
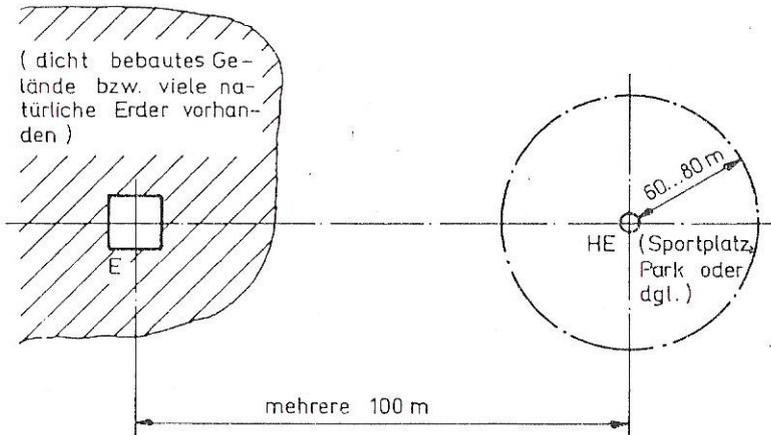


Bild 21 Rückläufige Methode

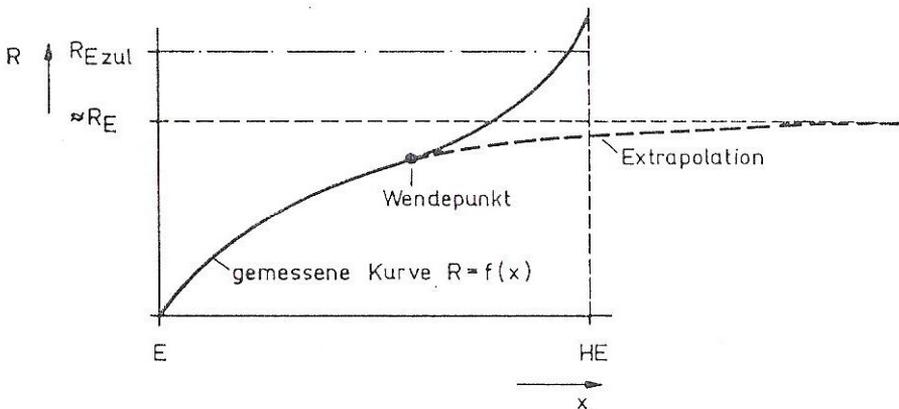


Bild 22 Extrapolationsmethode

genauer, je geringer der Anstieg der gemessenen Kurve $R = f(x)$ im Wendepunkt derselben ist. Diese Methode kann vor allem dort mit Vorteil angewandt werden, wo eine Dimensionierung der Erdungsanlage auf der Basis eines zulässigen Erdungswiderstandes vorgenommen wird (z.B. kompensierte MS-Netze in Stadtgebieten bzw. Industriebetrieben). Die Ungenauigkeiten dieser Extrapolation werden bedeutungslos, wenn der zulässige Erdungswiderstand deutlich größer als der durch diese Extrapolation gewonnene ist (s. Bild 22).

3. Strom-Spannungs-Methode

Erlaubt es die Bebauung, nach keiner der beiden vorgenannten Methoden vorzugehen, dann kann eine Strom-Spannungs-Messung, ähnlich wie im Abschnitt 3.4.2. dargestellt, vorgenommen werden. Dabei wird ein Strömungsfeld dadurch aufgebaut, daß man zwischen die zu messende Erdungsanlage und ein freigeschaltetes von der Station abgehendes MS- oder NS-Kabel einen aus dem NS-Netz gespeisten Trenntransformator als Stromquelle einschaltet. Aus Sicherheitsgründen sollte die Speisespannung nicht größer als 65 V sein. Das freigeschaltete Kabel wird

dann in einer genügend weit entfernten Station mit der Erdungsanlage derselben verbunden. Diese stellt den Hilferder dar, womit der Stromkreis geschlossen ist. Mit Hilfe eines hochohmigen Spannungsmessers kann schließlich in Analogie zu dem Bild 20 die Messung durchgeführt werden. Bei der Auswertung ist hier jedoch unbedingt der Kabelreduktionsfaktor zu beachten. Hinsichtlich näherer Einzelheiten sei an dieser Stelle auf die Literatur verwiesen [8].

