

**VERFAHRENS-UND MESSKUNDE  
DER NATURWISSENSCHAFT**

**HEFT 6**

**Die Messung  
von Erderwiderständen**

von

**Volker Fritsch**



**SPRINGER FACHMEDIEN WIESBADEN GMBH**

# Die Messung von Erderwiderständen

von

Dipl.-Ing. Dr. Volker Fritsch  
Brünn



---

Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH

**Herausgeber dieses Heftes:  
Prof. Dr.-Ing. A. Leonhard**

**Mit 85 Abbildunge**

**ISBN 978-3-322-98100-4      ISBN 978-3-322-98745-7 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-322-98745-7**

**Alle Rechte vorbehalten**

## Vorwort

In den letzten Jahren hat insbesondere die rasche Entwicklung der Blitzschutztechnik dazu beigetragen, daß die Erdermeßtechnik an Interesse gewann. Die Existenz einer guten Erdung ist für die verschiedensten Einrichtungen der Elektrotechnik von größter Wichtigkeit. In manchen Fällen ist sie auch vom Standpunkte der Sicherheit wichtig. Sowohl die Schutz- als auch die Blitzerde bedingt, daß die angeschlossenen Einrichtungen Menschen vor schwerer gesundheitlicher Schädigung, in manchen Fällen sogar vor dem Tode schützen. In elektrischen Anlagen anderer Art wird die Betriebssicherheit oft durch gute Erdungen bestimmt. Sehr bedeutende wirtschaftliche Werte sind davon abhängig, ob die Güte der Erdung richtig bestimmt wurde. Aus allen diesen Gründen hat man die Erdungsprobleme in letzter Zeit viel genauer studiert als früher. Das Studium wurde dadurch erleichtert, daß die Geophysik insbesondere den geologischen Leiter weitgehend erforschte und damit überhaupt erst die Grundlagen für die richtige Lösung der Erdungsprobleme schuf. Andererseits hat wieder der Fortschritt der Blitzforschung dazu beigetragen, daß manche dieser Fragen heute wesentlich anders beantwortet werden müssen als noch vor wenigen Jahren.

Die Erdermeßtechnik erscheint in den bisherigen Handbüchern der Elektrotechnik allgemein nur kurz behandelt. Es gibt dann allerdings eine recht umfangreiche Sonderliteratur, die aber über die verschiedensten Zeitschriften verstreut ist und immer nur ganz bestimmte Teilfragen behandelt. Ich glaube daher, daß es günstig ist, eine zusammenfassende Darstellung dieses Gebietes zu geben und damit vor allem auch allen jenen zu helfen, die die Erdermeßtechnik in ihrem engeren Fachgebiete brauchen. Daher habe ich auch diese Broschüre vornehmlich auf praktische Anwendung zugeschnitten und von theoretischen Dingen nur das gebracht, was bei der Anwendung der Meßverfahren wichtig ist. Wen dann einzelne theoretische Fragen näher interessieren, der sei auf die besonderen Arbeiten der Fachliteratur verwiesen, von denen allerdings nur einige wichtige aus letzter Zeit auch am Schlusse zusammengestellt sind.

Neben den bisherigen niederfrequenten Verfahren behandle ich auch zusammenfassend die hochfrequenten, die besonders in der Blitzschutztechnik ständig an Bedeutung gewinnen.

Wenn ich diese kleine Arbeit der Öffentlichkeit übergebe, so möchte ich dankend die erwähnen, die mir bei der Durchführung der hier beschriebenen Untersuchungen mit ihrer Unterstützung zur Seite standen. Der leider so früh verstorbene G. Rudolf Friedrich-Leipzig hat mir nicht nur seine reichen Erfahrungen, sondern auch seinen Betrieb gerne zu Verfügung gestellt, wenn es um neue Arbeiten ging. Die Sächsische Brandversicherungskammer in Dresden, ihr Präsident und besonders ihr Oberregierungsrat, Dipl.-Ing. Schneider, weiter meine Mitarbeiter, Dr. Lang-Prag und Dipl.-Ing. Woharek-Brünn, unterstützten mich in entgegenkommendster Weise durch Überlassung von Material, Bau von Geräten und Ratschläge. Besonders danke ich denen, die das Blitzversuchsfeld in Absroth errichten halfen und es betreuen. Es sind dies vor allem Ing. Schwiertlich-Schönbach, der soviel Zeit und Mühe auf seine Vorbereitung und Einrichtung verwandte, Ing. Nebel-Leibitschgrund, der die Erdermessungen durchführt, die Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen und die Sächsische Brandversicherungskammer, die die Mittel bereitstellten, und die Beamten und Angestellten des Schönbacher Elektrizitätswerkes. Ich möchte an dieser Stelle meiner Hoffnung Ausdruck verleihen, daß gerade dieses Versuchsfeld noch recht schöne Beiträge zur Klärung der Blitzschutz- und Erderfragen ermöglichen wird und daß vor allem die Verhältnisse dort den von allen Seiten angestrebten vollen Versuchsbetrieb ermöglichen.

Es ist klar, daß im engen Rahmen dieser Broschüre nicht alles erschöpfend behandelt werden konnte. Immerhin aber glaube ich, daß der Leser ein Bild des heutigen Standes dieser Meßkunde erhalten wird und es würde mich freuen, wenn diese Arbeit dazu beitragen wollte, mancher modernen Bestrebung auf diesem Gebiete auch in Deutschland entgegenzukommen.

Prag, im Januar 1942.

# Inhalt

	Seite
<b>I. Erder</b> .....	1
1. Zweck .....	1
2. Arten .....	4
3. Ersatzschema .....	10
<b>II. Erderwiderstände</b> .....	12
1. Teilwiderstände .....	12
2. Verändernde Einflüsse .....	19
<b>III. Grundsätzliches über die Messung</b> .....	26
<b>IV. Niederfrequente Meßverfahren</b> .....	47
<b>V. Hochfrequente Meßverfahren</b> .....	65
<b>VI. Anwendungen</b> .....	78
1. Betriebserder .....	79
2. Schutzerder .....	79
3. Blitzerder .....	81
<b>Literatur</b> .....	84
<b>Register</b> .....	87

# I. Erder

## 1. Zweck

Unter „Erden“ versteht man die Herstellung einer elektrisch leitenden Verbindung des „zu erdenden“ Leiters mit der „Erde“. Der „Erder“ ist jener Teil dieser leitenden Verbindung, der mit den im Untergrunde vorhanden geologischen Leitern in Berührung steht.

Im allgemeinen wird verlangt, daß die Verbindung mit der „Erde“, also mit der obersten Schicht des Erdkörpers hergestellt wird. Diese Bedingung wäre aber nur dann eindeutig, wenn die erwähnte Schicht in elektrischer Hinsicht sehr gut leiten würde und völlig homogen wäre. Nur dann wäre nämlich vorauszusetzen, daß Punkte ihrer Oberfläche keine nennenswerte Potentialdifferenz gegeneinander aufweisen könnten. Da nun aber gerade diese Voraussetzung nicht allgemein zulässig ist, so muß die grundsätzliche Forderung enger gefaßt werden. An die Stelle der „Erde“ im allgemeinen Sinne tritt der „Erdpunkt“, dem schon besondere Eigenschaften zugeschrieben werden müssen. Der „Erdpunkt“ muß auf der Oberfläche eines geologischen Leiter-vorkommens liegen, dessen Abmessungen und damit dessen Kapazität so groß ist, daß jede technisch in Betracht kommende Elektrizitätsmenge sein Potential nicht über einen Wert erhöhen kann, der von Null praktisch verschieden ist. Wenn wir daher im folgenden von „Erde“ sprechen, so wollen wir immer unter dieser den so definierten Punkt verstehen.

Bei der Anlage eines Erders müssen immer zwei Bedingungen erfüllt werden. Zunächst muß der Widerstand, der zwischen Erder und Erdpunkt liegt, so klein wie möglich sein. Dann aber muß der Erder beständig sein, d. h. sein Widerstand darf sich nur innerhalb bestimmter Grenzen verändern.

Erder können mit Anlagen verbunden werden, die sehr verschiedenen Zwecken dienen. Im allgemeinen können wir drei Gruppen unterscheiden:

- a) Betriebserder,
- b) Schutzerder und
- c) Überspannungserder.

In Abb. 1 sind diese drei wichtigen Arten schematisch dargestellt. Bei a) sehen wir ein Beispiel einer Betriebserde, wie sie etwa bei Telegraphenanlagen üblich ist. Bei  $U$  wird eine Spannung angelegt und bei  $M$  ist der entsprechende Stromanzeiger eingeschaltet. Beide sind durch die Leitung  $L$  verbunden. Sowohl durch den Erder  $E_1$  als auch durch den Erder  $E_2$  fließt der gleiche Strom wie durch die Leitung. Die beiden Widerstände an den Erdern müssen also praktisch zu den Leitungswiderständen addiert werden. Man wird sie daher so wählen, daß sie zu diesen in einem annehmbaren Verhältnis stehen. Je geringer sie sind, desto günstiger wird der Nutzeffekt der betreffenden Anlage sein.

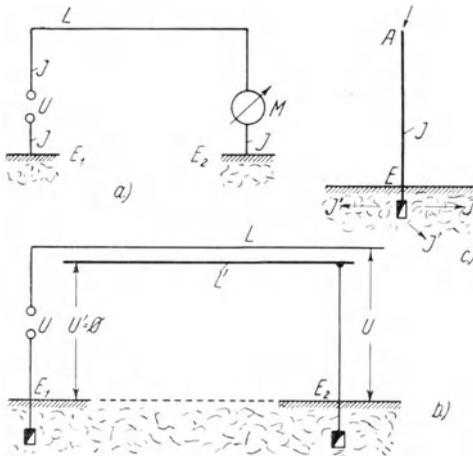


Abb. 1. Die wichtigsten Erder

durch Berühren einer Leitung sich in einen gefährlichen Stromkreis einschaltet. Im Beispiele b) sehen wir eine Leitung  $L$ , die gegen Erde die bereits gefährliche Spannung  $U$  haben soll. Um die Gefahr einer Berührung auszuschließen, wird diese mit einem anderen Leiter  $L'$  umgeben, der geerdet wird ( $E_2$ ). Dadurch wird erreicht, daß seine Spannung  $U'$  gegen Erde normalerweise Null ist. Berühren nun die Leiter  $L$  und  $L'$  einander, was z. B. im Falle eines Isolationsdefektes vorkommen kann, so wird durch den Erder  $E_2$  ein Strom fließen. Dadurch entsteht nun wieder am Erder und an der Erderleitung ein Spannungsabfall. Ist nun der Widerstand an  $E_2$  sehr groß, so wird der durch diesen Erder abgeleitete Strom schwach sein. Daher werden die normalerweise in

lage sein. Es hat andererseits aber auch keinen Sinn, etwa durch besonders große Erderplatten den Widerstand unter ein Maß zu beschränken, das wirtschaftlich noch ohne weiteres verantwortet werden kann. Bei b) sehen wir eine sogenannte Schutz Erde. Diese hat im allgemeinen den Zweck, irgendeinen Leiter mit dem darunterliegenden Untergrunde gutleitend zu verbinden. Dadurch soll es dann unmöglich werden, daß eine Person, die am Boden steht,

die Leitung  $L$  eingebauten Strombegrenzer nicht in Tätigkeit treten und die Leitung bleibt somit unter Spannung. Am Erder kann aber jetzt bereits ein gefährlicher Spannungsabfall auftreten. Wenn nun eine am Boden stehende Person die Leitung  $L'$  berührt, so kann sie einen gefährlichen Schlag erhalten. Schutzzerden müssen daher bei höheren Spannungen besonders sorgfältig hergestellt werden. In der Umgebung des Erders wird sich der abfließende Strom rasch nach allen elektrisch in Betracht kommenden Richtungen verteilen. Immerhin wird aber im Untergrunde an solchen Stellen oft ein recht beachtlicher Spannungsabfall zu konstatieren sein. Wichtig ist in diesem Falle die sogenannte Schrittspannung. Darunter verstehen wir den Spannungsabfall, der über jene Strecke stattfindet, die man mit einem weiten Schritt durchmessen kann. Überschreitet diese den physiologisch zulässigen Wert, so müssen entsprechende Sicherungsmaßnahmen eingeleitet werden. Bei der Bestimmung dieser Schrittspannung ist natürlich nicht nur auf Menschen, sondern auch auf Tiere Rücksicht zu nehmen. Die höchsten Anforderungen werden ohne Zweifel an die Blitzzerden gestellt. Eine solche Erdung zeigt schematisch das Teilbild c).  $A$  ist der Ableiter und  $E$  die Erdung. Vor allem ist die Stromstärke sehr groß. Man muß mit Werten bis zu 30000 und mehr Ampere rechnen. Bei einem Erderwiderstand von bloß 10 Ohm entspricht dies also einem Spannungsabfall von bereits 300000 Volt. Man darf nun allerdings voraussetzen, daß ein Mensch sich während eines Gewitters nicht gerade an einem Blitzableiter festhalten wird. Aus diesem Grunde kann man auch die gefährliche Spannung nach ganz anderen Gesichtspunkten bestimmen als z. B. beim Schutzzerder. Bei einem Spannungsabfalle von 300000 Volt besteht die Gefahr, daß der Blitz vom Ableiter abspringt und nach einem bis zu 30 . . . 40 cm entfernten besseren Ableiter hin abspringt. Eine solche Abspringmöglichkeit ist noch nicht gefährlich. Wird aber der Erderwiderstand höher, so kann der Abspringbereich auf viele Meter anwachsen. Dadurch aber wird dann der Ableiter jeden Wert verlieren, ja er kann sogar noch die Umgebung arg gefährden. Der Widerstand eines Blitzableitererders ist also so zu wählen, daß durch Abspringen des Blitzes kein Schaden angerichtet werden kann. Davon abgesehen, muß man aber noch beachten, daß der Blitzstrom wohl ein Gleichstromstoß ist, daß er aber infolge seines zeitlichen Verlaufes einen Leiter und daher auch einen Erder ähnlich beansprucht, wie ein hochfrequenter Wechselstrom. Dadurch ergeben sich ebenfalls wieder für

die Anlage von Blitzerden besondere Gesichtspunkte, die genau beachtet werden müssen.

Neben diesen gibt es noch andere Arten von Erdern. Oft handelt es sich darum, Störfelder abzuschirmen, Nulleiter auf konstantem Nullpotential zu erhalten und ähnliches. Die Gesichtspunkte, die da maßgebend sind, müssen fallweise untersucht werden. Sie werden stets jenen entsprechen, die für eine der hier genauer besprochenen drei Gruppen maßgebend sind.

## 2. Arten

Nach der Form unterscheiden wir hauptsächlich Platten-, Rohr-, Band- und Seilerder. Auch kann der Anschluß an schon bestehende Rohrnetze, Eisenfundamente usw. in Betracht kommen. Nach der Zahl haben wir zwischen Einzel- und Gruppenerdern zu unterscheiden. Nach der Art der Verlegung sind Ramm- und Grubenerder auseinanderzuhalten. Schließlich kann noch die Art der Wartung die trocken von den Füllerdern scheiden.

Die Plattenerder sind sicher die ältesten. Sie werden aber heute vielfach von anderen Arten, insbesondere von den Rohr- und Banderdern verdrängt. Bei jedem Erder spielt das Verhältnis der gesamten Erdoberfläche zur räumlichen Ausdehnung des Erders eine bestimmte Rolle. Dieses Verhältnis muß dem Verwendungszwecke angepaßt werden. Normalerweise hat es z. B. keinen Sinn, die Oberfläche einer Erderplatte über ein bestimmtes Maß zu erhöhen. Es wird an dessen Stelle empfehlenswerter, mehrere Platten in entsprechendem Abstände zu verlegen. Auf diese Weise gelangt man vom Einzelerder zum Gruppenerder oder zu dessen oft günstigster Abart, dem Bänderder. Bei Erden, die von niederfrequenten Strömen durchflossen werden, ist der räumlichen Verteilung kaum eine physikalisch bedingte Grenze gesetzt. Bei Blitzerden aber darf nicht eine bestimmte Grenze überschritten werden, da Erder, die zu große Ausdehnung erlangen, unwirksam werden.

Als Material für Erder wurde früher vielfach Kupfer und Zink, heute aber vorwiegend Stahl verwendet. Im Untergrunde soll stets massives Material und nicht verdrilltes Seil zur Anwendung gelangen. Bei Blitzerden wären ja zugunsten des Seiles physikalische Gründe anzuführen. Wegen der geringeren Haltbarkeit wird aber auch bei solchen Erden Seil heute meist nicht mehr zugelassen.

Die einst beliebte Bettung in Koks wird heute nicht mehr angewandt. Dagegen empfiehlt es sich, die Erder in Lehm zu betten. Über den Einfluß der Korrosion werden wir noch sprechen, da diese auch vom rein meßtechnischen Standpunkte aus betrachtet, sehr beachtenswert ist.

Im homogenen Untergrunde bietet die Verlegung des Erders keine besonderen Schwierigkeiten. Im gebirgigen Grunde müssen aber gutleitende Stellen ausgesucht werden. Als solche kommen oft wasser-

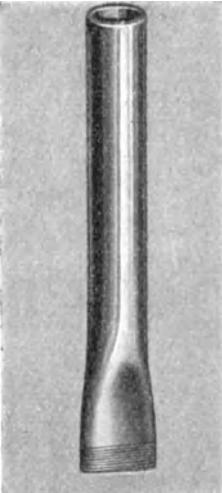


Abb. 2. Rohrerder VDE-Norm 1815

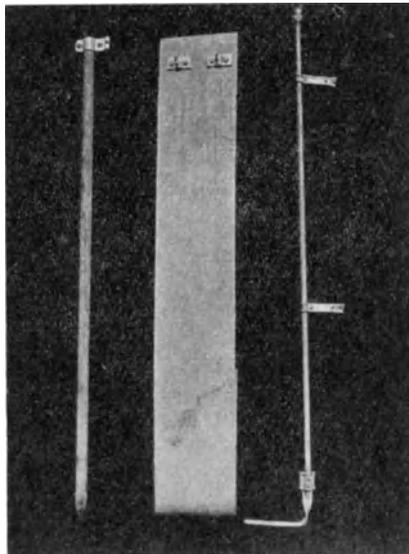


Abb. 3. Erdplatte, Rohr- und Bänderder

führende Spalten in Betracht. Der Nachweis dieser Stellen wird durch geoelektrische Meßverfahren möglich sein.

Erdungen in Brunnen müssen keineswegs immer die besten Erfolge sichern. Es ist insbesondere immer genau zu untersuchen, ob der Brunnen nicht auch Oberflächenwasser enthält, da dieses sehr schlecht leitet. Vor der Erdung muß daher stets eine Wasserprobe vermessen werden und man muß sich ebenso nötig über die hydrologischen Verhältnisse entsprechend informieren. Es muß auch untersucht werden, ob der Brunnen nicht zu bestimmten Zeiten Zufluß an Oberflächenwasser erhält und ob er nicht im Sommer mitunter austrocknet. Im

Flußwasser darf nie geerdet werden, da dieses immer schlecht leitet. Dagegen kann mitunter im feuchten Ufer eine gute Erdung möglich werden. Erdungen in Spalten ändern oft ihren Widerstand, sie sind daher zur ungünstigsten Jahreszeit zu vermessen. Eben jetzt sind die maßgebenden Stellen damit beschäftigt, das gesamte zur Anlage von Erdern nötige Material weitgehend zu normen. Viele Bestandteile wurden bereits früher insbesondere durch den VDE genormt. In den folgenden Bildern sind einige wichtige Konstruktionsteile dargestellt.

In Abb. 2 sehen wir einen genormten Rohrerder, der einfach in den Untergrund eingerammt wird. Eine Erdplatte zeigt die Abb. 3. Solche Platten müssen immer senkrecht eingegraben werden, damit

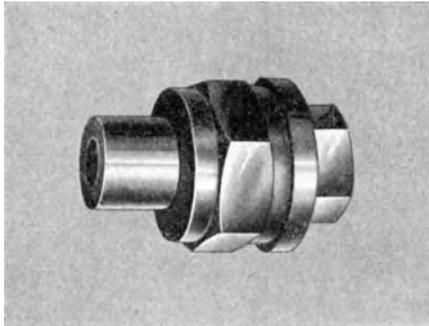


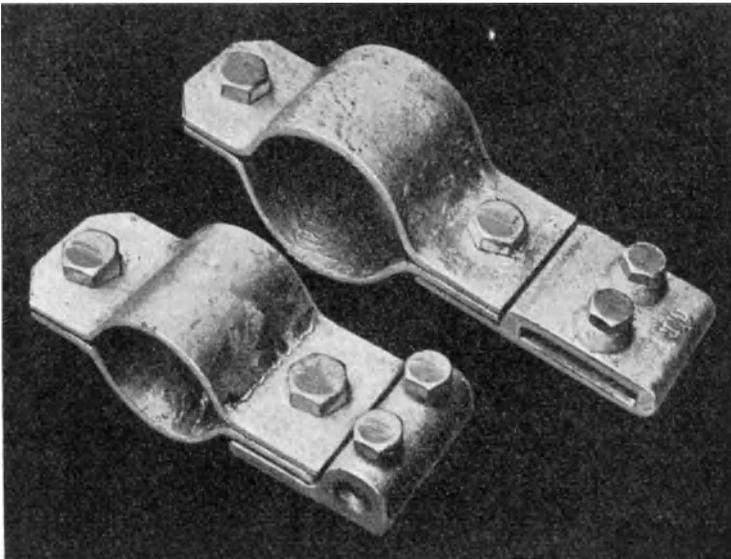
Abb. 4. Trennkupplung

durch Setzung keine Erhöhung des Übergangswiderstandes auftritt. Aus meßtechnischen Gründen muß insbesondere auf eine solide Ausführung der Trennkupplung gesehen werden. Auch muß beachtet werden, daß oberhalb der Trennkupplung die Leitung mindest einen halben Meter frei zu führen ist, damit das obere Stück während der Messung bequem ausgebogen werden kann. Eine genormte Trennkupplung, die sich gut bewährt, ist in Abb. 4 zu sehen. In Abb. 5 sind überdies auch noch andere Verbindungsstücke dargestellt.

Wie leichtsinnig trotz aller bestehenden Vorschriften oft Erdungen verlegt werden, ist leider jedem bekannt, der mit der Überprüfung solcher Anlagen zu tun hat. Ein bezeichnendes Beispiel zeigt Abb. 6. Ein Stück Draht, um einige Steine gewickelt und im Boden verscharrt, soll eine Erdung darstellen. Schlägt dann der Blitz ein oder tritt sonst



a



b

Abb. 5 a und b. Verbindungsstücke

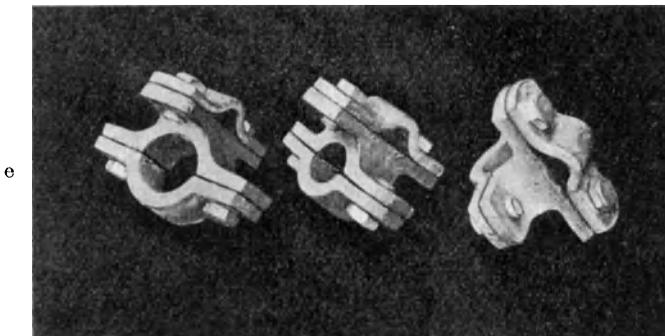
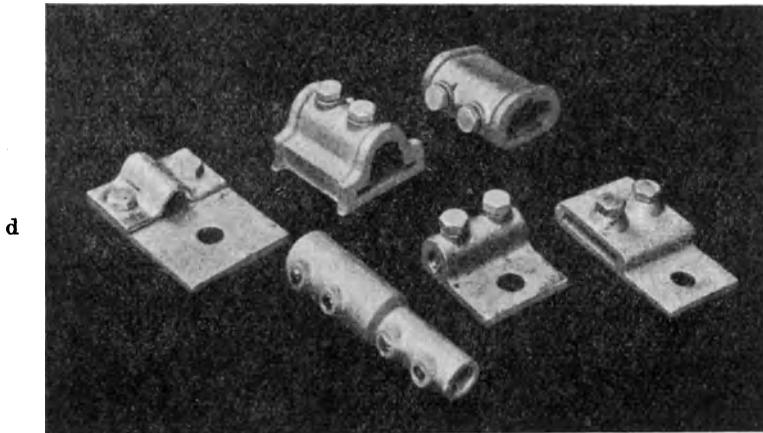
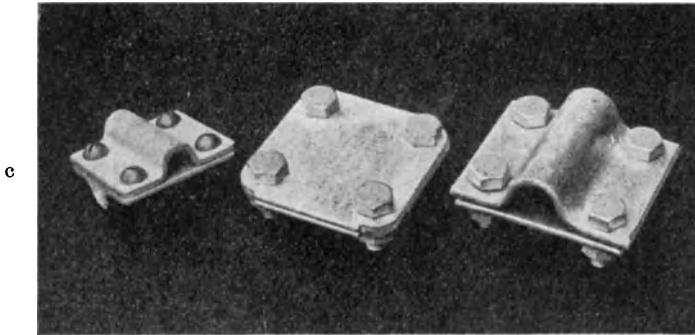


Abb. 5 c bis e. Verbindungsstücke



Abb. 6 a und b. Beispiel einer völlig unzureichenden Erdung

eine gefährliche Spannung auf, so versagt solch Gebilde natürlich seinen Dienst und es können dies dann Menschen mit ihrer Gesundheit und ihrem Leben bezahlen.

### 3. Ersatzschema

Um den Untergrund, mit dem der Erder in Berührung kommt, meßtechnisch zu erfassen, müssen wir für ihn das sogenannte Ersatzschema zeichnen. Wir müssen für die zunächst noch nicht elektrisch definierten geologischen Leiter solche einführen, deren elektrische Eigenschaften wohl bekannt sind. Zunächst wollen wir nur den Untergrund selbst darstellen, während wir das Ersatzschema für den Erder noch später darstellen wollen.

Im allgemeinen wird angenommen, daß die oberste Erdschicht ein gutleitendes und völlig homogenes Gebilde sei. Diese Voraussetzung geht oft soweit, daß man sich diese Schicht als Metallplatte dargestellt denkt.

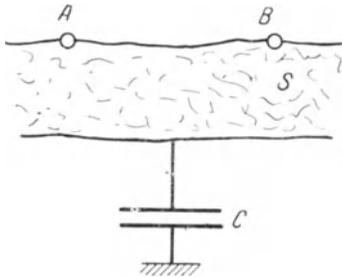


Abb. 7. Homogener Untergrund

In Wirklichkeit sind aber die Verhältnisse weit komplizierter. Es gibt sicher Böden, die eine sehr hohe Leitfähigkeit aufweisen und überdies recht homogen sind. In diese Gruppe wird z. B. der Lehm gehören. Auch im guten Ackerlande Mittel- und Norddeutschlands treffen solche Voraussetzungen zu. Im Gebirge und oft auch schon im Hügellande sind die Voraussetzungen aber ganz andere. Da können

oft über Entfernungen von wenigen Metern Leitfähigkeitsunterschiede von einigen Zehnerpotenzen auftreten. Neben dem praktisch nichtleitenden Felsen finden wir gleich wieder gefüllte Spalten, deren Leitfähigkeit sehr hoch ist. Wir müssen also, wenn wir eine Erdung anlegen oder vermessen, stets untersuchen, ob der Untergrund homogen ist oder ob er aus einzelnen leitenden Schollen besteht, die in schlechtleitende Schichten eingelagert sind. Im ersten Falle gilt für den Untergrund das in Abb. 7 dargestellte Ersatzschema. Zwei entfernte Punkte *A* und *B* liegen auf einer durchgehenden und gutleitenden Schicht *S*. Wir können uns dann diese beiden mit einem Belag eines so großen Kondensators verbunden denken, daß auch bei der Zuleitung größter technisch in Betracht kommender Elektrizitätsmengen zwischen den Belegungen dieses Kondensators keine in Betracht kommende Potentialdifferenz auftreten kann. Anders liegt der Fall, wenn wir einen aus einzelnen gutleitenden Schollen gebildeten Untergrund vor uns haben, wie er z. B. in Abb. 8 dargestellt wird. In diesem Falle erhalten wir,

wie dies die Abbildung zeigt, ein wesentlich komplizierteres Ersatzschema und es können nun zwischen den Punkten  $A$  und  $B$  auch Potentialunterschiede auftreten. Während wir bei homogenem Untergrund die Meßlinien beliebig wählen können, ist dies bei inhomogenem Untergrund nicht mehr möglich. Die für homogenen Grund entwickelten Verfahren dürfen daher im inhomogenen Gelände keineswegs allgemein zur Anwendung gelangen, sondern es müssen die Eigenschaften des Untergrundes bei der Messung und ihrer Auswertung sehr genau berücksichtigt werden. Die geologischen Leiter des Untergrundes sind im allgemeinen als komplexe Widerstände anzusprechen. Neben der Ohmschen haben sie stets auch noch eine kapazitive Komponente. Diese wird besonders bei hochfrequenter Vermessung in Betracht kommen. Der Widerstand des geologischen Leiters ist, wie wir noch sehen werden, ausschließlich durch die wässrigen Lösungen bestimmt, die in seinen Poren oder Spalten enthalten sind. Die festen Anteile kommen, wenn man sehr wenige Ausnahmen übersieht, kaum in Betracht. Aus diesem Grunde werden auch Veränderungen des Lösungs-

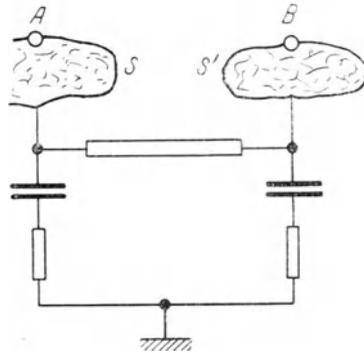


Abb. 8. Inhomogener Untergrund

gehalt des Ersatzschema stark beeinflussen. Solche Schwankungen werden besonders im spaltenreichen und gebirgigen Gelände fühlbar sein. Bei homogenen Böden werden sie in größerer Teufe nur gering sein.

Zur Untersuchung der elektrischen Eigenschaften des Untergrundes können die verschiedenen Verfahren der Geoelektrik verwendet werden. Manche Geräte, die zur Bestimmung des Widerstandes von Erdern dienen, können gleichzeitig auch diese Aufgaben erfüllen. Es brauchen im allgemeinen nicht zu weitgehende Untersuchungen durchgeführt werden. Wichtig ist vor allem die Untersuchung der nächsten Umgebung des Erders, also eines Bereiches, dessen Radius ungefähr 15 bis 20 m beträgt. Die Untersuchung soll aber stets zu verschiedenen Jahreszeiten durchgeführt werden, wenn der Untergrund nicht homogen ist. Die Messungen, die im Frühjahr nach der Schneeschmelze durchgeführt werden, ergeben sehr oft viel zu günstige Werte, die z. B. bei Blitzerden zu gefährlichen Fehlschlüssen führen können. Es empfiehlt sich daher stets eine Messung im Frühjahr und eine zweite im Sommer während einer längeren Trockenperiode.

## II. Erderwiderstände

### 1. Teilwiderstände

Wir wollen nunmehr für den Erder selbst das Ersatzschema bilden und untersuchen, von welchen Faktoren dieses bestimmt wird. Maßgebend ist in dieser Hinsicht die Art der Verlegung. Wir können einen Erder entweder in den Boden einrammen oder aber wir können eine Grube ausheben, in dieser den Erder verlegen und diese dann wieder mit dem vorher ausgehobenen Erdreich neuerlich füllen. In beiden Fällen wird zunächst einmal in der unmittelbaren Umgebung des Erders die natürliche Beschaffenheit des gewachsenen Bodens gestört. Diese Störung ist natürlich bei einem Rammerder anderer Art als bei einem Grubenerder. In jenem Falle wird durch Verdrängung das anstoßende Erdreich verdichtet werden. Im steinigen Boden wird es überdies in der Regel gestört. Beim Grubenerder tritt dagegen eine Auflockerung ein. Erst nach Jahren setzt sich die Bettung so weit, daß sie ähnliche Eigenschaften aufweist, wie das in natürlicher Beschaffenheit belassene Material.

Jedem Erder wird ein bestimmter Ausbreitungswiderstand zugeteilt. Gegen diese Bezeichnung ließe sich vom geophysikalischen Standpunkte aus manches einwenden. Da sie aber in der Regel verwendet und auch in gesetzlichen Vorschriften vorkommt, so soll sie beibehalten werden. Unter „Ausbreitungswiderstand des Erders“ (oft auch nur kurz „Erderwiderstand“ genannt) verstehen wir den Widerstand, der zwischen Erder und Erdpunkt liegt. In Abb. 9 sehen wir dessen Bestimmung.  $E$  ist der Erder, in diesem Falle also ein Plattenerder. Diesem wird der Strom  $J$  zugeführt. Der Erder hat diesen Strom den im Untergrunde enthaltenen geologischen Leitern weiterzuleiten.  $B$  ist die Bettung und  $G$  das anstehende Gebirge. Als Erdpunkt  $E'$  wählen wir nun einen Erder, der von  $E$  sehr weit entfernt ist. Wir werden noch sehen, daß die Mindestentfernung ungefähr 20 m beträgt. Wenn der innere Widerstand des angeschalteten Voltmeters  $U$  sehr groß ist, so spielt der Erderwiderstand an  $E'$  nur eine sekundäre Rolle. Der gesamte Ausbreitungswiderstand des Erders  $E$  ist dann

$$R' = U/J.$$

Wir müssen nun diesen gesamten Widerstandsbeitrag entsprechend unterteilen. In der Regel unterscheiden wir den Übergangswiderstand, den Bettungswiderstand und den Gebirgs widerstand. Der Übergangswiderstand tritt in der Kontaktschicht zwischen Erder und Bettung auf. Der Bettungswiderstand liegt zwischen dieser Schicht und der Grenzfläche des anstehenden Gesteins. Der Gebirgs widerstand schließlich tritt im natürlich belassenen Gebirge auf. Er ist durch den spezifischen Widerstand der im Gebirge enthaltenen geologischen Leiter, ihre

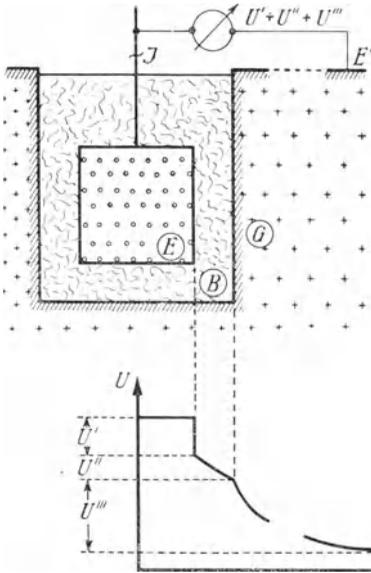


Abb. 9. Ausbreitungswiderstand

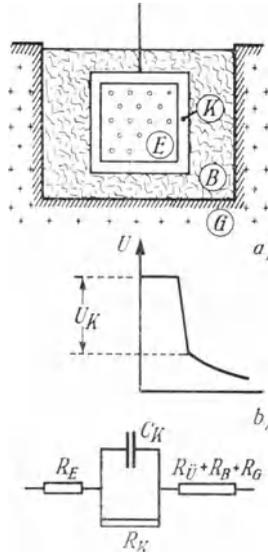


Abb. 10. Korrodierter Erder

Verteilung und von der Form des Erders und der Bettung abhängig. In Abb. 9 sehen wir den Verlauf der Spannung zwischen Erder und Erdpunkt. Es ist

$$\begin{aligned} \text{der Übergangswiderstand } R_{\ddot{u}} &= U'/J, \\ \text{der Bettungswiderstand } R_B &= U''/J \text{ und} \\ \text{der Gebirgs widerstand } R_G &= U'''/J. \end{aligned}$$

Der Übergangswiderstand sowie auch jener der Bettung kann durch technische Mittel auf sehr geringe Werte herabgesetzt werden. Der Gebirgs widerstand dagegen kann durch technische Mittel nur teilweise beeinflusst werden. Er kann z. B. durch Vergrößerung der Erdober-

fläche verkleinert werden. Hauptsächlich ist er aber durch den spezifischen Widerstand der geologischen Leiter bedingt, also durch natürliche Faktoren.

Vom meßtechnischen Standpunkte aus sind die schlecht leitenden Schichten wichtig, die sehr oft ältere Erder umgeben und von der Bettung trennen. Solche Schichten können durch Korrosion oder durch das Setzen der Bettung entstehen. In Abb. 10 ist die dadurch bedingte Änderung des Ersatzschemas eingezeichnet. Der Erder  $E$  ist mit einer schlechtleitenden und in der Regel recht schwachen Schicht  $K$  überzogen.  $B$  bedeutet wieder die Bettung und  $G$  das natürliche Gebirge. Bei b) sehen wir, daß in dieser Schicht ein starker Spannungsabfall  $U_k$  auftritt. Wir erhalten daher einen neuen, dieser Zwischenschicht zugeheilten Widerstand

$$R_k = U_k/J.$$

Diese Zwischenschicht wird im Ersatzschema immer als komplexer Widerstand zum Ausdruck kommen, der aus einer Ohmschen  $R_k$  und kapazitiven Komponente  $C_k$  besteht. Bei Hochfrequenz werden daher auch andere Voraussetzungen gelten als bei niedrigen Meßfrequenzen. Darunter sehen wir das gesamte Ersatzschema.  $R_E$  bedeutet den in der Regel geringen Widerstand der Erderplatte und Erderleitung.

Die Übergangs- und Bettungswiderstände können durch richtige Anlage und gute Wartung immer sehr niedrig gehalten werden. Wichtig ist daher vor allem die Herabsetzung des Gebirgswiderstandes. In

Tafel I. Widerstand trockener Gesteine

Granite .....	10000 bis 100000	Megohm · cm
Syenit .....	10 .. 10000	..
Basalte .....	etwa 100	..
Diabas .....	.. 100	..
Gabro .....	0,1 bis 1	..
Gneiß .....	1000 bis 100000	..
Dioritgneiß .....	etwa 100	..
Glimmerschiefer .....	1000 bis 10000	..
Phyllite .....	um 1000	..
Anhydrite .....	bei 100000	..
Kalke .....	.. 100000	..
Buntsandstein .....	.. 100000	..
Grauwacke .....	10000 bis 100000	..
Tonschiefer .....	etwa 0,00001	..
Magnetkies .....	.. 0,0000001	..
Brauneisenstein .....	1000	..
Kohle .....	1000 bis 10000	..

Abb. 11 sehen wir, wie dieser bei verschiedener Erderform ermittelt werden kann. In den Gleichungen bedeutet stets  $\rho$  den Widerstand der in Betracht kommenden geologischen Leiter. Dieser schwankt, wie wir

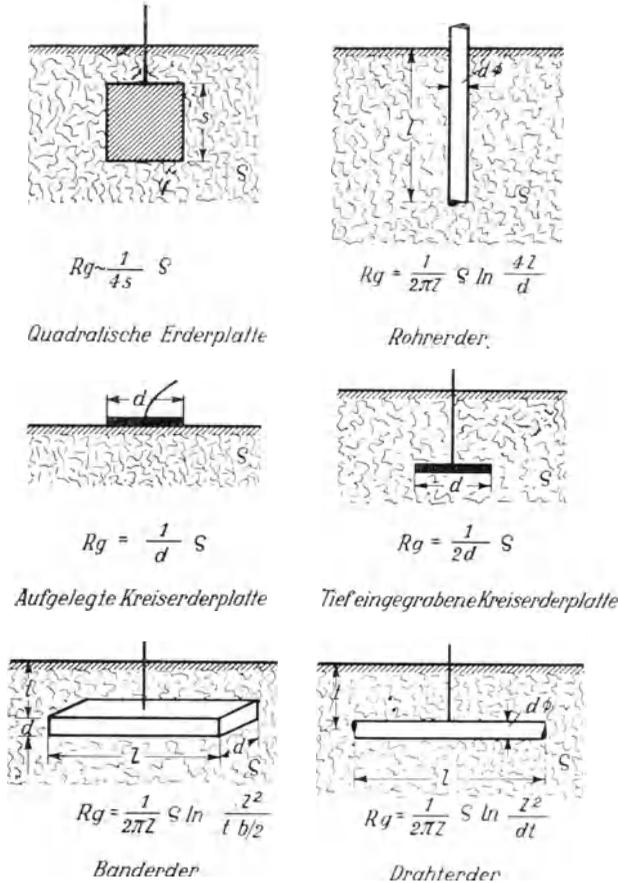


Abb. 11. Gebirgswiderstände (nach Löbl)

noch sehen werden, innerhalb weiter Grenzen. Es sind daher nur angenäherte Angaben möglich.

In der Tafel I sind einige Angaben für völlig trockene Gesteine zusammengestellt. Man sieht, daß die meisten geologischen Leiter Widerstandswerte aufweisen, die denen von guten Isolatoren durchaus entsprechen. Wir werden freilich noch sehen, daß unter dem Einfluß

der Feuchtigkeit diese Widerstandswerte rasch abnehmen. In Tafel II sind einige Werte für feuchte Gesteine angegeben. Es muß wieder betont werden, daß auch diese Werte nur größenordnungsmäßig zutreffen, da auch sie sehr beträchtlichen Schwankungen unterworfen sind. Wichtig sind für uns aber die Widerstandsangaben über verschiedene Böden. Die Tafel III enthält einige. Der Einfluß geologischer aber auch biologischer Faktoren kommt da deutlich zum Ausdruck.