4. Ermittlung von Schritt- und Berührungsspannungen

Die Dimensionierung von Erdungsanlagen auf der Basis zulässiger Erderspannungen ist nur in Netzen mit relativ geringem Fehlerstrom (Netze mit isoliertem Sternpunkt bzw. kompensierte Netze) ökonomisch sinnvoll. Aus diesem Grunde erlaubt die Vorschrift TGL 200-0603 auch nach zulässigen Schritt- und Berührungsspannungen zu dimensionieren. Davon wird in Netzen mit unmittelbar oder über niederohmige Widerstände geerdeten Sternpunkten Gebrauch gemacht. Aber auch in Anlagen, die nach der zulässigen Erderspannung $U_E = 125$ V dimensioniert werden, verlangt die Vorschrift außerhalb derselben die Einhaltung einer maximalen Berührungsspannung $U_B = 65$ V und einer maximalen Schrittspannung $U_S = 90$ V. Da jedoch die Größenordnung der Schritt- und Berührungsspannung nicht unmittelbar aus dem Erdungswiderstand abgeleitet werden kann, wie das bei der Erderspannung möglich ist, verlangt die Vorschrift TGL 200-0603 im Blatt 8 überall dort, wo eine Dimensionierung auf dieser Basis erfolgt, die direkte Messung dieser Größen.

Die Messung von Schritt- und Berührungsspannungen erfolgt mittels zwei auf dem Erd- oder Fußboden flach aufliegender Sonden von je 200 cm^2 Auflagefläche bei einem Mindestbodendruck von je 25 kp pro Sonde. Zur Spannungsmessung bedient man sich dabei zweckmäßigerweise eines transportablen batteriegespeisten Röhrenvoltmeters, dessen Innenwiderstand entsprechend dem menschlichen Körperwiderstand 1 ... 3 k Ω beträgt. Das erforderliche Strömungsfeld wird mit Hilfe eines Eigenbedarfstransformators oder eines transportablen

Wechselstromaggregates zwischen der Erdungsanlage und einem Hilfserder aufgebaut. Dabei sollte der Strom in einer Größenordnung von 50 ... 200 A liegen. Hieraus folgt unmittelbar, daß diese Messungen mit der Messung des Ausbreitungswiderstandes bei ausgedehnten Erdungsanlagen, die sehr oft auf der Basis von zulässigen Schritt- und Berührungsspannungen dimensioniert werden, zu verbinden sind.

Die Lage der Meßstellen innerhalb und außerhalb der Anlage ist von Fall zu Fall stichprobenartig festzulegen. Dabei sollten die Meßwerte in Prozent der bei der Messung vorliegenden Erderspannung zusammen mit dem vorliegenden Erderstrom angegeben werden. Damit ist eine Umrechnung auf andere Fehlerströme ohne Schwierigkeiten möglich.

Auf weiter gehende Einzelheiten wird an dieser Stelle verzichtet, da dies über den Rahmen des Versuches hinausgeht. Diesbezüglich sei auf die Literatur verwiesen [2, S. 680ff]. Dort kann beispielsweise auch etwas über einen in der DDR entwickelten speziellen Schrittspannungsmesser SM 155 nachgelesen werden.

5. Erdungsmeßgeräte

5.1. Prinzip der Behrend-Schaltung

Für die geoelektrische Sondierung sowie für die Messung von Erdungswiderständen bei Erdungsanlagen geringer Ausdehnung sind von den verschiedensten Firmen eine Reihe von speziellen Erdungsmeßgeräten entwickelt worden. Dabei kommt es besonders darauf an, daß diese Geräte für den Einsatz im Gelände möglichst leicht und handlich sind. Damit ist natürlich der Leistungsfähigkeit der Stromquelle eine Grenze gesetzt, so daß diese Meßgeräte vor allem bei Erdungsanlagen großer Ausdehnung nicht eingesetzt werden können (s. auch Abschn. 3.3. und 3.4.1.). Diese Erdungsmeßgeräte arbeiten auf der Grundlage unterschiedlicher Meßprinzipien. Nachfolgend soll jedoch nur das Prinzip der Behrend-Schaltung näher dargestellt werden, da dieses bei den in der DDR vom VEB Meßapparatewerk

Schlotheim hergestellten Geräten verwendet wird. Hinsichtlich anderer Geräte und Prinzipien sei auf die Literatur verwiesen [1], [2, S. 622ff].