Tafel II. Widerstände feuchter Gesteine

## a) Nach Reich

## α) Gesteine

Leiter	Trockenwiderstand $\Omega/\text{cm}^3$	„angefeuchtet“ $\Omega/\text{cm}^3$
Diabas .....	$3 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4$
Dolomit .....	$> 5 \cdot 10^6$	$4,6 \cdot 10^5$
Granit .....	$1,1 \cdot 10^7$	$3,6 \cdot 10^4$
Sandstein .....	$7,7 \cdot 10^7$	$6,5 \cdot 10^5$
Tonschiefer .....	$1,4 \cdot 10^8$	$9 \cdot 10^5$
Kalk .....	$1,3 \cdot 10^{10}$	$4,2 \cdot 10^7$

## β) Erze

Leiter	Höchstwert	Mindestwert
Sulfiderze mit 5...50 % Erzgehalt....	$2 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^5$ $\Omega/\text{cm}^3$	$1 \dots 8 \Omega/\text{cm}^3$
Gesteine mit weniger als 5 % Erzgehalt	$\sim 2 \cdot 10^{10}$	$\sim 8 \cdot 10^5$
Pyriterze .....	$\sim 10^4$	0,1
Bleizinkerz.....	$3,6 \cdot 10^3$	0,1
Graphitschiefer .....	$\sim 350$	$\sim 0,5$

## b) Nach Fritsch

Leiter	Trockenwiderstand	Feuchtwiderstand
Basalttuff .....	$16 \cdot 10^8 \Omega/\text{cm}^3$	$10^7 \Omega/\text{cm}^3$
Quarzgemenge .....	$13 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^6$
Sandstein .....	$10^7$	$10^5$
Schiefer .....	$1,2 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^5$
Lößlehm .....	3 bis $5 \cdot 10^5$	4 bis $7 \cdot 10^4$
Tephrit .....	$1,2 \cdot 10^6$	$10^6$
Kalksandstein .....	$10^7$	$6 \cdot 10^6$
Devonkalk .....	$1,2 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^5$
Hämatit .....	$1,7 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^4$

Tafel III. Leitfähigkeit von Böden

a) Nach Smith-Rose

Boden	Tiefe in m	Leitfähigkeit in $\Omega \cdot m$
Kalk .....	0,6	2500
	0,9	1100
	3,0	600
Blaue Tonerde .....	0,9	100—120
	3,0	130—140
Tonerde und Sand .....	0,6	110
	1,5	140

b) Nach Henney und Krönert

1. Nach Henney

Gruppe	Bodenart	1	2	Spezifischer Widerstand des gewachsenen Bodens bei verschiedenem Feuchtigkeitsgehalt
		Feuchtigkeitsgehalt bei Wassersättigung	Spezifischer Widerstand der gesättigten Böden bezogen auf 18° C	
		Gewichts-%	Ohmmeter	Ohmmeter
1	Nährstoffarme Sande (gelb bis weiß) .....	18—25	160—380	} 50—10 000
2	Nährstoffreiche Sande (grau und braun) .....	20—25	90—200	
3	Lehmhaltige Sande .....	17—25,5	60—130	
4	Sande aus Grundwasser ...	17,5—26	30—65	
5	Lehme. ....	20—37	15—60	15—250
6	Humus und Niedermoorböden bei verschiedenem Kalkgehalt .....	35—85	10—25	10—50

2. Nach Krönert

Bodenart	Spezifischer Widerstand Ohmmeter
Sandboden .....	50—10 000
Sandiger Lehm .....	20—330
Lehmboden .....	15—250
Humoser Sand } Moorboden }	10—50

Wenn man die in Abb. 11 zusammengestellten Angaben studiert, so wird man leicht erkennen, daß durch Vergrößerung der Erdoberfläche der Widerstand verkleinert werden kann. Der Zusammenhang zwischen Oberfläche und Widerstand ist indessen kein linearer, sondern er wird durch eine Kurve dargestellt, wie sie Abb. 12 z. B. für den

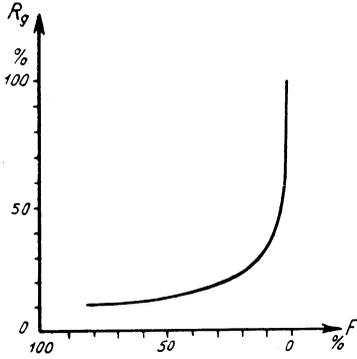


Abb. 12. Erderwiderstand

Plattenerder darstellt. Wir sehen, daß es keinen Sinn hat, mit der Oberfläche über ein bestimmtes Maß hinauszugehen. Vergrößern wir sie von 50 auf 100 Einheiten, so sinkt der Widerstand auf 10 Einheiten. Würden wir aber zwei Platten von je 50 Einheiten Oberfläche in genügendem Abstände verlegen, so erhielten wir einen Gesamtwiderstand von bloß 7 Widerstandseinheiten. Zur Erzielung geringer Widerstände ist nur in bestimmten Fällen die Platten-

oberfläche zu vergrößern. Weit besser ist wegen des Stromlinienverlaufes im allgemeinen die Anordnung von Gruppenerdern mit entsprechend kleineren Oberflächen.

Entscheiden wir uns für Gruppenerder, so müssen wir zwischen diesen einen entsprechenden Abstand einhalten, da sie sonst einander

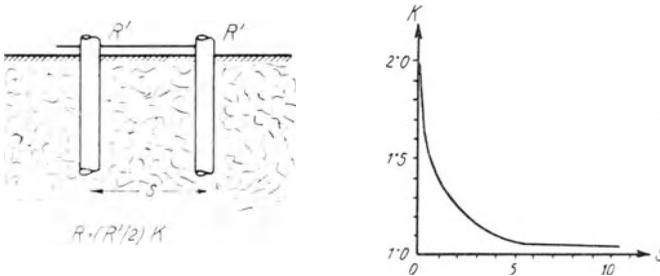


Abb. 13. Gruppenerder

stören. In Abb. 13 sehen wir ein Beispiel. Zwei Rohrerder  $R$  sollen im Abstände  $S$  angeordnet werden. Ist der Abstand dieser beiden sehr groß, so sind einfach die im Ersatzschema erscheinenden Widerstände parallel zu schalten. Der Gesamtwiderstand ist dann  $R/2$ . Bei

kleinem Abstände muß dieser aber noch mit einer Konstante  $k$  multipliziert werden, die aus der Kurve, die in Abb. 13 eingezeichnet ist, abgelesen werden kann. Man sieht, daß bei sehr nahen Erdern dieser Wert sich 2 nähert, daß also zwei Erder da den gleichen Widerstand haben wie ein einziger. Aus den hier angeführten Gründen sind daher auch Ringerder sehr vorteilhaft und werden sehr viel verwendet.

Wir haben bisher angenommen, daß die Erder in einen völlig homogenen Untergrund verlegt werden. Diese Annahme ist aber nicht mehr zulässig, wenn wir die Erdung im Gebirge vorzusehen haben, in dem oft nur wenige gutleitende Spalten zur Aufnahme des Erders geeignet sind. In solchen Fällen werden die Verhältnisse viel komplizierter und die in der Abb. 11 zusammen-

gestellten Gleichungen können dann nicht mehr verwendet werden. Ein Beispiel soll uns dies zeigen. In Abb. 14 sehen wir eine gutleitende Spalte  $Sp$ , die in schlecht leitendes Gebirge  $T$  eingelagert sein soll. Einmal wollen wir bei  $E_1$ , das andere Mal bei  $E_2$  erden. Der ungefähre Verlauf der Stromlinien ist eingezeichnet. Es ist klar, daß im ersten Falle der hohe Widerstand des schlechtleitenden Gesteines, das zwischen Erder und Spalte liegt, auch im

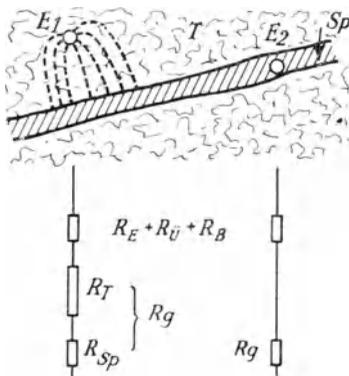


Abb. 14. Erdung in einer Spalte

Ersatzschema erscheinen muß. Der gesamte Gebirgswiderstand  $R_g$  wird daher im ersten Falle sowohl den Widerstand des trockenen Gesteines als auch jenen der gutleitenden Spalte berücksichtigen müssen, im zweiten Falle aber ist er nur von den in der Spalte enthaltenen guten geologischen Leitern abhängig. Die beiden eingezeichneten Ersatzschemen zeigen deutlich den Unterschied. Eine Berechnung solcher Fälle ist in der Regel unmöglich. Man muß da unbedingt durch Messung Aufschluß suchen.

## 2. Verändernde Einflüsse

Auch vom meßtechnischen Standpunkte aus betrachtet sind jene Faktoren von größter Bedeutung, die die elektrischen Eigenschaften der geologischen Leiter und damit auch die Ausbreitungswiderstände

der Erder oft innerhalb sehr weiter Grenzen verändern. Diese Einflüsse müssen deshalb vom Meßtechniker beachtet werden, weil dieser die Werte ermitteln muß, die auch unter den ungünstigsten Voraussetzungen noch eingehalten werden. Es hat z. B. keinen Sinn, eine Blitzerde etwa im Frühjahr zu vermessen, da zu dieser Jahreszeit erfahrungsgemäß die niedrigsten Werte erhalten werden, wenn man von gewissen Ausnahmen absieht. Die Blitzerde wird schließlich in der Gewitterzeit, also im oft sehr trockenen Hochsommer gebraucht, wo ihr Widerstand viel höher ist. Wenn nun der Meßtechniker auf solche Umstände nicht Bedacht nimmt, so kann er völlig unverläßliche Werte erhalten. Aus diesem Grunde sollen hier die verändernden Einflüsse kurz behandelt werden. Genauere Angaben sind den geoelektrischen und funkgeologischen Facharbeiten zu entnehmen. Es sind besonders wichtig:

- a) die Witterung,
- b) chemische Einflüsse,
- c) biologische Einflüsse,
- d) hydrologische Faktoren,
- e) mechanische Faktoren und sonstiges.

Um die Wirksamkeit dieser Einflüsse zu verstehen, müssen wir uns kurz den Aufbau des geologischen Leiters vor Augen halten. Wenn wir von einigen wenigen Ausnahmen, wie z. B. einigen Erzen absehen, so können wir uns den geologischen Leiter als ein sehr schlecht leitendes Gerüst vorstellen, in das gutleitende wässrige Lösungen eingelagert sind. Die elektrische Beschaffenheit eines solchen Gebildes wird also in erster Linie durch die Eigenschaften der Lösungen bestimmt, die den Porenraum erfüllen. Wird dieser Porenraum klein, so werden wir einen solchen geologischen Leiter vorwiegend als Dielektrikum behandeln und es wird dann die Dielektrizitätskonstante durch die feste Phase bestimmt. Es ist nun wichtig, daß schon verhältnismäßig geringe Spuren von Feuchtigkeit die Leitfähigkeit eines geologischen Leiters sprunghaft heraufsetzen können. Wenn wir den Ohmschen Widerstand eines solchen Leiters als Funktion seines Lösungsgehaltes darstellen, so erhalten wir Kurven, wie sie schematisch Abb. 15 zeigt. Auf der Abszisse ist die Durchfeuchtung in Milligramm-Lösung pro Kubikzentimeter, und auf der Ordinate der spezifische Widerstand des betreffenden geologischen Leiters aufgetragen. Wir sehen, daß die Kurve im Bereich der schwachen Durchfeuchtung ungemein steil verläuft. Dies hat zur Folge, daß in diesem Gebiet bereits ganz geringfügige

Feuchtigkeitsschwankungen sehr beträchtliche Widerstandsänderungen mit sich bringen können. Dies müssen wir auch vom meßtechnischen Standpunkt aus beachten. Wenn wir z. B. auf einem felsigen Untergrunde Elektroden auflegen, so können da schon geringfügige Witterungsunterschiede, wie z. B. die schwankende Bewölkung mit einer gewissen Phasenverschiebung, recht bedeutende Veränderungen des Widerstandes mit sich bringen. Je tiefer wir in das Gebirge eindringen, desto geringer werden dann die durch Witterungseinflüsse bedingten Unterschiede ausfallen. Freilich kann in einem spaltenreichen Gebiet die Wirksamkeit von Regengüssen noch recht weit hinabreichen. Im allgemeinen wird nach einem Regen die Spaltenfüllung mit Wasser durchtränkt sein und daher gut leiten.

Oft allerdings sind die Verhältnisse komplizierter. Besonders bei sehr intensiven Niederschlägen kann es nämlich vorkommen, daß Spalten ausgeschwemmt werden. Es werden dann aus ihnen die gutleitenden Lösungen entfernt und der Widerstand steigt an. Wenn man daher Messungen in Spalten durchführt, so wird es immer gut sein, diese zu verschiedenen Jahreszeiten oder zu mindestens während verschiedener Witterungsperioden zu wiederholen, um ein Bild über diese Einflüsse zu erhalten.

Weiß man dann, unter welchen Voraussetzungen z. B. der betreffende Widerstand seinen höchsten Wert erlangt, so genügt es natürlich, spätere Überprüfungen bei jener Witterung durchzuführen, bei der der gewünschte Höchst- oder Mindestwert zu erwarten ist. Aus Gründen der Sicherheit wird man die Messung natürlich immer unter den ungünstigsten Voraussetzungen durchzuführen haben.

In der Tafel IV sind eine Reihe von Werten zusammengestellt, die durch die Witterungseinflüsse bedingte Schwankungen des Erdausbreitungswiderstandes zeigen. Es handelt sich hier keineswegs um Werte, die extrem hohen Schwankungen unterworfen sind. Im Gebirge können mitunter weit stärkere Schwankungen auftreten. So wurden in vielen Fällen, insbesondere bei der Vermessung von Blitzezern während einer günstigen Witterungsperiode Werte um 10 bis 30 Ohm,

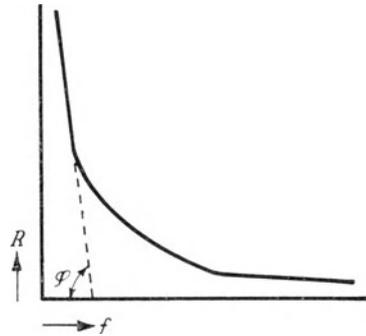


Abb. 15. Widerstandskurve



Prüftag	Wetter	E1 $\Omega$	E2 $\Omega$	E3 $\Omega$	E4 $\Omega$	E5 $\Omega$	E6 $\Omega$	E7 $\Omega$	E8 $\Omega$	E9 $\Omega$	E10 $\Omega$	E11 $\Omega$	E12 $\Omega$
Böhlitz (bei Wurzen).													
11. 5. 1929	trocken	3	7	5	10	10	12	20	20				
18. 4. 1933	feucht	14	38	13	10	10	14	9	8				
18. 4. 1935	„	35	200	7	14	14	13	6	6				
9. 4. 1937	„	48	200	3	14	14	8	13	13				
Böhlitz (bei Wurzen).													
11. 5. 1929	trocken	5	5										
18. 4. 1933	feucht	8	9										
18. 4. 1935	„	18	5										
9. 4. 1937	„	7	17										
Bone bei Zerbst (Anhalt).													
2. 7. 1930	trocken	7	18	7	17	3	4	6	5	12	12	12	12
2. 9. 1932	feucht	42	8	7	6	4	24	8	8	12	12	15	15
24. 10. 1934	trocken	30	12	7	6	16	16	7	8	19	19	14	14
14. 10. 1936	„	33	12	7	6	6	41	8	14	28	28	14	14
Breitenau (Liebstadt).													
13. 4. 1933	trocken	22	7										
31. 7. 1935	„	20	7										
7. 4. 1937	feucht	16	12										
c) Homogene Böden.													
Bockwitz (bei Leisnitz).													
13. 7. 1934	trocken	3	3	3	17	2	2	10					
26. 5. 1937	„	2	2	2	19	4	4	9					
Böhlitz (Leipzig).													
28. 4. 1932	trocken	10	12	18	15	15							
3. 4. 1935	feucht	10	15	17	18	13							
Borbas (Dresden).													
24. 3. 1931	trocken	15	10	10	8	8	12						
8. 8. 1934	„	20	11	11	8	8	13						
22. 4. 1937	feucht	13	8	8	10	10	9						
Börnchen (bei Rabenau).													
10. 8. 1934	trocken	4	9	2									
14. 4. 1936	„	8	12	2									
20. 5. 1938	„	6	9	1									
Bortewitz (Grimma i. Sa.).													
25. 4. 1931	trocken	9	2	12	2	4	5	5					
14. 4. 1934	„	6	3	12	3	5	8	8					
15. 4. 1937	„	3	2	11	2	3	8	8					
Bortewitz (Grimma i. Sa.).													
21. 4. 1931	feucht	6	22	22	16	12	12	15					
13. 4. 1934	trocken	5	36	36	32	40	40	28					

während der ungünstigsten Witterung dagegen an der gleichen Stelle solche in der Größenordnung von 1000 und mehr Ohm bestimmt.

Chemische Einflüsse bedingen in erster Linie eine Korrosion der Erdoberfläche. Die dadurch entstehenden Widerstandsschwankungen wurden bereits besprochen. Durch die Beschaffenheit der Pflanzendecke ist natürlich auch die Zusammensetzung jener organischen Lösungen bedingt, die dann in den Boden eingeschwemmt werden und seine Leitfähigkeit oft recht bedeutsam verändern. Aus diesem Grunde werden z. B. die Leitfähigkeitswerte unter abgeernteten Feldern andere sein als unter solchen, auf denen noch Getreide steht. Auch die Düngung ist von sehr großem Einfluß.

Sehr wichtig sind für uns auch die hydrologischen Voraussetzungen. Die elektrischen Eigenschaften des Wassers sind wieder ausschließlich durch die in ihm enthaltenen Lösungen bestimmt. Reines Wasser ist ein Nichtleiter und auch Oberflächenwasser leitet nur sehr schlecht. Gefriert das Wasser, so ändert sich damit auch sprunghaft seine Leitfähigkeit. Im allgemeinen ist der Widerstand des Eises sehr hoch. Man wird daher im Winter bei vereister Oberflächenschicht ganz andere Werte erhalten als zu anderen Jahreszeiten. Allerdings muß man berücksichtigen, daß die Leitfähigkeit des Eises sowohl von seiner Temperatur als auch von der Meßfrequenz abhängig ist. Besonders bei hohen Frequenzen sind die Voraussetzungen recht kompliziert. Es gibt da Frequenzbereiche, in denen die Leitfähigkeit des Eises wieder ansteigt. Überdies muß man beachten, daß schon ganz geringfügige Verunreinigungen ausreichen, um besonders bei Hochfrequenz die Leitfähigkeit des Eises sprunghaft hinaufzusetzen.

Das Grundwasser und das Spaltenwasser ändert unter dem Einfluß verschiedenster Faktoren seinen Widerstand. Wenn wir dem Untergrund in verschiedenen Teufen Wasserproben entnehmen, so werden auch diese ganz verschiedene Widerstandswerte ergeben. Es kommt da vor allem darauf an, welche löslichen Substanzen die Schichten enthalten, die das Spaltenwasser durchfließt. Mit der Bewegung des Grundwassers kann sich auch sein Widerstand verändern. Diese Schwankungen werden allerdings im allgemeinen nicht sehr groß sein. In Abb. 16 ist ein entsprechendes Beispiel eingezeichnet. Besonders wichtig sind für uns die Schwankungen des Grundwasserspiegels. Dadurch kann es möglich werden, daß zu bestimmten Jahreszeiten Erder im Grundwasser liegen, zu anderen dagegen im wesentlich schlechter leitenden trockenen Gestein. Vor der Anlage und auch

vor der Messung eines Erders wird man sich daher über solche Möglichkeiten Klarheit zu verschaffen haben.

Während längerer Zeiträume können sich durch natürliche oder künstliche Veränderungen des Grundwasserspiegels recht bedeutende Schwankungen am Erder ergeben. Fast stets wird es zu solchen kommen, wenn z. B. im Gelände Drainagen angelegt werden. In solchen Fällen empfiehlt sich immer die Nachmessung angelegter Erder.

Von mechanischen Einflüssen sei besonders die Setzung des Erdreiches hervorgehoben. Durch das Absetzen der Bettung entstehen

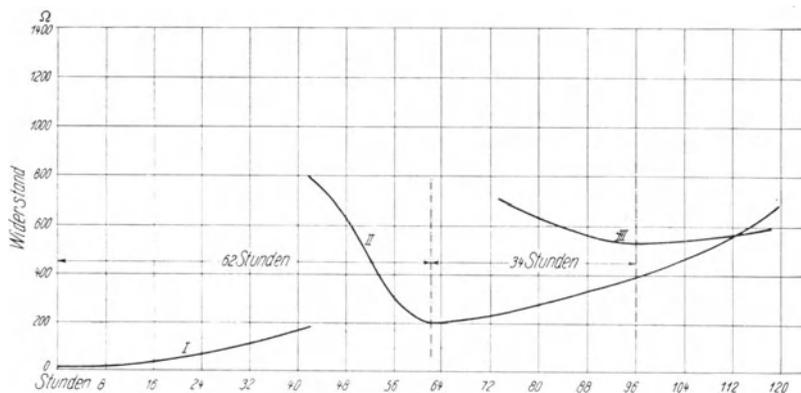


Abb. 16. Änderung des Grundwasserwiderstandes in drei in der Fließrichtung gelegenen Bohrlöchern I, II und III

zwischen Erder und Bettung besonders lockere Schichten, die einen recht hohen Widerstand aufweisen. Trotzdem sie oft wenig mächtig sind, können sie doch bei der niederfrequenten Messung einen hohen Gesamtwiderstand vortäuschen. Bei Blitzerden wird die Setzung keine Rolle spielen, weil natürlich die schlechtleitende Schicht ohne weiteres durchschlagen wird. Dagegen ist es möglich, daß durch Setzung Schutz- und Betriebserden unbrauchbar werden. Ähnliche Einflüsse können auch durch die Neuerrichtung von Gebäuden und durch das Wachsen der Wurzeln von Bäumen wirksam werden. Schließlich können auch noch neu verlegte Rohrleitungen, Schienen usw. den Erderwiderstand beeinflussen.

### III. Grundsätzliches über die Messung

Die Messungen, die wir nunmehr behandeln, haben alle den Zweck, den zwischen Erder und Erdpunkt wirksamen Widerstand zu bestimmen. Um die Messung durchzuführen, werden oft neben den zu messenden Erdelektroden noch andere nötig. Wir unterscheiden zwischen Hilfserden und Sonden. Unter beiden versteht man in der Regel bloß provisorisch verlegte Erdelektroden. Die Hilfserde wird von einem bestimmten Strom durchflossen. Aus diesem Grunde spielt auch der an ihr auftretende Spannungsabfall eine Rolle und muß daher ermittelt oder kompensiert werden. Die Sonde dagegen ist, nachdem sie abgeglichen wurde, praktisch stromlos und daher spielt auch ihr Übergangs-

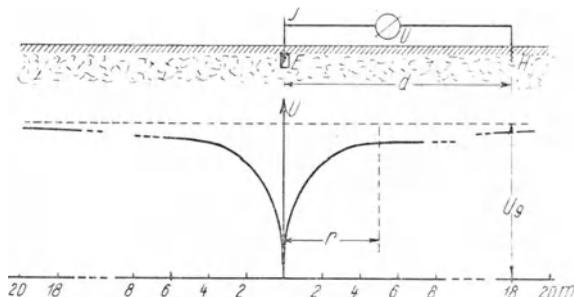


Abb. 17. Der Spannungstrichter

widerstand nur insofern eine Rolle, als er die Empfindlichkeit der Messung beeinflußt. Die zu bestimmende Erdung ist jeweils gegeben. Die erste Aufgabe besteht daher stets darin, zu dieser einen entsprechenden Erdpunkt zu finden. Erst dann kann zwischen beiden gemessen werden. Wir wollen uns daher zunächst mit der Bestimmung dieses Punktes befassen.

In Abb. 17 sehen wir bei  $E$  die zu vermessende Erdung. Im Abstände  $d$  wird eine Hilfserde verlegt ( $H$ ). Zwischen Erder und Hilfserde legen wir das Voltmeter  $U$ . Wenn wir nun den Abstand  $d$  vergrößern, so wird auch die gemessene Spannung ansteigen. Wir erhalten die im Schema eingezeichnete Kurve des Spannungsabfalles. Diese Kurve wurde von Rüdemberg für die halbkugelförmige Elektrode vom Radius  $r$  berechnet:

$$U = J \cdot \frac{\rho}{2 \pi r} \cdot \frac{d}{r + d}.$$

$\rho$  bedeutet den Widerstand des Untergrundes. Für andere Elektrodenformen muß man den sogenannten „äquivalenten Radius“  $r'$  an Stelle von  $r$  einsetzen. Die besprochene Kurve ist die Erzeugende eines Raumes, der ob seiner Form „Spannungstrichter“ heißt. Der bei einer Messung verwendete Erdpunkt muß außerhalb des steilen Teiles des Spannungstrichters liegen. In unserem Falle wird man annehmen dürfen, daß ein Punkt im Abstände  $r$  bereits außerhalb dieses Teiles liegt. Der Spannungswert  $U_0$ , dem sich die Kurve stetig nähert, wird in einem Abstände von ungefähr 20 m bei homogenem Boden zu ungefähr 95 % erreicht sein. Daher wird dieser Abstand als ausreichend betrachtet.

Als Hilfserde kann entweder ein Rohrerder von geringer Tiefe oder ein sogenannter kapazitiver Erder verwendet werden. Bei einem Rohr-

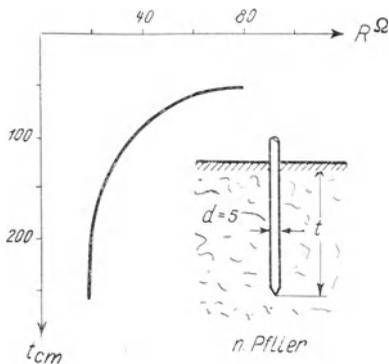


Abb. 18. Rohrerder

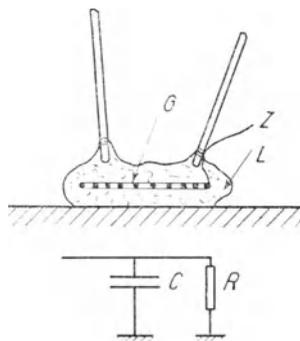


Abb. 19. Kapazitiver Erder

erder ändert sich der Widerstand sehr beträchtlich mit der Einschlagtiefe, wie das Schaubild in Abb. 18 zeigt. Wenn das Instrument  $U$  einen hohen Innenwiderstand hat, so werden die Schwankungen bei  $H$  keine große Rolle spielen. Außer dem in der Abbildung eingezeichneten Hilfserder muß natürlich noch ein zweiter verlegt werden, damit durch den Erder  $E$  ein Strom  $J$  hindurchfließt. Dieser zweite Hilfserder soll von dem eingezeichneten einen Abstand von mindestens 20 m haben. Dort, wo es unmöglich ist, Rohrerder rasch zu verlegen, wird an deren Stelle der kapazitiver Erder verwendet. Er ist besonders im Gebirge, dann auf Pflaster, auf Straßen usw. von Vorteil. Er ist schematisch in Abb. 19 dargestellt. Ein Metallgitter, das mit der Zuleitung  $Z$  verbunden ist, wird in einem lehmgefüllten Sack ( $L$ ) untergebracht. Dieser wird

dann mit Salzlösung stark durchfeuchtet. Mit den zwei eingezeichneten Stangen kann diese Sackelektrode rasch verschoben werden. Unter der Skizze ist auch das Ersatzschema dargestellt. Parallel zum oft recht hohen Übergangswiderstand liegt stets eine sehr beträchtliche Kapazität. Bei höheren Frequenzen wird der resultierende Widerstand ziemlich gering sein.

Wenn wir annehmen, daß der Spannungstrichter einen praktisch in Betracht kommenden Halbmesser von 20 m hat, so können wir für jede Erderform leicht die Konturen jenes Raumes zeichnen, innerhalb dessen kein Erdpunkt angenommen werden darf. Dieser Raum heißt oft „Sperraum“. Sein Schnitt mit der Erdoberfläche heißt Sperrfläche. Einige Formen zeigt uns die Abb. 20. Bei a) sehen wir einen punktförmigen Erder, also etwa einen Rohrerder  $E$ . Die

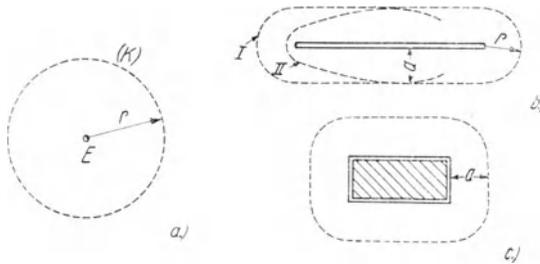


Abb. 20. Sperrflächen

Sperrfläche ist dann einfach ein Kreis vom Radius  $r = 20$  m. Bei b) sehen wir einen Bänderer. Bei ausgedehnteren Bänderern wird allerdings die Sperrfläche an Stelle der Form I die Form II annehmen. Am Ende des Erderbandes ist dann der Sperrabstand kleiner als 20 m. Schließlich sehen wir noch bei c), welche große Ausdehnung die Sperrfläche oft bei Ringerdern annehmen kann. Die Konstruktion der Sperrfläche soll jedesmal vor der Messung durchgeführt werden. Oft wird der Fehler begangen, daß lediglich der Abstand der Hilfserde oder Sonde von der Erdleitung gemessen wird. Dies genügt aber nicht, da es besonders bei verzweigten Erdern immer innerhalb der ganzen Sperrfläche Punkte geben wird, die von der Erdleitung 20 und noch mehr Meter entfernt sind.

An Stelle des künstlich verlegten Erders kann natürlich auch irgendein Leiter treten, der mit dem Erder in gutleitender Verbindung steht. Als solcher kann z. B. eine Wasserleitung in Betracht kommen.

In Abb. 21 sehen wir eine Wasserleitung  $R$ , die mit dem Blitzzerder  $E$  verbunden ist. Wenn diese in schlechtleitendem Erdreiche verlegt ist, so müssen wir auch für diese die eingezeichnete Sperrfläche von der Breite  $2d$  zeichnen. Auch hier wird allerdings in größerem Abstände vom Erder die eingezeichnete Breite kleiner werden. Die Form der Sperrfläche in größerem Abstände vom Erder wird auch von der Bodenleitfähigkeit abhängig sein. Vor jeder Messung wird man daher auch die Umgebung der Meßstelle auf Leitungen aller Art abzusuchen haben.

Wir haben bisher immer angenommen, daß der Untergrund homogen sei. Trifft nun diese Voraussetzung nicht mehr zu, so werden die Voraussetzungen wesentlich komplizierter. Wenn wir z. B. im ansonsten schlechtleitenden Gebirge den Erder in einer gutleitenden Spalte ver-

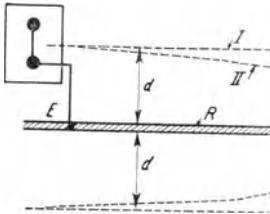


Abb. 21. Sperrfläche für eine Wasserleitung

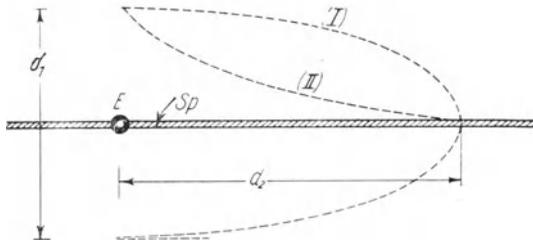


Abb. 22. Erdung in Spalte

legen, so wird diese eine ähnliche Funktion übernehmen wie eine angeschlossene Wasserleitung. Auf ihre abweichende räumliche Beschaffenheit gegenüber einer solchen Leitung muß allerdings Bedacht genommen werden. Die Leitfähigkeitsunterschiede können dagegen in beiden Fällen ganz ähnliche sein. Der spezifische Widerstand der Spaltenfüllung wird sehr oft einige Zehnerpotenzen unter jenem des anstoßenden festen Felsens liegen. Einen solchen Fall zeigt Abb. 22. Der Erder  $E$  ist in der Spalte  $Sp$  geerdet. Je nach der Ausdehnung der Spalte und dem Leitfähigkeitsunterschied gegenüber dem festen Boden wird die Sperrfläche Formen annehmen, die zwischen den beiden eingezeichneten liegen werden. Die Dimensionen  $d_1$  und  $d_2$  sind vor allem von der Tiefe, der Mächtigkeit und Leitfähigkeit der Spalte abhängig. Eine mathematische Berechnung ist kaum möglich. Man wird durch Vermessung einer größeren Zahl von Einzelpunkten versuchen, die Ausdehnung der Sperrfläche zu ermitteln.

Oft ist die Sperrfläche aber noch durch andere Faktoren begrenzt. Bei der Vermessung von Leitungsmasten wird z. B., wie dies Abb. 23 zeigt, bei homogenem Untergrunde die Sperrfläche durch einen Kreis

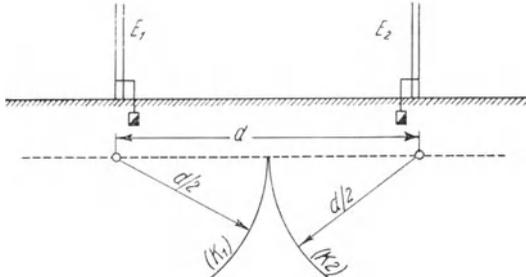


Abb. 23. Sperrfläche in einer Leitungstraße

dargestellt, dessen Halbmesser nicht größer als der halbe Mastenabstand angenommen werden darf. Würde man den Radius dieses Kreises über den Betrag  $d/2$  hinaus vergrößern, so käme man bereits in das Sperrgebiet des Nachbarmastes. Dieser Umstand wird oft sehr unangenehm empfunden. Man wird da

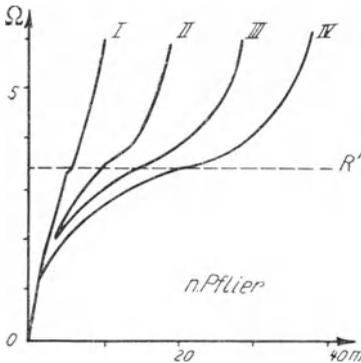


Abb. 24. Einfluß des Hilfserderabstandes

zu Korrekturen greifen müssen, die durch Messungen an einzelstehenden Masten bestimmt wurden. In Abb. 24 sehen wir ein Diagramm für einen Einzelmast. Der wahre Erderwiderstand  $R'$  beträgt 3,5 Ohm. Es wurden nun vier verschiedene Kurven aufgenommen, die vier verschiedenen Hilfserderabständen entsprechen (Kurve I ... 10 m, Kurve II ... 20 m, Kurve III ... 30 m, und Kurve IV ... 40 m). Auf der Verbindungslinie des Erders mit

dem Hilfserder wurde dann die Sonde verschoben. Das Meßverfahren wird noch später genauer besprochen werden<sup>1)</sup>. Hier sollen lediglich die verschiedenen Ergebnisse miteinander verglichen werden. Auf der Abszisse sind die Abstände der Sonde vom Mast und auf der Ordinate die zugehörigen Erdungswiderstände aufgetragen. Man erhält, wie die

<sup>1)</sup> Siehe S. 40 u. ff.

Abbildung zeigt, den wahren Erdungswiderstand  $R'$ , wenn die Entfernung der Sonde vom Erder gleich der halben Hilfserderentfernung entspricht. Dieses Diagramm können wir auf eine Mastenreihe anwenden, wenn wir an die Stelle der Hilfserdung den benachbarten Mast setzen und die Sonde entlang der Verbindungslinie der beiden Masten bewegen. Wenn ein Erdseil vorhanden ist, so ergeben sich allerdings wesentliche Komplikationen. Wird das Erdseil über den Phasenseilen verspannt, so ist es unbedingt abzuklemmen und zu isolieren. Ist dies unmöglich, so erhält man den resultierenden Widerstand mehrerer Maste, der oft

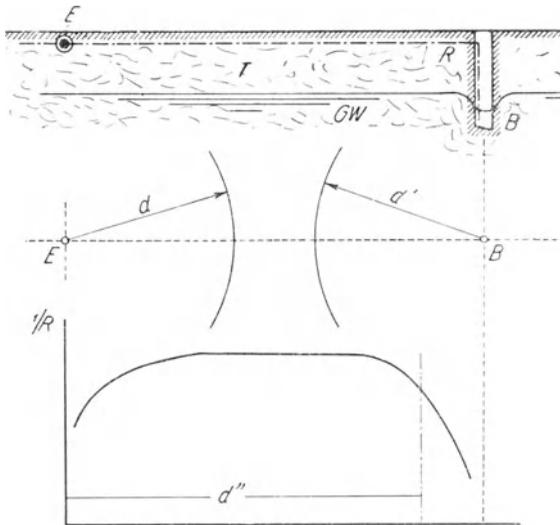


Abb. 25. Erdung an Rohrleitung

überhaupt gar keinen Anhaltspunkt für die Beurteilung der Brauchbarkeit der Erdung bieten kann. Ist das Seil abklemmbar, so mißt man dann in der Regel „über Seil“, d. h. man verwendet die an das Seil angeschlossenen Nachbarmasten gleich als Hilfserder. Ist das abklemmbare Erdseil am Boden verlegt (Bodenseil), so können die nach diesen Diagrammen erhaltenen Werte oft von den wahren sehr stark abweichen.

Mitunter kann der Erdpunkt auch verlagert werden. Ein typisches Beispiel zeigt die Abb. 25. Wir sehen hier eine Wasserrohrleitung  $R$ , die in einem sehr schlechtleitenden Untergrund  $T$  verlegt ist. Sie steht erst im Brunnen  $B$  mit dem gutleitenden Grundwasser  $GW$  in Berührung.

Die Erdung liegt also in diesem Falle praktisch nicht bei  $E$ , sondern vielmehr bei  $B$ . Es wird wohl auch bei  $E$  ein geringerer Übergangswiderstand zu verzeichnen sein als entlang der übrigen Rohrleitung. Dies wird schon dadurch bedingt sein, daß durch die Aufgrabung das Erdreich an dieser Stelle etwas gelockert wird, daß es sich möglicherweise mit dem eindringenden Regenwasser vollsaugen wird und dadurch seine Leitfähigkeit gegenüber der Umgebung erhöht. Unter dem Schnitt sehen wir die beiden Kreise mit dem Halbmesser  $d$  eingezeichnet, die die Sperrflächen begrenzen. Würden wir nur den Kreis um  $E$  berücksichtigen, so könnten wir in diesem Falle eine ganz falsche Messung erhalten. Wenn wir nämlich den Erdpunkt zwischen  $E$  und  $B$  wählen, und zwar so, daß sein Abstand von  $E$  viel größer ist als  $d$ , so könnten wir leicht in die Sperrfläche geraten, die um die eigentliche Erdung  $B$  angenommen werden muß. In unserem Falle wird es daher wohl zulässig sein, einen kleineren Abstand als  $d$  zu verwenden, während ein größerer Abstand, etwa  $d''$ , wie aus der Abbildung deutlich zu ersehen ist, schon unzulässig wäre. In der Abbildung ist der Doppelspannungstrichter entsprechend eingezeichnet.