Bei der Behrend-Schaltung handelt es sich um ein Sondenverfahren mit Spannungskompensation. Hierbei wird mit niederfrequentem (ungleich der Netzfrequenz und deren höheren Harmonischen) Wechselstrom gearbeitet. Das bietet den Vorteil, daß erstens die bei Gleichstrom auftretenden Polarisationsspannungen nicht kompensiert werden müssen, und zweitens der Einfluß netzfrequenter Fremdströme durch eine geeignete Gleichrichterschaltung leicht unterdrückt werden kann.

Das Grundprinzip der Behrend-Schaltung ist im Bild 23 angegeben.

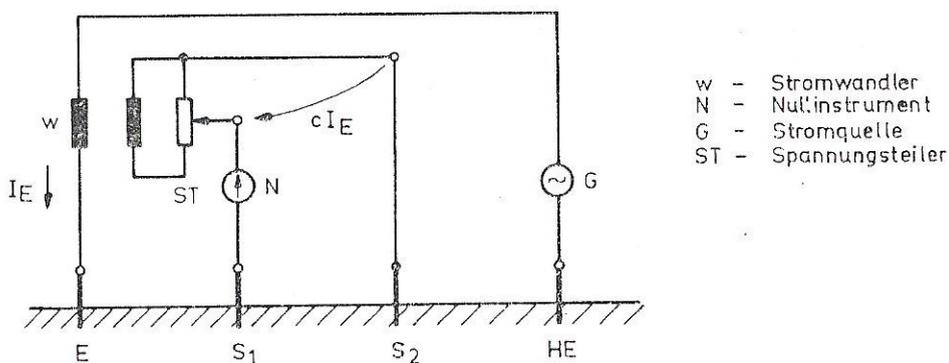


Bild 23 Prinzip der Behrend-Schaltung

Die Stromquelle G treibt an der Stelle E (Erder) den Erderstrom I_E in das Erdreich hinein, der an der Stelle HE (Hilfserder) wieder austritt. Das dadurch entstehende Strömungsfeld verursacht zwischen den Sonden S_1 und S_2 die Potentialdifferenz ($\varphi_{S_1} - \varphi_{S_2}$). Diese Potentialdifferenz ist sowohl bei der geoelektrischen Sondierung als auch bei der Messung des Erdungswiderstandes (dabei fallen S_1 und E zusammen) die entscheidende Größe. Die Messung dieser Potentialdifferenz

erfolgt dadurch, daß man an den Sonden S_1 und S_2 einen aktiven Zweipol mit veränderlicher Leerlaufspannung U_L anschaltet. Diese Leerlaufspannung ist der Potentialdifferenz ($\varphi_{S1} - \varphi_{S2}$) entgegengerichtet. Wenn man die Leerlaufspannung gerade so einstellt, daß das Nullinstrument nicht ausschlägt, dann wird erstens das Strömungsfeld durch den aktiven Zweipol nicht beeinflusst und zweitens gilt die Beziehung:

$$|U_L| = |\varphi_{S1} - \varphi_{S2}| \quad (36)$$

Die veränderliche Leerlaufspannung wird durch die Kombination Stromwandler-Spannungsteiler gebildet. Damit gilt

$$U_L = C I_E \quad (37)$$

C - Konstante, die das Stromwandler-übersetzungsverhältnis und die Stellung des Spannungsteilers beinhaltet.