Schon aus diesen Ausführungen können wir ersehen, daß die Bestimmung der Sperrfläche keineswegs immer einfach ist und daß daher ein rein schematischer Vorgang für ihre Konstruktion unbedingt abgelehnt werden muß. Ist die Sperrfläche bestimmt, so kann die Elektrodenanordnung festgelegt werden. Im einfachsten Fall bilden die zu messende Erdung, die Sonde und die Hilfserde die Eckpunkte eines gleichseitigen Dreieckes. Die Seitenlänge dieses Dreieckes entspricht dem Halbmesser des schon besprochenen Spannungstrichters. Diese Anordnung ist indessen nur dann zulässig, wenn der Untergrund völlig homogen ist und die Elektroden als punktförmig angenommen werden dürfen. Oft werden Erde, Sonde und Hilfserde auch auf einer Geraden angeordnet. In diesem Falle beträgt dann der Abstand der Sonde vom Erder 20 m und der Abstand der Hilfserde ungefähr 40 m. Auch diese Anordnung kann natürlich nur wieder im völlig homogenen Untergrunde ein richtiges Ergebnis liefern. Viel schwieriger werden die Verhältnisse, wenn wir wieder einen Untergrund gegeben haben, der aus Leitern verschiedenen spezifischen Widerstandes besteht. In der Abb. 26 sind die hier gegebenen prinzipiellen Möglichkeiten miteinander verglichen. Links sehen wir zunächst zum Vergleich den einfachsten Fall. Die Erdung  $E$ , die Sonde  $S$  und die Hilfserde  $H$  sind auf einer Geraden angeordnet. Der Boden

selbst sei völlig homogen. Darunter ist das Ersatzschema gezeichnet.  $R_E$  soll die Summe aus Übergangs- und Bettungswiderstand für den Erder,  $R_H$  die gleiche Summe für den Hilferder darstellen. Der Übergangswiderstand der Sonde ist nicht eingezeichnet, da er, wie wir schon gesehen haben, bedeutungslos ist.  $R_G$  ist wieder der Gebirgs-  
widerstand. In diesem Falle wird einfach ein bestimmter Teil des Gebirgs-  
widerstandes gemessen, und bei entsprechend großem Sonden-  
abstand erhalten wir dann einen Widerstand, der dem schon besprochenen

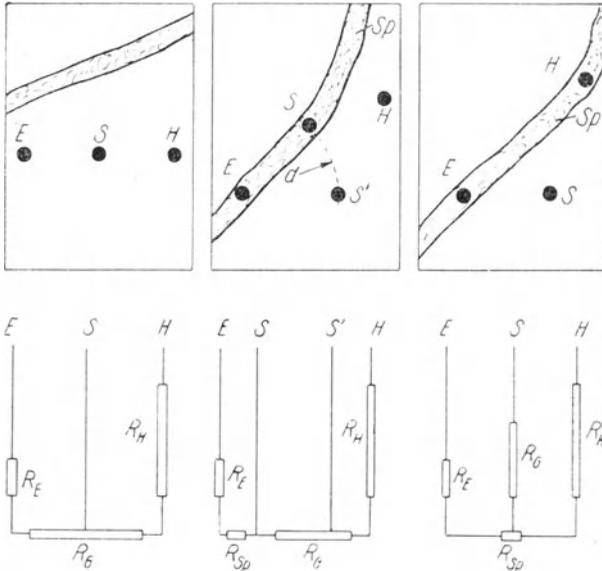


Abb. 26. Elektrodenanordnung in Spalten

Grenzwert sehr nahe kommt. Viel komplizierter ist der in der Mitte be-  
zeichnete Fall. Hier ist der Untergrund nicht mehr homogen. Er setzt sich  
vielmehr aus zwei Teilen zusammen, nämlich aus einem sehr schlecht-  
leitenden Felsgrund und einer mit guten Leitern erfüllten Spalte  $Sp$ .  
Der Erder sei aus Gründen der Zweckmäßigkeit in der Spalte selbst  
verlegt. Die Hilferde  $H$  dagegen wird an irgendeiner beliebigen Stelle  
außerhalb der Spalte angebracht. Die Sonde soll einmal in der Spalte  
verlegt werden ( $S$ ), das andere Mal in größerer Entfernung von dieser ( $S'$ ).  
Der Sondenabstand  $d$  soll aber in beiden Fällen gleich sein. In dem  
darunter gezeichneten Ersatzschema sind diese beiden Möglichkeiten

vorgezeichnet. Wir sehen, daß in beiden Fällen verschiedene Widerstandswerte erhalten werden. Nehmen wir nun an, daß der Widerstand der Spaltenfüllung gegenüber jenem des felsigen Gebirges vernachlässigt werden kann, so sehen wir ein, daß die Sonde auf ein Potential gebracht wird, das von jenem am Rande der Bettung des Erders nicht sehr verschieden sein wird. Wir werden also in diesem Falle praktisch einen Wert erhalten, der sehr gering ist. Wenn wir nun aber z. B. senkrecht zur Spalte messen, so werden wir natürlich einen weit höheren Wert bekommen. Dieser zweite Wert hat aber für uns keine Bedeutung, da natürlich die Ableitung durch die Spaltenfüllung stattfinden wird. Einen dritten Fall sehen wir rechts. Hier sind sowohl der Erder als auch der Hilfserder in die Spalte verlegt, während die Sonde seitwärts von

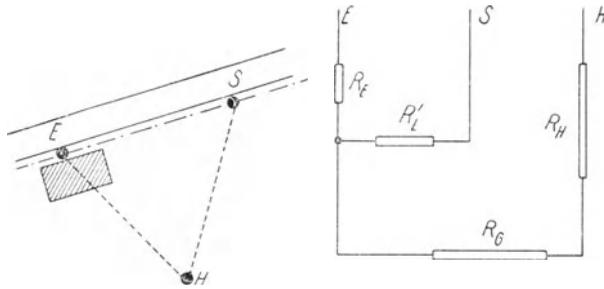


Abb. 27. Rohrleitung als Erdung

dieser im felsigen Gebirge angebracht wird. In diesem Falle erhalten wir das darunter eingezeichnete Ersatzschema. Der hohe Widerstand des felsigen Gebirges ist diesmal dem Übergangswiderstand der Sonde in Reihe geschaltet und spielt daher, ebenso wie dieser selbst, keine besondere Rolle. Man wird also diesmal brauchbare Werte erhalten. In der Natur liegen natürlich die Verhältnisse in den meisten Fällen noch komplizierter. Sehr oft haben wir es da mit ganzen Spaltensystemen zu tun. Um da richtige Angaben zu erhalten, muß man unbedingt zu irgendeinem Erder die Sperrfläche punktweise konstruieren. Unterläßt man es, so kann man Ergebnisse erhalten, die gar keine praktische Bedeutung haben.

Den gleichen Einfluß wie eine gutleitende Spalte kann auch ein technischer Leiter ausüben, also z. B. eine Wasserrohrleitung, die mit der Erdung verbunden ist. Diesen Fall zeigt Abb. 27. An die Rohrleitung  $L$  ist die Erdung  $E$  angelegt. Wir wollen nun annehmen, daß



Untersuchung durchzuführen, bedarf es hochfrequenztechnischer Verfahren. Ein Beispiel zeigt die Abb. 29. Wir sehen hier bei  $E$  den Anschluß eines Blitzableiters an die Wasserleitung  $L$ . Diese soll in beträchtlicher Länge in einem sehr schlechtleitenden Untergrund verlegt sein. Erst im Brunnen  $B$  steht sie mit dem gutleitenden Grundwasser in Kontakt. In diesem Falle genügt es, da der Abstand zwischen  $E$  und  $B$  sehr groß ist, nicht mehr, ausschließlich den Ohmschen Widerstand der Rohrleitung zu ermitteln, es muß vielmehr auch deren Wellenwiderstand gemessen werden. Der Wellenwiderstand  $Z$  ist bekanntlich bei verlustlosen Leitern

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Im Ersatzschema (Abb. 30) ist nur die induktive Komponente berücksichtigt. Je größer die Kapazität der Leitung sein wird, desto

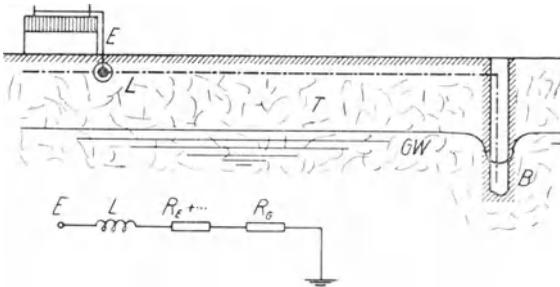


Abb. 29. Erdung an langer Leitung

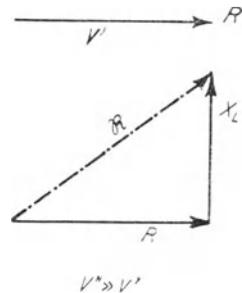


Abb. 30. Widerstandsdiagramme

geringer wird der Wellenwiderstand, und je größer die Induktivität ist, desto größer wird auch dieser Widerstand sein. Durch eine Gleichstrommessung oder aber eine Messung mit niederfrequentem Wechselstrom ist es unmöglich bzw. sehr schwer möglich, den Wert der eingeschalteten Induktivität  $L$  zu bestimmen. Mittels Hochfrequenz dagegen ist dies, wie wir noch sehen werden, in einfacher Weise möglich. In Abb. 30 sehen wir die zugehörigen Diagramme. Oben erscheint lediglich der Ohmsche Widerstand  $R$ , da die Frequenz  $\nu'$  sehr klein ist. Unten dagegen sehen wir den resultierenden Widerstand  $\mathfrak{R}$ , der sich aus einer Ohmschen und induktiven Komponente zusammensetzt. Dieses Diagramm werden wir bei hoher Frequenz erhalten. Der absolute Wert des resultierenden Widerstandes ist viel

größer als der der rein Ohmschen Komponente und steigt mit zunehmender Frequenz an. Ebenso wechselt mit zunehmender Frequenz der Phasenwinkel. Neben der Induktivität ist, wie schon erwähnt, die Kapazität der betreffenden Leitung gegen Erde, sowie deren Ableitung zu berücksichtigen. Das vollständige Ersatzschema nimmt daher die in Abb. 31 gezeichnete Form an. Man könnte nun natürlich nach der Vierpoltheorie auch für dieses Gebilde die entsprechenden Werte berechnen. Praktisch wird dies aber kaum möglich sein, und zwar vor allem deshalb, weil sich die Ableitungen über die Länge in der Regel ungleichmäßig und in unbekannter Weise verteilen. In diesen Fällen ist daher unter allen Umständen der Messung gegenüber der Berechnung der Vorzug zu geben. Je kleiner natürlich die Ableitungswiderstände sein werden, desto weniger wird der Einfluß der eingeschalteten Induktivitäten sich bemerkbar machen. Wenn daher eine solche lange Leitung in der Nähe der Anschlußstelle der Erdleitung irgendwelche gute geologische Leiter quert, so ist sie auf jeden Fall als günstige Erdung anzusehen. Ist dies aber nicht der Fall, so kann sie mitunter vollkommen versagen, und zwar auch dann, wenn die mit niederfrequenten Verfahren bestimmten Widerstandswerte noch durchaus zulässig wären.

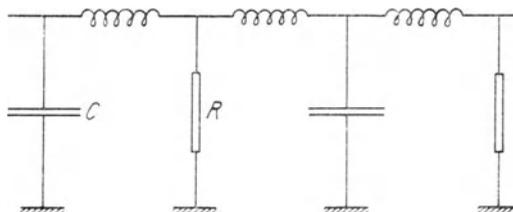


Abb. 31. Ersatzschema für lange Erdleitung

Um den Übergangswiderstand zu bestimmen, empfiehlt sich die Unterteilung des Erdders in zwei Teile, die nebeneinander verlegt werden und normalerweise parallel geschaltet werden. Bei der Vornahme der Messung wird dann die Verbindungsklemme gelöst und der zwischen den beiden Platten liegende Widerstand bestimmt. Da die Platten dicht nebeneinander liegen, so wird der zwischen ihnen eingeschaltete Bettungswiderstand nur gering sein und die Messung ergibt in guter Annäherung den Übergangswiderstand. Auf diese Weise können insbesondere Widerstandsänderungen ermittelt werden, die infolge der Korrosion auftreten. Dort, wo es nicht möglich ist, den Erdder zu unterteilen, kann ebenfalls wieder durch Hochfrequenzmessung der Übergangswiderstand bestimmt werden. Das Grundprinzip dieser Anordnung ist einfach. In Abb. 32 sehen wir zunächst bei *a* das normale Ersatzschema für einen Erdder. Der oberste Widerstand ist durch die

Leitungswiderstände und die Bettung bestimmt, der mittlere ist der Übergangswiderstand und der unterste schließlich der Gebirgs-  
 stand. Parallel zum Übergangswiderstand müssen wir, mit Rücksicht  
 darauf, daß die oft schlechtleitende Schicht nur sehr schwach ist, noch  
 eine Kapazität geschaltet denken. Wenn wir nun mit Gleichstrom

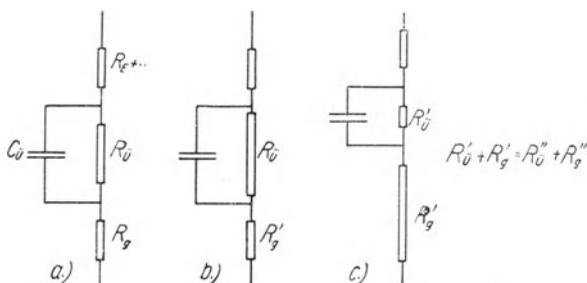


Abb. 32. Ermittlung des Übergangswiderstandes

oder niederfrequentem Wechselstrom messen, so können wir im all-  
 gemeinen nur die Summe dieser Widerstände ermitteln. Eine Wider-  
 standserhöhung kann aber einmal dadurch entstehen, daß der Gebirgs-  
 widerstand zunimmt, das andere Mal durch eine Veränderung des Übergangs-  
 widerstandes infolge Korrosion, Setzung  
 oder ähnlicher Ursachen. Bei vielen  
 Erdungen haben wir nun ein Interesse  
 daran, diese beiden Möglichkeiten aus-  
 einanderzuhalten. Bei b) sehen wir eine  
 Erhöhung des Übergangswiderstandes,  
 bei c) eine solche des Gebirgs-  
 widerstandes. Die Summe der Widerstände  
 ist in beiden Fällen gleich. Infolge der  
 auftretenden kapazitiven Komponente  
 ist es nun möglich, durch hochfrequente  
 Vermessung diese beiden Fälle aus-  
 einanderzuhalten.

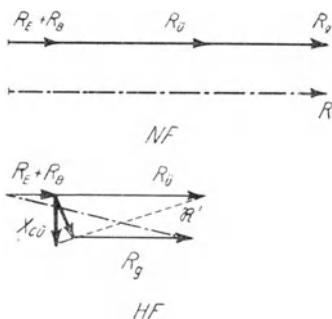


Abb. 33. Widerstandsdiagramm.  
 Der resultierende Widerstand  $\mathfrak{R}'$  ist  
 strichpunktirt ausgezogen

In Abb. 33 sehen wir das zugehörige Widerstands-  
 diagramm. Oben sind die Verhältnisse bei Niederfrequenz dargestellt.  
 Die Messung ergibt den resultierenden Widerstand  $R$ . Messen wir  
 nun mit Hochfrequenz, so erhalten wir an dessen Stelle einen resul-  
 tierenden Widerstand  $\mathfrak{R}'$ . Je höher wir die Frequenz wählen, desto mehr

wird überhaupt der Einfluß des Übergangswiderstandes ausscheiden. Wenn wir daher durch Vergleich der beiden Messungen feststellen, daß der resultierende Widerstand stark abgenommen hat, so können wir in den weitaus meisten Fällen sicher annehmen, daß die Widerstandserhöhung an der Berührungsfläche zwischen Erder und Bettung stattfand.

Gehen von einer Erdungsstelle mehrere Erdleitungen aus, denen verschiedene Widerstände zugeteilt sind, so kann der resultierende Widerstand am einfachsten graphisch ermittelt werden. Dies ist in Abb. 34 dargestellt. Die Erdungen  $E_1 \dots E_2 \dots E_3$  sind parallel geschaltet. Der resultierende Widerstand kann in folgender Weise erhalten werden: Auf den drei aufeinander senkrecht stehenden Radien

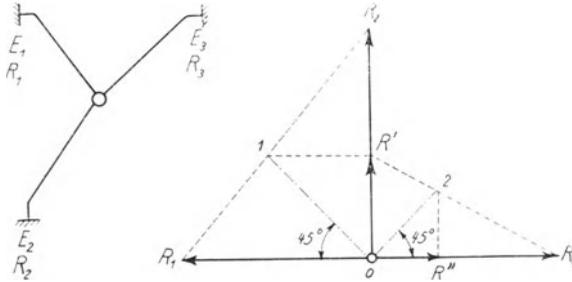


Abb. 34. Ermittlung des resultierenden Widerstandes

werden die drei Widerstandswerte aufgetragen. Dann wird zunächst der Endpunkt von  $R_1$  mit jenem von  $R_2$  verbunden. Unter  $45^\circ$  wird dann die Gerade  $0 - 1$  errichtet. Ihre Projektion auf den Radius  $R_1$  entspricht dann dem resultierenden Widerstand von  $R_1$  und  $R_2$ . Dieser ist bekanntlich:

$$R' = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

In ähnlicher Weise findet man dann  $0 - 2$  und den gesamten Widerstand  $R''$ .

Nach diesem Verfahren können rasch beliebig viele Einzelwiderstände in Parallelschaltung berechnet werden.

Nummehr wollen wir die prinzipiell wichtigen Meßverfahren behandeln. Wir müssen da zwei Gruppen unterscheiden. In die erste gehören jene, die aus einer einzigen Messung den Ausbreitungswiderstand eines einzelnen Erders ermitteln können. Außer diesen Verfahren

gibt es dann noch solche, die stets mehrere, mindestens aber zwei Erder gleichzeitig vermessen. Diese gestatten dann durch Rechnung die Ermittlung der Einzelwiderstände. Es ist klar, daß die Verfahren der ersten Gruppe ein rascheres Arbeiten gestatten. Unter bestimmten Voraussetzungen haben sich indessen auch die anderen noch behaupten können.

Das einfachste Verfahren ist in Abb. 35 skizziert. Durch den Erder  $E$  fließt der Strom  $J$ . Die Spannung zwischen der Erdleitung und dem Erdpunkte soll  $U$  betragen. Die Elektrode  $S$  muß also in einem Abstände  $d$  eingesteckt werden, der größer als der Halbmesser

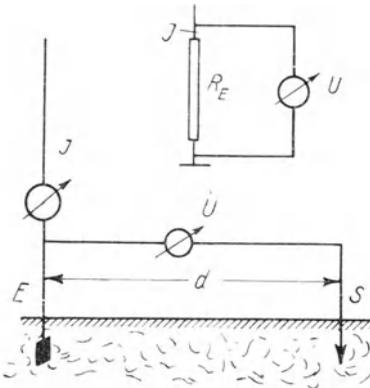


Abb. 35. Strom- und Spannungsmessung an einem Erder

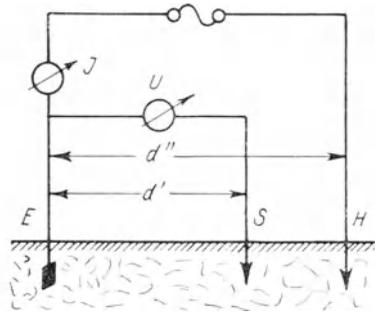


Abb. 36. Meßanordnung

des Spannungstrichters ist. Wir können dann das in der gleichen Skizze eingezeichnete Ersatzschema zeichnen, in dem  $R_E$  den gesamten Ausbreitungswiderstand bezeichnet. Bekanntlich ist dieser dann:

$$R_E = U/J.$$

Um diese Messung an irgendeinem Erder durchführen zu können, müssen wir die in Abb. 36 dargestellte Anordnung aufbauen. Im Abstände  $d'$ , der größer als der Halbmesser des Spannungstrichters ist, wird die Elektrode  $S$  eingesteckt. Im Abstände  $d''$ , der ungefähr doppelt so groß wie  $d'$  ist, wird eine Hilfserde verlegt. Als solche dient in der Regel ein Erdspeiß oder eine der schon eingangs beschriebenen Hilfselektroden. Der Widerstand dieser Hilfserde ist in diesem Falle nicht von ausschlaggebender Bedeutung, wird er aber zu hoch, so leidet die Meßgenauigkeit. Zwischen  $E$  und  $H$  wird eine Stromquelle

eingeschaltet. Als solche kommt stets ein Wechselstromerzeuger in Betracht, da Gleichstrom aus bekannten Gründen wegen der auftretenden elektrochemischen Effekte für solche Messungen ungeeignet ist. Der Ausbreitungswiderstand des Erdsers  $R_E$  ist wieder  $U/J$ . Bei dieser Anordnung wird die Elektrode  $S$  nicht stromlos sein, was zu Störungen Anlaß geben kann. Neuerdings werden meist Abgleich-

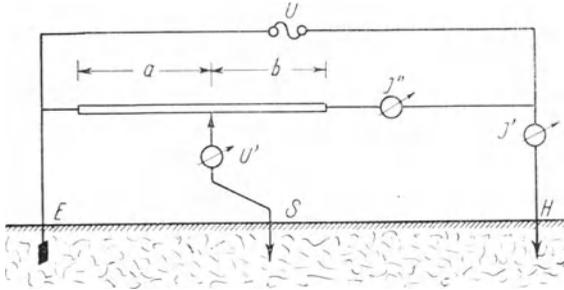


Abb. 37

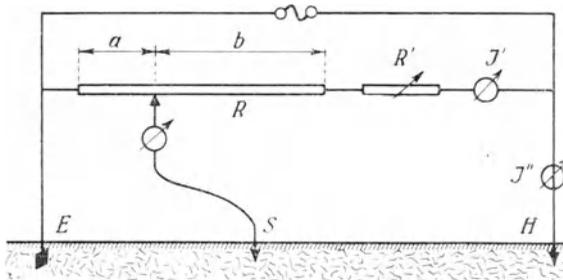


Abb. 38

Abb. 37 und 38. Abgleichverfahren

verfahren verwendet, bei denen die Hilfselektrode  $S$ , die dann als Sonde bezeichnet wird, stromlos bleibt. Das Schema einer solchen Meßanordnung ist in Abb. 37 dargestellt. An die gemeinsame Stromquelle  $U$  sind zwei Kreise angeschlossen. Der eine besteht aus einem Widerstände  $R$ , der andere aus den hintereinander geschalteten Widerständen  $R_E$  und  $R_H$ . Die beiden Stromstärken sind dann bekanntlich

$$J' = U/R_E + R_H \quad \text{und} \quad J'' = U/R.$$

Wenn nun die Sonde  $S$  wieder außerhalb des Spannungstrichters liegt und der Gleitkontakt am Widerstande  $R$  so eingestellt wird, daß der Spannungsabfall  $U'$  Null wird, so erhalten wir:

$$J' \cdot R_E = J'' \cdot \frac{a}{a+b} \cdot R$$

oder

$$R_E = R \cdot \frac{a}{a+b} \cdot \frac{J''}{J'}$$

Wir sehen gleich, daß eine praktisch verwendbare Messung nur dann möglich sein wird, wenn

$$\frac{J''}{J'} = 1$$

oder sonst bekannt und womöglich ganzzahlig wird. Um dies zu erreichen, legt man zu  $R$  in Reihe noch einen weiteren regelbaren Widerstand  $R'$  und erhält dann das in Abb. 38 dargestellte Schema. Zunächst muß der Widerstand  $R'$  so eingestellt werden, daß die beiden Stromstärken  $J'$  und  $J''$  einander gleichen. Es ist dann der Forderung

$$\frac{R + R'}{R_E + R_H} = \frac{J''}{J'} = 1$$

Genüge geleistet. Unter dieser Voraussetzung wird jetzt

$$R_E = R \left( \frac{a}{a+b} \right).$$

Der Widerstand  $R$  kann also entsprechend unterteilt werden und die Größe des Erderausbreitungswiderstandes kann an diesem einfach abgelesen werden. Dieses Verfahren arbeitet sehr einfach. Es sind nur zwei Meßgänge nötig. Zunächst müssen die beiden Kreise abgeglichen werden. Dies kann entweder durch Vergleich zweier Milliamperemeter oder Ablesung eines entsprechenden Differentialinstrumentes geschehen. Ist dies geschehen, so wird der Abgriff an  $R$  solange verschoben, bis auch das im Sondenzweige liegende Nullinstrument Spannungslosigkeit zeigt. Dann kann gleich der entsprechende Widerstand ohne irgendwelche Rechnung abgelesen werden. Man hat nun versucht, auch diese Messung noch weiter zu vereinfachen. Eine entsprechende Anordnung zeigt die Abb. 39. In die beiden Stromkreise sind die Widerstände  $R_1$

und  $R_2$  eingeschaltet. Zwischen diesen liegt wieder das Nullinstrument  $U$ . Zeigt dieses Spannungslosigkeit an, so erhalten wir:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{J_1}{J_2} = k$$

und

$$R_E = R \frac{a}{a + b} \cdot k.$$

Wir können also den Meßbereich dieses Instrumentes einfach durch Veränderung des Widerstandsverhältnisses ändern. Die beiden Instru-

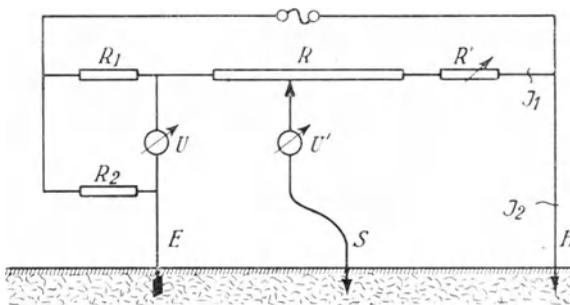


Abb. 39. Einfaches Abgleichverfahren

mente  $U$  und  $U'$  werden praktisch natürlich zusammengelegt. Durch einen entsprechenden Umschalter kann zunächst die Abgleichung am Widerstände  $R'$  und dann jene am Widerstände  $R$  überprüft werden.

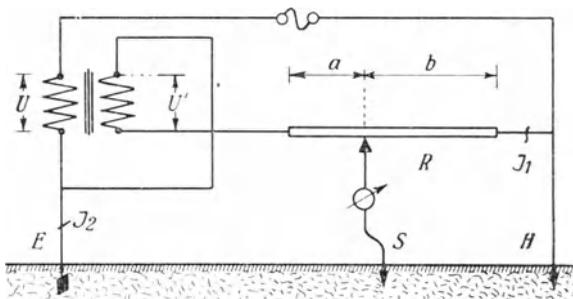


Abb. 40. Verfahren mit automatischer Abgleichung

Um nun die beiden Meßvorgänge in einen einzigen zusammenzulegen, hat Siemens eine sehr geschickte und heute allgemein verbreitete Schaltung entwickelt, die in Abb. 40 dargestellt ist. Neu ist

in dieser Schaltung der Transformator  $T_r$ . Bei gleichbleibender Frequenz der Stromquelle sei zunächst  $U = k J_2$  und  $U/U' = k'$ . Dann ist weiter

$$R_E J_2 = U' \frac{a}{a+b} = \frac{U}{k'} \cdot \frac{a}{a+b} = J_2 \cdot \frac{k}{k'} \cdot \frac{a}{a+b}.$$

Somit ist dann

$$R_E = \frac{k}{k'} \cdot \frac{a}{a+b}.$$

Dieses Instrument gestattet also die direkte Eichung in Widerstandswerten. Es genügt, den Abgriff an  $R$  solange zu verschieben,

bis der Nullindikator Stromlosigkeit anzeigt. An der Skala kann dann direkt der Widerstand abgelesen werden. Dieses Gerät werden wir

noch später besprechen. Wie schon erwähnt, konnten sich aber auch in einzelnen Fällen solche Verfahren behaupten, die erst durch Rechnung

denentsprechenden Widerstandswert ergeben. Das Grundprinzip dieser

Verfahren ist in Abb. 41 dargestellt. Wir sehen in dieser Abbildung zwei

Erder  $E_1$  und  $E_2$ . Zwischen diesen wird noch eine Hilfserde  $H$  verlegt.

Wir bestimmen nun die eingezeichneten drei Widerstände  $R' \dots R''$

und  $R'''$ . Dann erhalten wir bekanntlich:

$$R' = R_1 + R_h \dots R'' = R_2 + R_h \quad \text{und} \quad R''' = R_1 + R_2.$$

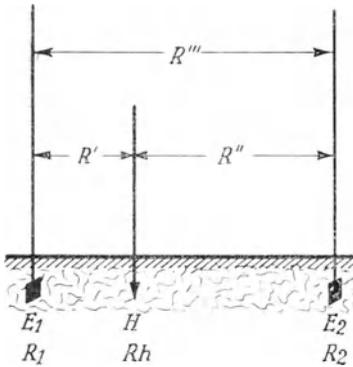


Abb. 41. Hilfselektrodenverfahren

Wir bestimmen nun die eingezeichneten drei Widerstände  $R' \dots R''$  und  $R'''$ . Dann erhalten wir bekanntlich:

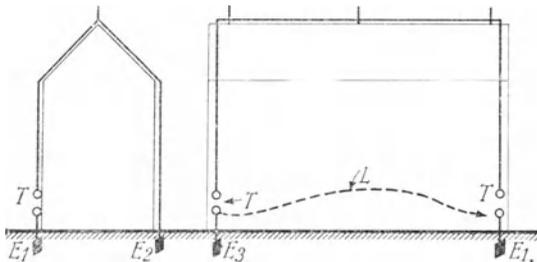


Abb. 42. Messung „über Dach“

Daraus ergeben sich dann die beiden uns interessierenden Widerstandswerte:

$$R_1 = \frac{R' - R'' + R'''}{2}$$

und

$$R_2 = \frac{R'' - R' + R'''}{2}$$

Diese Verfahren wird man besonders dann verwenden, wenn ohnehin zwei oder mehrere Erden zu bestimmen sind. Ein entsprechendes Beispiel zeigt Abb. 42. An einer Blitzableiteranlage sind drei Erdungen angeschlossen.  $T$  sind die zugehörigen Trennstellen. Es soll nun z. B. im ersten Meßgang der Widerstand der Erdungen 1 und 2 bestimmt werden. An den Trennstellen  $T$  werden dann die Leitungen in der eingezeichneten Weise unterbrochen. Die Erdung 3 wird als Hilfserde verwendet. Von ihr wird daher eine fliegende Leitung  $L$  nach 1 verlegt, wo das Meßgerät aufgestellt wird. Die Erdung 2 wird dann „über Dach“ vermessen. Wichtig ist natürlich auch bei diesen Messungen wieder die Beachtung des Spannungstrichters. Um die erforderlichen Umpolungen rasch

4\*

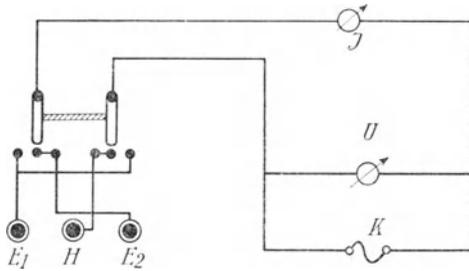


Abb. 43. Umschaltung

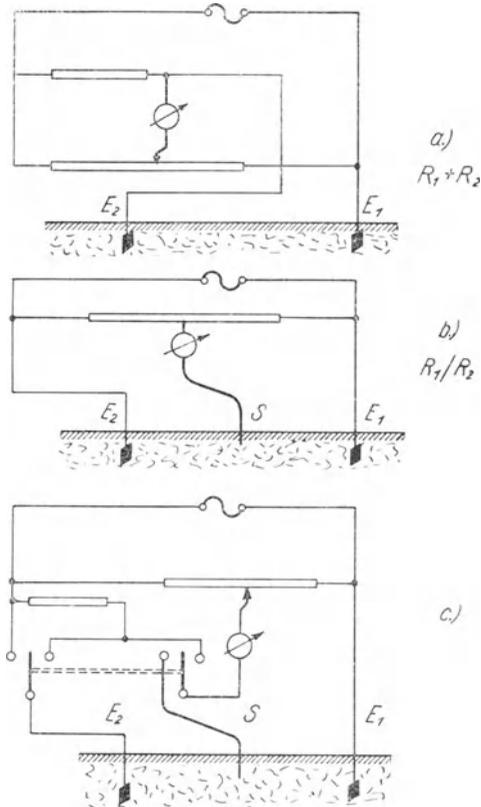


Abb. 44. Umschaltung

durchführen zu können, wird der in Abb. 43 dargestellte Umschalter verwendet. Steht der Schalter links, so wird  $R'$  bestimmt, während bei Mittel- oder Rechtsstellung  $R''$  bzw.  $R'''$  ermittelt werden. In der Abbildung sind noch ein Stromerzeuger  $K$  (etwa ein Kurbelinduktor), ein Voltmeter  $U$  und ein Amperemeter  $J$  eingezeichnet. Man kann auf der Skala des Voltmeters eine Marke anbringen und dann den Induktor gerade so rasch drehen, daß der Voltmeterzeiger über dieser Marke einspielt. Ist dann die Amperemeterskala direkt in Ohm geeicht, so kann man auf dieser den betreffenden Widerstandswert einfach ablesen. Aus einer Tabelle oder einem Schaubild können dann leicht die beiden Widerstände für die Erdungen 1 und 2 bestimmt werden.

Wenn schließlich der Widerstand der zu bestimmenden Erdung ziemlich groß, jener der Hilfserde aber sehr klein ist, so kann auch eine einzige Messung zum Ziele führen. In den für uns praktisch in Betracht kommenden Fällen wird dies indessen nur selten der Fall sein. An Stelle des in Abb. 43 eingezeichneten Schalters kann auch eine andere Schaltung verwendet werden, die Abb. 44 zeigt. Bei dieser wird im ersten Meßgange die Summe der beiden Widerstände  $R_1 + R_2$ , im zweiten dagegen das Verhältnis dieser beiden  $R_1/R_2$  ermittelt. In der Abbildung sind die entsprechenden Schalter bezeichnet. Es genügen da zwei Werte zur Widerstandsbestimmung und die entsprechenden Tafeln werden dadurch einfacher. Auch kann rascher gemessen werden.

## IV. Niederfrequente Meßverfahren

Wegen der bekannten Elektrodeneffekte ist Gleichstrom im allgemeinen zu geoelektrischen Messungen — und zu diesen gehören ja auch die Messungen an Erdern — nicht brauchbar. An seine Stelle tritt daher der Wechselstrom. In den meisten Fällen wird solcher niederer oder mittlerer Frequenz verwendet. In einigen Fällen wird allerdings Hochfrequenz erforderlich und die mit solchen Strömen betriebenen Meßgeräte werden noch besprochen werden.

Wenn wir ein Gerät für Erdmessungen entwerfen, so müssen wir uns über die Schaltung, die Art der Stromquelle, die Abgleichung und die Art und Einschaltung des Meßgerätes entscheiden. All dies wird durch den Verwendungszweck bedingt. Im allgemeinen wird ein solches Meßgerät mit eigener Stromquelle ausgerüstet, also z. B. mit Batterien oder Induktor. Neuerdings kann aber auch an deren Stelle direkter Netzanschluß vorgesehen werden, da ja fast stets die Möglichkeit besteht, das Gerät über ein nicht zu langes Kabel an irgendeine Steckdose anzuschließen. Im allgemeinen sind drei verschiedene Grund-

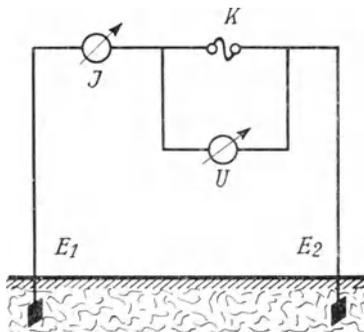


Abb. 45. Messung des Widerstandes durch Strom- und Spannungsmessung

schemen möglich, die die Abb. 45, 46 und 47 zeigen. Zu diesen treten dann die noch zu besprechenden Modifikationen. In Abb. 45 sehen wir ein einfaches auf dem Prinzip der Strommessung beruhendes Verfahren. Parallel zur Stromquelle liegt ein Voltmeter, mit dem die Spannungstufe auf einen konstanten Wert eingestellt wird. Im Kreise der beiden Erderwiderstände liegt dann das Amperemeter  $J$ . Dieses ist direkt in Ohm geeicht. Trotz der sehr einfachen Anordnung wird diese Schaltung aber kaum verwendet. Die Gründe sollen hier nicht weiter besprochen werden. Die Grundlage der meisten Meßgeräte ist auch heute noch die in Abb. 46 dargestellte Meßbrücke. In dieser Abbildung bedeutet  $K$  wieder die Stromquelle,  $M$  den Meßdraht,  $R$  den Vergleichswiderstand

und  $E_1$  und  $E_2$  die beiden Erder. Die Abgleichung erfolgt bei dieser Anordnung bekanntlich einerseits durch Verstellen des Gleitkontaktes am Meßdraht und andererseits durch entsprechende Änderung des Vergleichswiderstandes  $R$ . Es sind also praktisch Messungen innerhalb weitester Grenzen möglich. Das eingeschaltete Meßgerät ist im allgemeinen als Nullindikator geschaltet. Es hat lediglich den Zustand der Spannungslosigkeit anzugeben und wird daher ziemlich empfindlich zu wählen sein. Es kann aber außerdem innerhalb eines bestimmten Meßbereiches auch direkt in Ohm geeicht werden. Wenn das Meßdrahtverhältnis auf einen bestimmten Wert eingestellt wird und überdies auch noch der Widerstand  $R$  konstant belassen wird, so werden kleine

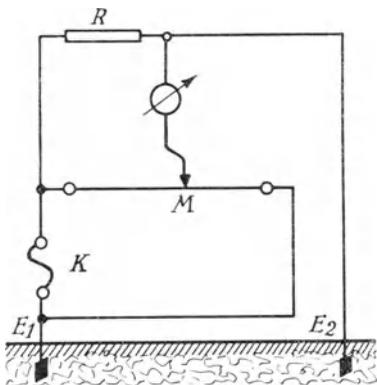


Abb. 46. Brückenschaltung

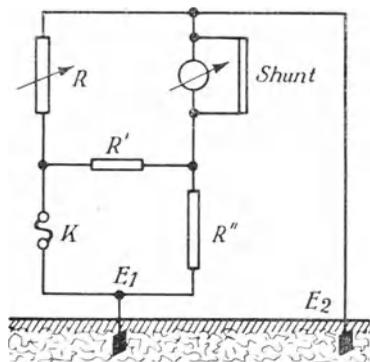


Abb. 47. Brücke mit konstanter Teilung

Änderungen des zu messenden Widerstandes an Ausschlägen des eingeschalteten Meßgerätes erkannt werden. Dieses Verfahren wird bei sehr empfindlichen Meßgeräten besonders dann am Platze sein, wenn die Änderungen eines Widerstandes zu verfolgen sind, die sich nur innerhalb einer bestimmten kleinen Grenze abspielen, also z. B. Veränderungen an einem im übrigen guten und konstanten Erder unter dem Einflusse der wechselnden Sonnenbestrahlung und ähnliches. Bei größerem Meßbereich können natürlich auch große Widerstandsschwankungen gemessen werden.

Wenn für die Messung nur ein bestimmter Meßbereich in Betracht kommt, so kann man zu der in Abb. 47 dargestellten Schaltung greifen. An Stelle des Meßdrahtes tritt hier die Reihenschaltung zweier Widerstände  $R'$  und  $R''$ , mit denen ein bestimmtes Brückenverhältnis ein-

gestellt werden kann. Der Widerstand  $R$  wird dann — entsprechend dem gewählten Teilungsverhältnis direkt in Ohm geeicht. Als Stromquellen kommen Zerhacker, Kurbelinduktoren und Tongeneratoren in Betracht. Der Hauptnachteil der Hammerunterbrecher besteht darin, daß der Meßstrom nie sinusförmig ist. Außerdem ergeben sich im Betrieb oft Schwierigkeiten. Aus diesem Grunde werden solche Tonsummer immer mehr vermieden, wenn stärkere und sinusförmige Meßströme gebraucht werden.

Weit besser ist der Kurbelinduktor, dessen Prinzip allgemein bekannt ist. In Abb. 48 ist das Bild eines solchen in der Ausführung

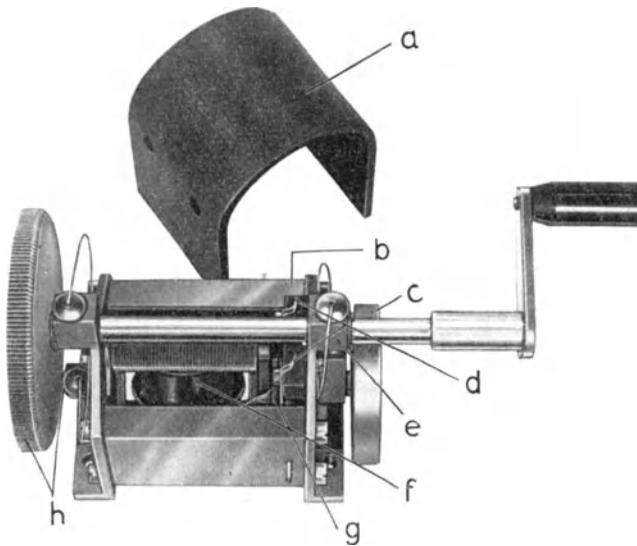


Abb. 48. Kurbelinduktor

der Firma Gossen zu sehen. Der Vorteil dieser Stromerzeuger besteht vor allem darin, daß ziemlich starke Ströme erzielt werden können und daß man von allen anderen Stromquellen, wie Batterien oder Netzanschluß unabhängig ist. Unangenehm ist es mitunter, daß während der Messung die Kurbel ständig gedreht werden muß und daß natürlich auch die Frequenz mit der Zahl der Umdrehungen schwankt.

Die günstigste Art der Stromerzeugung ist natürlich die mit dem Röhrensummer. Man erhält stets gleichbleibende, sinusförmige Meßströme und kann Frequenz, Klemmenspannung usw. beliebig ändern.