Ausgehend von den Gleichungen (7) und (26) gilt damit

$$C \sim \varphi \quad (38)$$

$$\text{bzw. } C \sim R_E \quad (39)$$

Da das Stromwandlerübersetzungsverhältnis konstant ist, folgt daraus, daß die Stellung des Spannungsteilers unmittelbar ein Maß für die gesuchten Größen ist. Demzufolge kann der Spannungsteiler (Potentiometer) direkt in Werten für den Widerstand

$$R = \frac{\varphi_{S1} - \varphi_{S2}}{I_E} \quad (40)$$

geeicht werden.

Diese Schaltung bietet weiterhin den Vorteil, daß die Zuleitungswiderstände von dem Meßgerät zu den Elektroden und auch die Ausbreitungswiderstände der Sonden S_1 und S_2 nicht in das Meßergebnis eingehen. Der Ausbreitungswiderstand des Hilfserders ist insofern von Bedeutung, als er den Strom I_E und damit die Empfindlichkeit der Messung beeinflusst. Er sollte

damit möglichst gering sein. Dabei ist bei der Sondierung jedoch die halbkugelähnliche Gestalt (s. S.8) zu beachten. Bei der Messung des Erdungswiderstandes jedoch sollte der Spieß so tief wie möglich in das Erdreich eingetrieben werden, da dort der horizontale Bereich das entscheidende Kriterium ist.

5.2. Erdungsmeßgerät Type A 307

Dieses Gerät wird von VEB Meßapparatewerk Schlotheim hergestellt und in der Energiewirtschaft der DDR weitestgehend angewendet. Die Schaltung ist im Bild 24, S. 49, angegeben. Als Stromquelle dient ein Kurbelinduktor K, wodurch man unabhängig von einer Fremdeinspeisung ist. Parallel zu dem Spannungsteiler ST sind je nach Stellung des Stufenschalters S die Widerstände R_1 , R_2 oder R_3 geschaltet. Auf diese Weise wird eine Meßbereichsumschaltung realisiert. Der Kondensator C dient dazu, um mögliche fremde Gleichströme im Erdreich von der Messung auszuschließen. Die Dioden D_1 und D_2 sowie der Widerstand R_4 dienen je nach Stellung des Stufenschalters S zur Strombegrenzung durch das Nullinstrument N, um es bei grobem Fehlableich vor einer Stromüberlastung zu schützen. Die Glimmlampe Ü dient ebenfalls bei grobem Fehlableich als Überspannungsschutz (Stabilisator) für den mechanischen Gleichrichter Gl, damit kein Kontaktabbbrand auftritt. Die Verwendung eines mechanischen Gleichrichters bietet sich bei einem Kurbelinduktor als Stromquelle an. Indem beide eine gemeinsame Welle haben, ist ein exakter Synchronismus zwischen dem Strom I_E und der Durchlaßrichtung des Gleichrichters gegeben. Dadurch werden fremde Wechselströme, deren Frequenzen von der Frequenz des Stromes I_E abweichen, von der Messung ausgeschlossen.

Das Meßgerät besitzt ein Gesamtgewicht von ca. 4 kp und eine an den Meßkreis abgegebene Leistung von maximal 4,8 W. Damit ist es für den Einsatz im Gelände gut geeignet.

Fortsetzung S. 50

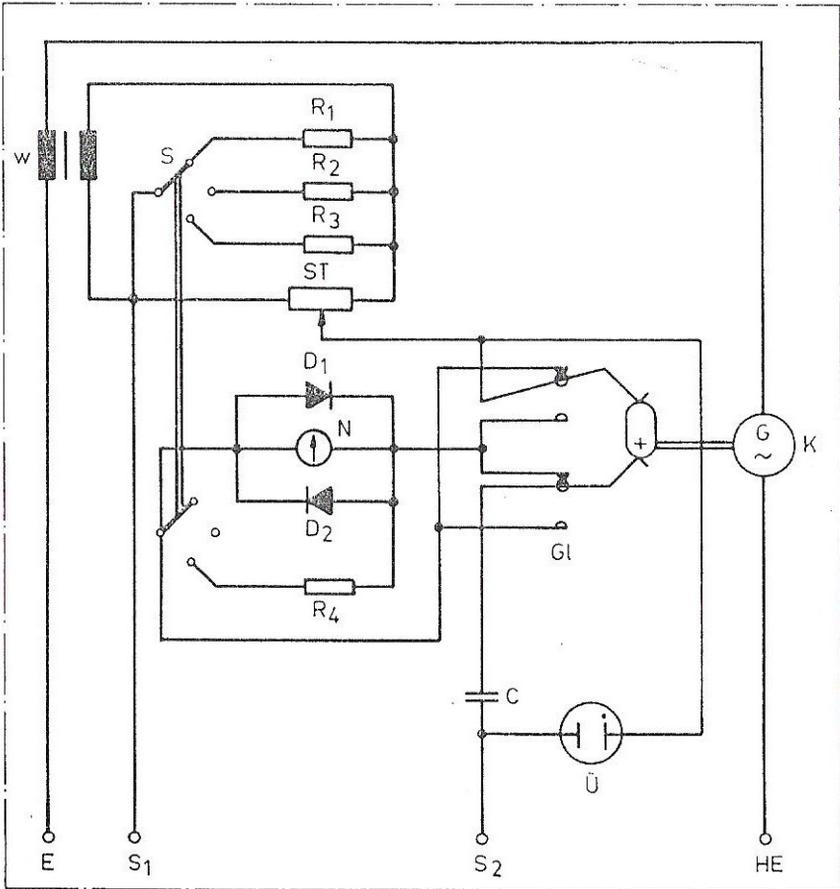


Bild 24 Schaltung des Erdungsmeßgerätes Type A 307

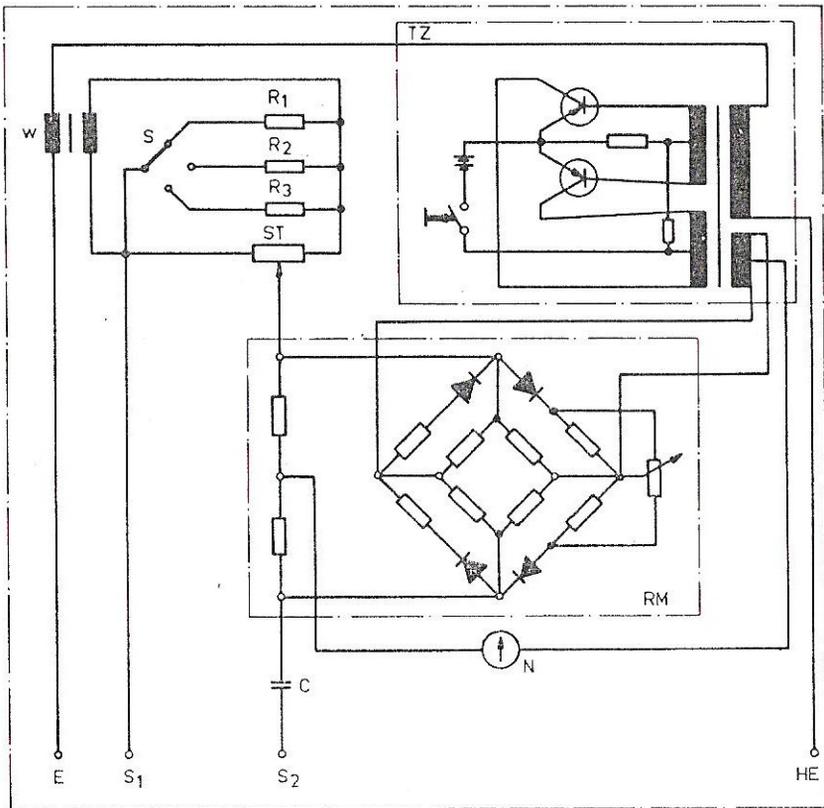
5.3. Erdungsmeßgerät Typ A 317

Dieses Gerät wird ebenfalls vom VEB^{Meß}Meßapparatewerk Schlot-heim hergestellt. Die Schaltung ist im Bild 25, S. 51, ange-geben.