Freilich brauchen diese stets größere Batterien oder Netzanschluß, wodurch wieder gewisse Schwierigkeiten bedingt sind, die allerdings keineswegs so bedeutend sind, wie dies besonders früher angenommen wurde. In den beiden folgenden Abbildungen sind die üblichen Schalt-

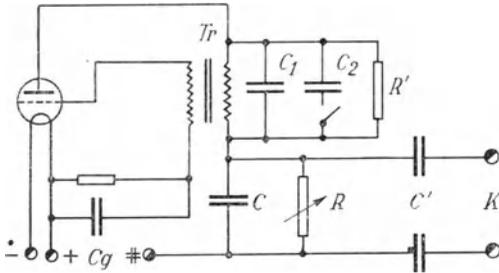


Abb. 49. Tongenerator mit induktiver Rückkoppelung

schemen dargestellt. In Abb. 49 ist ein Röhrgenerator mit induktiver Rückkoppelung zu sehen.  $T_r$  ist der Transformator, zu dessen Sekundärwicklung die Kapazitäten  $C_1$  und  $C_2$  parallel liegen. Im Anodenkreis liegt ein Widerstand  $R$ , an dessen Enden über die großen

Blocks  $C'$  die Meßspannung abgenommen werden kann. Eine weitere, auch oft verwendete Schaltung zeigt Abb. 50. Die Primärwicklung des Transformators ist unterteilt und die Anodenspannung wird im Mittelpunkt angelegt. Parallel zur Primärwicklung liegen wieder die beiden Blocks, durch die die Tonhöhe in zwei Stufen eingestellt werden kann.

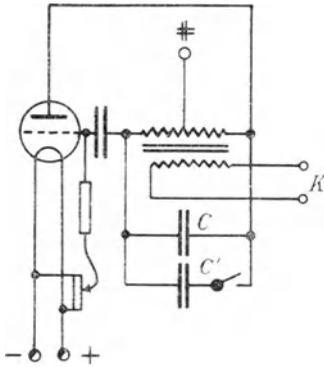


Abb. 50. Tongenerator in Dreipunktschaltung

Zum Betriebe solcher Tongeneratoren sind im allgemeinen Anodenspannungen von ungefähr 100 Volt erforderlich. Man wird also entweder eine der für Funkzwecke üblichen Anodenbatterien oder ungefähr 25 Taschenbatterien einzubauen haben. Dazu kommt dann noch die Stromquelle für die erforderliche Heizspannung, die in den meisten Fällen auch eine — allerdings größere — Trockenbatterie sein wird.

Nummehr seien eine Reihe praktisch angewandter Schaltungen besprochen. Stromgeräte, deren Skala in Ohm geeicht sind, werden ziemlich selten verwendet. Wie schon erwähnt, können sie aber bei Dauermessungen und insbesondere bei der Registrierung gute Dienste leisten. Ein Beispiel zeigt die in Abb. 51 dargestellte Schaltung.  $R_1$  und  $R_2$  sind die beiden Brückenwiderstände, die in ein bestimmtes

Verhältnis gebracht werden.  $R'$  ist der ebenfalls konstant eingestellte Vergleichswiderstand. Bei den mit  $E$  bezeichneten Klemmen werden die drei Erdungen angeschlossen. Wir sehen weiter im Schema drei Umschalter I, II und III und drei Meßgeräte  $M_1 \dots M_2$  und  $M_3$ , deren Skala direkt in Ohm geeicht wird. Je nach der Stellung der miteinander gekuppelten drei Umschalter werden eines der drei Meßgeräte und zwei der drei Erderklemmen angeschlossen. Verfolgt man die Schaltung, so erkennt man, daß das Meßgerät  $M_1$  die Widerstandssumme  $R_1 + R_2$ , das Meßgerät  $M_2$ , die Widerstandssumme  $R_1 + R_2$  und schließlich das dritte die Summe  $R_2 + R_3$  bestimmt. Nun kann man an Stelle des eingezeichneten Hebelumschalters einen rotierenden Umschalter einbauen, der durch einen kleinen Motor angetrieben wird. Bei genügend rascher Umschaltung werden dann die drei Meßgeräte konstante Ausschläge zeigen und man kann die drei Widerstandssummen direkt ablesen und auch die Skalen photographieren. Ein solches Gerät ist neuerdings am Versuchsfelde in Absroth in Gebrauch. In bestimmten Zeitabständen werden das Instrumentenbrett, eine Nummern-tafel, eine Uhr und eventuell noch ein für die betreffende

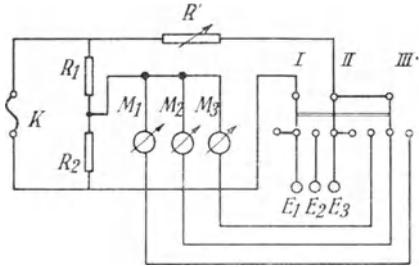


Abb. 51. Registriergerät für Erdmessungen

Messung gerade erforderliches weiteres Instrument aufgenommen. Am Film kann man dann leicht die betreffenden Ergebnisse ablesen und eintragen. An Stelle der drei Meßgeräte kann natürlich auch ein Mehrfarbenschreiber verwendet werden, der dann auf einem Papierstreifen die drei Kurven in drei Farben zeichnet. Wenn nicht die fallweise Registrierung weiterer Geräte notwendig erscheint, so ist diesem Registrierverfahren der Vorzug zu geben. Ein Vorteil dieser Schaltung besteht darin, daß jeweils nur zwei Elektroden angeschlossen werden und daß daher gegenseitige Störungen, wie sie beim Daueranschluß aller drei Elektroden zu erwarten sind, vermieden werden.

Eine weitere selbsttätige Meßeinrichtung, bei der wieder das Anzeigementrument gleichzeitig die Indikation des Widerstandswertes übernimmt, zeigt die Abb. 52. Wir sehen hier die noch zu besprechende Siemensbrücke mit dem für diese Schaltung charakteristischen Transformator  $Tr$ . Zwischen Sonde und Widerstand  $R$  ist ein Meßgerät

eingeschaltet. Der Zeiger dieses Meßgerätes schleift direkt auf dem Widerstandsdrahte  $R$ . Wenn der durch das Instrument fließende Strom nicht Null ist, so wird sich der Zeiger in der einen oder anderen Richtung bewegen und dadurch den Abgriff am Widerstande verändern. Schließlich wird er einen Punkt erreichen, an dem zwischen Widerstands-

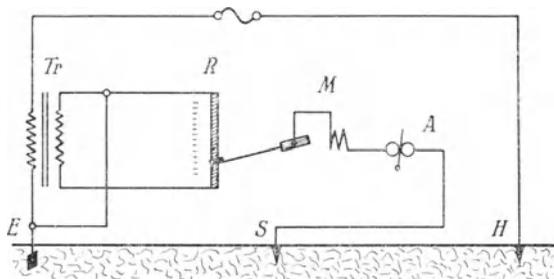


Abb. 52. Automatische Einstellung

abgriff und Sonde  $S$  keine Spannungsdifferenz mehr besteht. An dieser Stelle wird er dann stehenbleiben. Über dem Zeiger kann direkt eine Skala angeordnet werden, die in Ohm geeicht wird. Will man mit

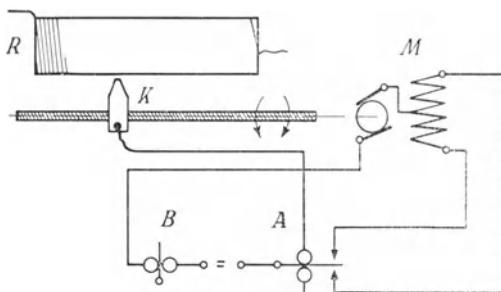


Abb. 53. Automatische Einstellung

Registrierung arbeiten, so kann man noch ein Relais  $A$  einbauen, das im Augenblick der Stromlosigkeit, z. B. den Zeiger an einen Papierstreifen andrückt und dadurch die Lage markiert.

Ein ganz ähnlich funktionierendes Gerät zeigt Abb. 53. An die Stelle des Zeigerabgriffs tritt ein Kontakt  $K$ , der auf einer Spindel durch den Motor  $M$  verstellt werden kann. In den Sondenabgriff wird ein Relais  $A$  eingeschaltet, das je nach der Stromrichtung den Motor  $M$  in der einen oder anderen Richtung laufen läßt. Dadurch wird dann der Abnahmekontakt  $K$  am Widerstande  $R$  nach links oder rechts ver-

schoben. Wird der Sondenstromkreis stromlos, so wird der Motor abgeschaltet und der Kontakt bleibt solange stehen, bis irgendeine Widerstandsänderung erfolgt. Das eingeschaltete Relais *B* kann dann wieder die Registriervorrichtung betätigen. Die Skala wird hier wieder direkt in Ohm unterteilt und oberhalb des Schleifkontaktes *K* angebracht.

Die Meßbrücken waren früher allgemein verbreitet. In letzter Zeit wurden sie oft durch andere Anordnungen, wie z. B. die erwähnte Siemensschaltung verdrängt. Sie sind aber noch immer dort gut zu verwenden, wo mindestens zwei Erdungen zu bestimmen sind. Infolge des einfachen Aufbaues sind sie billiger als andere Geräte und werden daher besonders von solchen Personen und Unternehmen benutzt, die die notwendigen Berechnungen gegenüber dem billigeren Preise in Kauf nehmen wollen.

Ein Beispiel einer praktischen Ausführung, wie sie auch heute noch viel benutzt wird, zeigt die Abb. 54 im Schema. Es handelt sich um die Pontavibrücke von Hartmann und Braun. Als Stromquelle dient eine im Kasten eingebaute Trockenbatterie von 4,5 Volt Spannung. Durch den eingezeichneten Taster wird einerseits der Strom, andererseits das Meßgerät angeschaltet. Will man nicht mit Gleichstrom, sondern mit Wechselstrom arbeiten, wie es bei unseren Messungen allgemein der Fall ist, so wird die Batterie durch einen eigenen Meßsummer ersetzt und an Stelle des Meßgerätes tritt ein Telephon. Dieses wird an die Klemmen *T . . . T* angeschlossen. Der Meßdraht ist beiderseits über kleine Widerstände angeschlossen. Rechts sind die Vergleichswiderstände und links die Klemmen für den Anschluß des zu bestimmenden Widerstandes eingezeichnet. Bei unseren Messungen sind also zwischen die Klemmen *X* jeweils zwei der zu bestimmenden Erder einzuschalten. Bei diesem Gerät ist die Skalenanordnung besonders übersichtlich. Der gesuchte Widerstandswert ergibt sich einfach durch Multiplikation der an den Skalen des Meßdrahtes und des Vergleichswiderstandes abgelesenen Werte. In Abb. 55 sehen wir das Gerät. Neben dem Meßgerät ist der Summer deutlich zu erkennen.

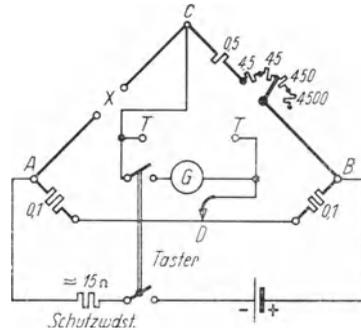


Abb. 54. Meßbrücke

Neuerdings verwendet man auch an Stelle des Zeigerinstrumentes das magische Auge, das schon lange im Empfängerbau große Verbreitung gewonnen hat. Das „magische Auge“ ist eine Entladungsröhre, in der eine kreuzförmige Elektrode angebracht ist. Die Ränder dieser Elektrode überziehen sich mit einem grünlichen Glimmlichte. Der Zustand der Spannungslosigkeit wird dadurch angezeigt, daß dieses Glimmlicht zwischen den Kreuzbalken verschwindet und das Kreuz selbst scharf hervortritt. Es wird mit dieser Vorrichtung eine sehr scharfe Abstimmung möglich sein. In der Abb. 56 ist ein komplettes Schaltschema eines Gerätes mit magischem Auge zu sehen. Links sehen wir wieder den schon besprochenen Tongenerator. Durch Zuschalten der

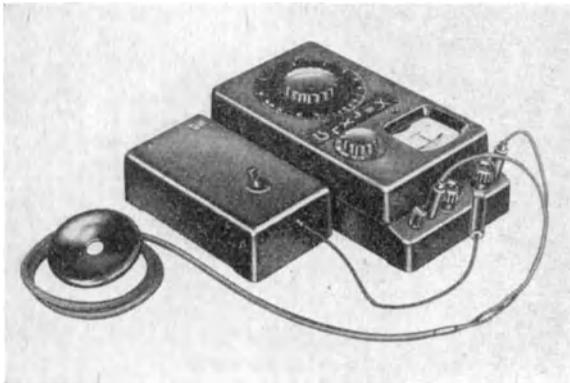


Abb. 55. Meßbrücke (nach Hartmann und Braun)

Kapazität  $C'$  kann die Frequenz erhöht werden. Daran schließt die schon früher besprochene Meßanordnung (siehe Abb. 39!). Anstatt des früher verwendeten Meßgerätes wird aber jetzt das magische Auge eingebaut.  $R_1$  und  $R_2$  sind Widerstände von gleicher Größe, oder aber sie stehen zueinander in einem bestimmten einfachen Verhältnisse.  $R'$  ist der Abgleichwiderstand und  $R + R''$  sind die eigentlichen Meßwiderstände. Durch den Umschalter kann das magische Auge an die Enden der Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  gelegt werden und dann durch Verstellen des Widerstandes  $R'$  die Anordnung entsprechend abgeglichen werden. Wird dann der eingezeichnete Umschalter nach rechts verschoben, so ist die Apparatur zur Messung des Erderwiderstandes bereit. An die Klemmen  $E \dots S \dots H$  werden Erder, Sonde und Hilferder angeschlossen. Das magische Auge ist mit  $MA$  bezeichnet. Ihm ist noch

eine Verstärkerröhre vorgeschaltet. Zu beachten ist, daß zum Betrieb des magischen Auges recht hohe Anodenspannungen nötig sind. Im allgemeinen wird man unter 200 Volt kaum auskommen, so daß diese Geräte vor allem für Netzanschluß in Betracht kommen. Der Vorteil des magischen Auges besteht darin, daß es praktisch nicht überlastet werden kann, daß es weiter leicht abzulesen ist und besonders gute Nullpunkteinstellung gestattet.

In Abb. 57 sehen wir ein Meßgerät, das neben der Bestimmung von Erder- auch andere Widerstandsmessungen gestattet. So können

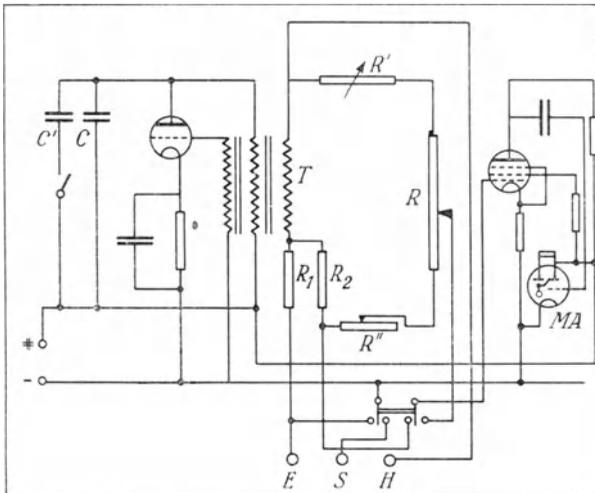


Abb. 56. Meßgerät mit magischem Auge

z. B. wässrige Lösungen vermessen werden, die in der Umgebung des Erders vorhanden sind und dessen Widerstand bestimmen. Bei a) sehen wir wieder das Schaltschema.  $L_1 \dots L_2 \dots L_3$  sind die Wicklungen des Transformators des Tongenerators. Daran schließt dann der Meßkreis. Durch den Schalter  $S_1$  kann der Widerstand  $R_1$  teilweise abgeschaltet werden. Dadurch wird dann das Verhältnis der Stromstärken im Meßkreis und Vergleichskreis entsprechend geändert und damit auch der Meßbereich.  $R'$  ist wieder der Abgleichwiderstand und  $R$  der Meßwiderstand. Durch den Schalter  $S_2$  kann dann das magische Auge  $AM 1$  entweder an den Widerstand  $R_1$  oder den Widerstand  $R$  angelegt werden. Dem magischen Auge ist die Verstärkerröhre  $AF 7$  vorgeschaltet. Außerdem ist noch ein zweiter Schalter

vorhanden, der die eingezeichneten Kontakte 2, 3, 4 und 5 löst und an Stelle der dadurch abgeschalteten Meßeinrichtung die bei c) dargestellte einschaltet. Diese entspricht einer Meßbrücke, nur ist an Stelle des

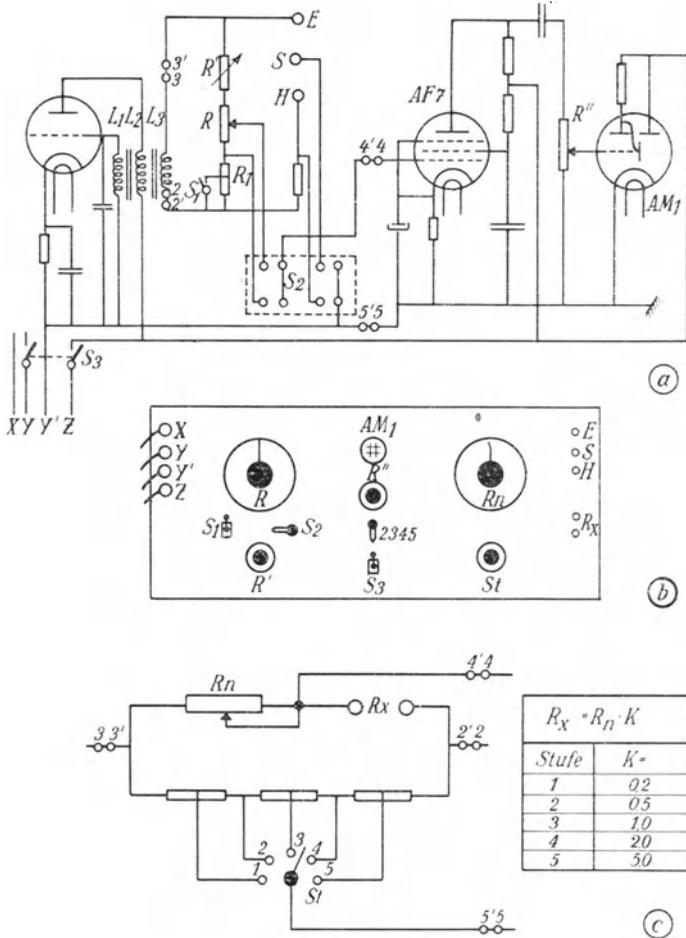


Abb. 57. Meßgerät mit magischem Auge

Meßdrahtes der Stufenschalter  $St$  vorhanden, durch den das Brückenverhältnis stufenweise geändert werden kann. Der Widerstand  $R_n$  ist veränderlich. Bei  $R_x$  wird dann das Meßgefäß angeklemt, in das die zu bestimmende Flüssigkeit eingeschüttet wird. Bei b) ist die Front-

platte dieses Gerätes schematisch gezeigt. Die Bezeichnungen stimmen mit denen des Schaltschemas überein. An die Klemmen  $X \dots Y \dots Y' \dots Z$  werden die Batterieanschlüsse, an die Klemmen  $E \dots S \dots H$  werden die Leitungen zum Erder, zur Sonde und zur Hilfserde angeschlossen. Über dem Schalter  $S_3$  ist der Umschalter vorgesehen, der die Kontakte 2, 3, 4 und 5 umschaltet. Praktische Meßgeräte dieser Art werden stets in Kofferform ausgeführt. Die Knöpfe werden dann auf der Frontplatte so angeordnet, daß sie bequem bedient werden können; die zur Messung nötigen Scheiben sollen daher stets auf der rechten Seite angeordnet werden.

Das Gerät besitzt einen eingebauten Tongenerator für eine oder besser zwei verschiedene Frequenzen. Meist verwendet man 1000 und 5000 Hertz. Bei Netzanschluß kommt dann noch als dritte die Netzfrequenz von 50 Hertz dazu. Um auch die kapazitive Komponente des Erderwiderstandes abgleichen zu können, sind veränderliche Kapazitäten vorgesehen, die zu den Erderwiderständen in Reihe oder parallel zu diesen geschaltet werden können.