Der entscheidende Unterschied zu dem Typ 307 besteht darin, daß hier als Stromquelle kein Kurbelinduktor, sondern ein bat-teriegeladener Transistorgegenschaltzenerhacker verwendet wird. Damit vereinfacht sich die Bedienung, da das Kurbeln entfällt. Allerdings hat das hinsichtlich der verwendeten Gleichrichter-schaltung zur Unterdrückung fremder Wechselströme Konsequen-zen. Zu diesem Zweck wird hier eine Ringmodulatorschaltung aufgebaut. Sowohl die Zenerhacker- als auch die Ringmodulator-schaltung stellen Baugruppen der Schwachstromtechnik dar. Darauf soll hier nicht weiter eingegangen werden, da dies für das eigentliche Meßproblem ohne Bedeutung ist.

Das Meßgerät besitzt ein Gesamtgewicht von ca. 2 kg und eine Meßleistung von maximal 2,5 W. Damit ist es zwar recht hand-lich, aber die geringere Leistung gegenüber der Type A 307 schränkt den Einsatzbereich wesentlich ein. Das macht sich be-sonders bei der Messung von Erdungswiderständen bemerkbar, wo-bei sehr oft kein Abgleich möglich ist.

(Bild 25, Prinzipschaltung des Erdungsmeßgerätes Typ A 317, siehe S. 51).



RM- Ringmodulatorschaltung

TZ- Transistorgegenaktzerhacker mit Batteriespeisung

Bild 25 Prinzipschaltung des Erdungsmeßgerätes Typ A 317

6. Literatur

- [1] Feydt, M.: Anleitung zum Versuch Nr. 26
"Erdungsmessungen"
TU Dresden, Inst. f. elektr. Energie-
anlagen, 3. verb. Auflage v. 13.3.64
- [2] Autorenkollektiv: VEM-Handbuch Schaltanlagen
Dimensionierung und Aufbau (3. Kap.)
VEB Verlag Technik, Berlin 1969
- [3] Schneider, D.: Geoelektrische Meßverfahren für die
Elektroenergieversorgung
Energietechnik 17 (1967), H. 1, S.3..7
- [4] Koch, W.: Erdungen in Wechselstromanlagen über
1 kV
Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/
Heidelberg 1961, 3. Auflage
- [5] Hummel, J. N.: Der scheinbare spezifische Wider-
stand
Zeitschrift Geophysik 5 (1929),
S. 89 ... 104
- [6] Hummel, J. N.: Der scheinbare spezifische Widerstand
bei vier planparallelen Schichten
Zeitschrift Geophysik 5 (1929),
S. 228 ... 238
- [7] Kampfhenkel, K.: Neuberechnete und überarbeitete Zwei-
schicht- und Hilfspunktkurven zur
Auswertung geoelektrischer Sondierun-
gen
Energietechnik 18 (1968), H. 1,
S. 18 ... 23
- [8] Feydt, M.
Freytag, K.-H.: Fortschritte der Erdungen und Schutz-
maßnahmenteknik
Elektrie 26(1972), H. 1, S. 20 ... 23

- [9] Erbacher, W.: Untersuchung von Masterdorn
ETZ-A 74 (1953), S. 390 ... 393
- [10] Ufermann, J.
Jahn, K.: Hochfrequenz - Erdungsmeßgerät
BBC-Nachrichten 49 (1967), H. 3,
S. 132 ... 135
- [11] Erdungsmeßgerät Type A 307
Prospekt des VEB Meßapparatewerk
Schlotheim
Druck-Nr.: V 12/17 R 246/63 4
- [12] Elektronisches Erdungsmeßgerät
Type A 317
Beschreibung und Bedienungsanwei-
sung
VEB Meßapparatewerk Schlotheim
Druck-Nr.: V 12/17 Ri 285/65 1
- [13] TGL 200-0603: Erdung in elektrotechnischen An-
lagen
Bl. 1 ... 8
besonderes Blatt 8: Prüfung von
Erdungsanlagen

Hierzu gehört:

Praktikumsanleitungen zur Lehrveranstaltung

"Projektierung von Elektroenergieanlagen"

Versuch: Erdungsmessungen

Teil II - Aufgabenstellung