In diese Gruppe von Widerstandsmeßgeräten gehört auch das von Philips erzeugte „Philoskop“. Es gestattet die rasche Ermittlung von Kapazitäten und Widerständen und verwendet als Indikator wieder das magische Auge. Es setzt allerdings die Möglichkeit des Netzanschlusses voraus. Besonders wird es zur Vermessung von Erd- und Wasserproben in schwierigem Gelände verwendet. Außer einem Knopf zur Bedienung des magischen Auges weist das Instrument nur zwei Skalen auf: die Meßskala und eine zweite, auf der der Meßbereich eingestellt wird. Eine einfache Multiplikation der beiden eingestellten Skalenwerte ergibt dann in einfacher Weise das Meßergebnis. Zu diesem Meßgerät wird ein Mittelfrequenzgenerator geliefert, der eine Meßfrequenz von 5000 Hertz liefert. In Abb. 58 ist ein kleiner, ähnlich geschalteter Meßkoffer zu sehen, der für Batterieanschluß geeignet ist. Als Indikator ist wieder das magische Auge verwendet. Mit diesen Geräten können auch Wasserproben vermessen werden. Solche Proben sollten in der Praxis mehr bestimmt werden als dies heute der Fall ist. Insbesondere wäre es nötig, den Widerstand von Brunnenwasser zu ermitteln, in dem Erder verlegt werden sollen. Sehr oft wird eine Erdung in einen Brunnen eingesenkt, der zu bestimmten Jahreszeiten mit schlechtleitendem Oberflächenwasser erfüllt ist und daher keine gute Ableitung bieten kann. Die Messung selbst ist sehr einfach. Es genügt, die Meßelektrode in das Wasser einzusenken.

Von den bisher besprochenen Anordnungen unterscheiden sich wesentlich die nunmehr zu besprechenden Erdungsmesser, die in einem einzigen Meßgang die Bestimmung des Widerstandes gestatten.

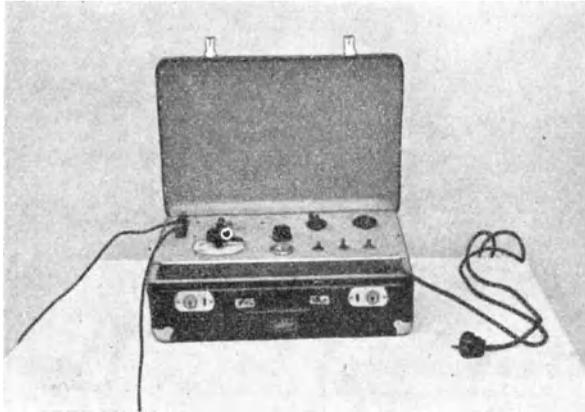


Abb. 58. Kleiner Meßkoffer

Sie arbeiten nach dem von Siemens angegebenen Prinzip. In Abb. 59 sehen wir die Grundschialtung eines Gerätes, das zur Bestimmung des Erdungswiderstandes in Schwachstromanlagen dient. Das Prinzip-

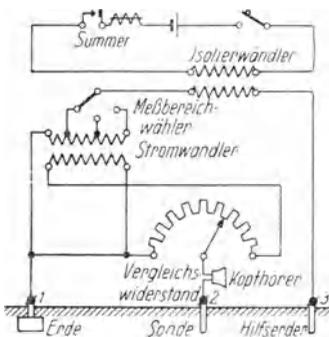


Abb. 59. Schaltung des Erdungsmessers für Schwachstromanlagen nach Siemens

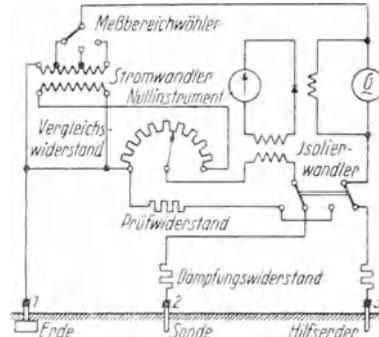


Abb. 60. Schaltung des Erdungsmessers für Starkstrom nach Siemens

schema dieser und der folgenden Anordnung wurde bereits in Abb. 40 dargestellt und auch dort besprochen. Die Tonfrequenz wird durch einen kleinen Summer erzeugt, der in der Abbildung oben eingezeichnet ist. Der bereits in Abb. 40 besprochene für diese Schaltung charak-

teristische Transformator ist stufenweise anschaltbar, wodurch der Meßbereich entsprechend verändert wird. Als Indikator besitzt dieses Gerät einen einfachen Kopfhörer. Bei diesem Gerät wird lediglich der Abgriff am Vergleichswiderstand solange geändert, bis der Ton im Kopfhörer verschwindet. Der am Vergleichswiderstand abgelesene Wert mit der dem Meßbereich zugeteilten Konstanten multipliziert, ergibt dann gleich den gesuchten Widerstand des an die Klemme 1 angeschlossenen Erders. In diesem Gerät kann in einfacher Weise auch der Widerstand einzelner Erder rasch ermittelt werden. In Abb. 60 sehen wir ein nach dem gleichen Prinzip arbeitendes Gerät, das für Erdungsmessungen in Starkstromanlagen konstruiert ist. Die Anordnung ist wieder die gleiche wie jene in Abb. 59. Anstatt des Kopfhörers ist ein Galvanometer eingebaut, das über einen Transformator eingeschaltet wird und mit einem kleinen Gleichrichter in Serie liegt. Als Stromerzeuger wird ein Kurbelinduktor  $G$  verwendet. Dieses Gerät enthält auch einen eigenen Prüf Widerstand. Durch den rechts eingezeichneten Umschalter kann an Stelle des Erders der Prüf Widerstand eingeschaltet werden. Führt man dann

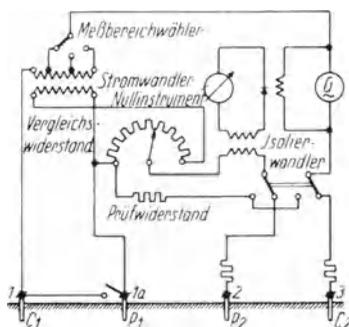


Abb. 61. Schaltung des Erdungsmessers für Baugrunduntersuchungen

die Messung durch, so hat man die Möglichkeit, das Instrument jederzeit nachzueichen. Eine noch etwas modifiziertere Anordnung zeigt die Abb. 61. Mit dieser Anordnung kann man nicht nur den Widerstand des Erders überprüfen, sondern man ist auch imstande, die Leitfähigkeit des Untergrundes selbst zu ermitteln. Dies ist deshalb wertvoll, weil man z. B. dadurch die Möglichkeit hat, für den Erder eine günstige Stelle auszusuchen, oder aber, wenn die Oberfläche schlecht leitet, zu untersuchen, ob in einer bestimmten Tiefe bessere Leiter vorhanden sind. Es kann an dieser Stelle natürlich nicht auseinandergesetzt werden, nach welchen Gesichtspunkten das Aufsuchen solcher Schichten erfolgt, da diese oft nicht unkomplizierte Aufgabe gewisse geoelektrische Kenntnisse voraussetzt. Die Bestimmung des Bodenwiderstandes geschieht in folgender Weise: An die Klemmen 1 und 3 werden die Erdelektroden  $C_1$  und  $C_2$ , also etwa Rohrerder, angeschlossen. An die Klemmen 1a und 2 werden längere Erdspieße  $P_1$

und  $P_2$  gelegt. Der Abstand  $C_1 P_1 = P_1 P_2 = P_2 C_2 = s$ , d. h. die Elektroden werden also im gleichen gegenseitigen Abstände auf einer Geraden angeordnet. Man bestimmt dann den Widerstand wie am Starkstromerdungsgerät. Wenn dieser  $R'$  beträgt, so erhält man den spezifischen Widerstand des Bodens  $\rho$

$$\rho = 2 \pi R' s$$

( $R'$  in Ohm und  $s$  in cm). Dieser Widerstand bezieht sich auf den „Aufschlußraum“, das ist der Raum unter dem Meßort bis zu einer Tiefe, die dem Elektrodenabstand  $s$  entspricht. Wenn bei Vergrößerung des Elektrodenabstandes der Widerstand  $\rho$  konstant bleibt, so bedeutet dies, daß der Untergrund homogen ist. Wenn bei einem bestimmten Abstände  $s'$  der Wert von  $\rho$  größer oder kleiner wird, so zeigt dies die Existenz einer besser- oder schlechterleitenden Schicht in einer Tiefe an, die dem Abstände  $s'$  gleich ist. Auf diese Weise kann z. B. Grundwasser nachgewiesen werden.

Den inneren Aufbau dieses Meßgerätes zeigt die Abb. 62 in mehreren Ansichten. In den Teilbildern *a* und *c* sehen wir den ganzen Aufbau, und zwar liegt der Apparat auf der Frontplatte. Im Teilbilde *b* sehen wir die Apparatur zerlegt. Die gesamte Verdrahtung ist nämlich so durchgeführt, daß man den oberen Teil, der den Induktor enthält, nach Lösung einiger Schrauben vom unteren abheben kann. Auf diese Weise wurde es möglich, die Anordnung sehr gedrängt aufzubauen und gleichzeitig doch bei Reparaturen usw. die Bestandteile leicht zugänglich zu halten. Die Laschen, die die beiden Teile miteinander verbinden, sind besonders bei *c* gut zu sehen. An den Induktor ist ein Schwinggleichrichter angebaut. Deutlich sind auch die Transformatoren für den Meßkreis und das Instrument zu erkennen. Trotz eines recht robusten Aufbaues, der wegen des Geländebetriebs nötig ist, beträgt das Gewicht nur 6 kg. Die äußere Ausführung der drei Meßgeräte zeigen Abb. 63, 64 und 65. In Abb. 63 sehen wir den Meßkoffer für Erdungsmessungen für Schwachstromanlagen. Links sind die drei Anschlußklemmen, rechts die Batteriekassette und darunter der Abstimmknopf. Neben diesem befindet sich ein zweiter Knopf zur Einstellung des Meßbereiches. Links ist ein Raum ausgespart, in dem der Kopfhörer untergebracht wird. In Abb. 64 ist die große Ausführung zu sehen. Die Anordnung auf der Frontplatte ist so gewählt, daß die einzelnen Schalter leicht bedient werden können. Rechts sehen wir die Induktorkurbel. Auf der Front-

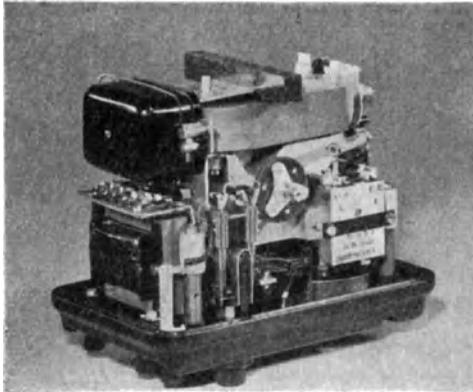


Abb. 62a.

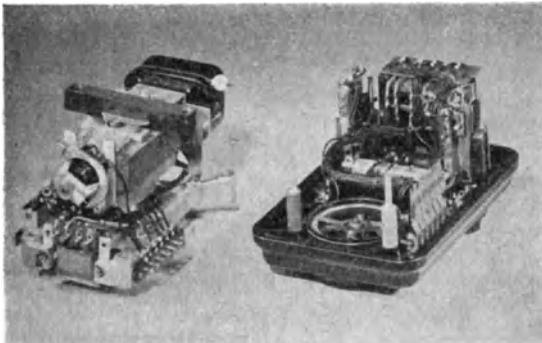


Abb. 62b.

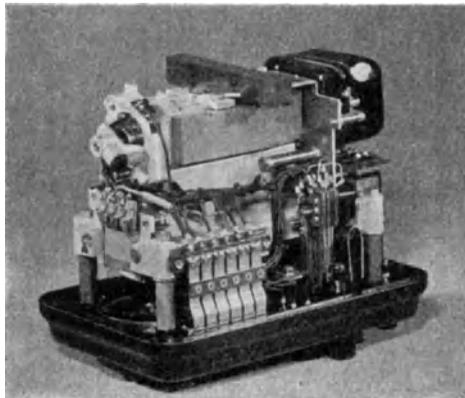


Abb. 62c. Aufbau des Erdungsmessers

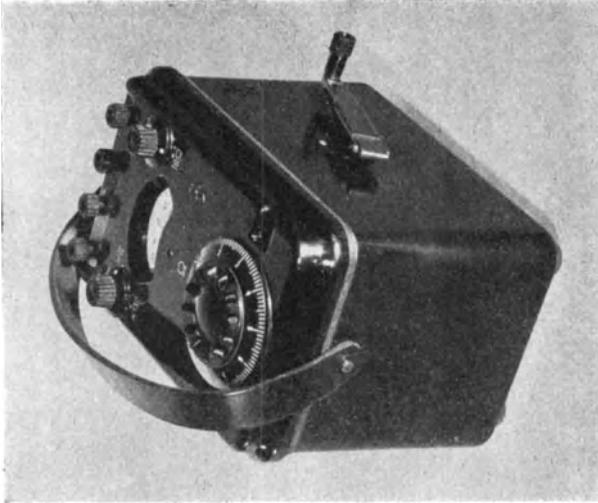


Abb. 64. Erdungsmesser für Starkstromanlagen



Abb. 63. Erdungsmesser für Schwachstromanlagen

platte selbst zunächst die große Anzeigescheibe für den Meßwiderstand, über dieser die Skala des Nullinstruments. Rechts von diesem ist der Schalter für den Kontrollwiderstand und links der Meßbereichwähler zu sehen. Hinter diesem liegen dann die drei Klemmen zum Anschluß der Sonde, des Erders und des Hilfserders. In Abb. 65 schließlich sehen wir noch die Frontplatte des Gerätes, dessen Schaltung in Abb. 61

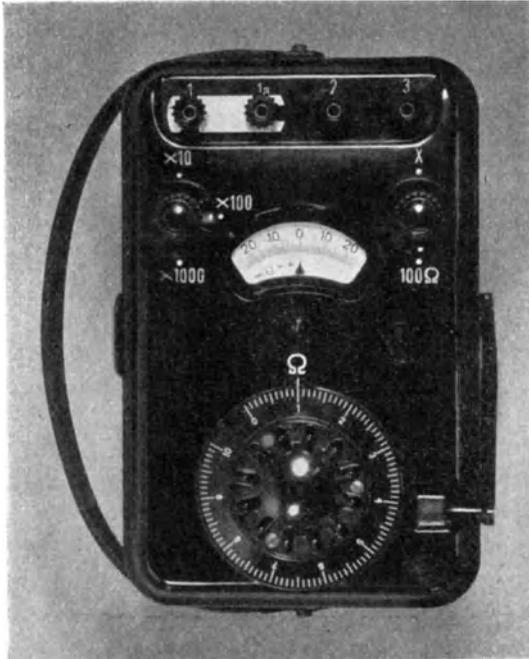


Abb. 65. Frontplatte des Erdungsmessers für Baugrunduntersuchungen

gezeigt wurde. Es ist wieder rechts die noch eingelegte Induktorkurbel zu sehen. Unten befindet sich die Abstimmzscheibe, über dieser das Nullinstrument, links von dieser der Meßbereichwähler, rechts der Kontrollschalter und darüber die Klemmleiste, an der diesmal vier Klemmen vorgesehen sind. Ein Vorteil dieser Anordnung ist vor allem darin zu erblicken, daß der Widerstand der Hilfserde und der Sonde das Ergebnis gut beeinflusst. Der Sondenwiderstand spielt überhaupt keine Rolle, weil bei vollständiger Abgleichung durch den Sondenweig kein Strom hindurchfließt. Durch den Hilfserderwiderstand wird

dagegen die Abstimmgenauigkeit geändert. Wie die folgenden Tafeln V und VI zeigen, sind erst bei größeren Widerständen Fehler möglich, die sich noch immer innerhalb sehr geringer Grenzen halten.

Tafel V

$R_E$ v	Widerstand des Hilfserders und der Sonde in $\Omega$				
	500	1000	2000	3000	3500
5	5,25	5,25	5,5	~ 5,5	~
10	10,5	10,5	10,75	~ 11	~
15	15,75	15,75	16	~ 16	~
20	20,5	20,5	20,5	~	~

Tafel VI

Widerstand der Sonde v	Widerstand des Hilfserders							
	500	1000	2000	3000	4000	5000	10000	20000
500	10,5	10,5	10,75	10,75	10,75	10,75	10,75	~ 11
1000	10,5	10,5	10,75	10,75	10,75	10,75	~ 11	
2000	10,5	10,75	10,75	11	~ 11	~ 11		
3000	10,75	11	11	~ 11				
4000	11	11	ungenau					
5000	11	11,25	"					
10000	11,25	11,25	"					
15000	11,75	11,5	"					
20000	11,75	11,5	"					
40000	~ 13	~ 12	"					
60000	~ 15		"					

Der Widerstand  $R_F$  beträgt 10 Ohm.

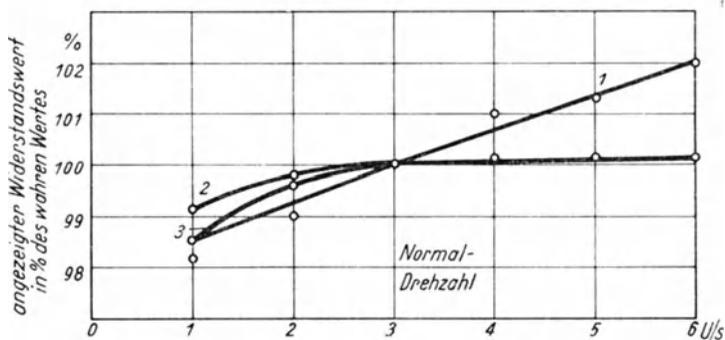


Abb. 66. Abhängigkeit des Meßergebnisses von der Frequenz

Natürlich besteht auch eine gewisse Abhängigkeit zwischen der Frequenz des Meßstromes und dem gemessenen Widerstand. Die Frequenzschwankungen treten beim Kurbelinduktor dadurch auf, daß die Zahl der Umdrehungen pro Sekunde nicht gleichmäßig ist. Wie die Abb. 66 aber zeigt, sind auch diese Schwankungen nur gering.

## V. Hochfrequente Meßverfahren

Es wurde schon früher darauf hingewiesen, daß bei bestimmten Messungen an Stelle der sonst verwendeten niederfrequenten Ströme Hochfrequenz in Frage kommt. In erster Linie werden solche Verfahren notwendig, wenn Blitzzerder zu überprüfen sind. Es ist ein Prinzip jeder Prüftechnik, daß die Überprüfung unter jenen Voraussetzungen vorgenommen werden soll, die im Augenblick des Betriebes maßgebend sind. Man wird daher billigerweise verlangen, daß auch eine Blitzzerdung mit einem Strom überprüft wird, der diese ganz ähnlich beansprucht wie die Blitzentladung selbst. Diese ist ein Gleichstromstoß mit ungemein steiler Stirne.

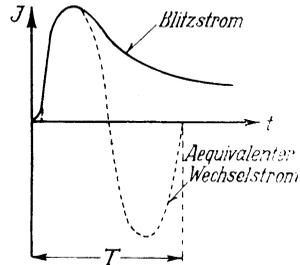


Abb. 67. Äquivalente Frequenz

Aus diesem Grunde wird sie irgendeinen Leiter ähnlich beanspruchen wie ein hochfrequenter Wechselstrom, dessen Wellenlänge ungefähr im Tausendmeterbande liegt. Man kann, wie dies in Abb. 67 gezeigt wird, der Blitzstromkurve eine Sinuskurve einschreiben, die dann den Verlauf des äquivalenten Wechselstromes darstellt. Natürlich handelt es sich hier um eine Substitution. Aus Gründen, die hier nicht näher angeführt werden können, und die an anderer Stelle schon näher besprochen wurden, erscheint diese Substitution zulässig. Wenn nun irgendein Erder bei hoch- oder niederfrequenter Durchströmung die gleichen Eigenschaften aufweist, so kann naturgemäß seine Überprüfung ohne weiteres mit niederfrequentem Wechselstrom erfolgen. Das Ergebnis wird dann die Beurteilung der Verwendbarkeit eines solchen Erders gestatten. Wenn jedoch bei hoch- oder niederfrequenter Durchströmung Unterschiede auftreten, so muß die hochfrequente Überprüfung verlangt werden. Im allgemeinen wird es daher nötig sein, bei jedem solchen Erder zunächst einmal durch eine

Parallelmessung festzustellen, ob eine Frequenzabhängigkeit in einem praktisch bedeutsamen Ausmaße besteht. Gelangt man dann zur Überzeugung, daß dies nicht der Fall ist, so kann man die weiteren Überprüfungen ruhig mit niederfrequenten Geräten durchführen. Besteht aber eine Frequenzabhängigkeit, so muß auch für die weiteren Untersuchungen stets Hochfrequenz verwendet werden. Bisher wurden hochfrequente Messungen deshalb vermieden, weil die erforderlichen Apparate ziemlich kompliziert und schwer zu bedienen waren. Besonders bei der Überprüfung von Blitzerdern ist es nötig, Meßgeräte zu verwenden, die auch von solchen Personen bedient werden können,

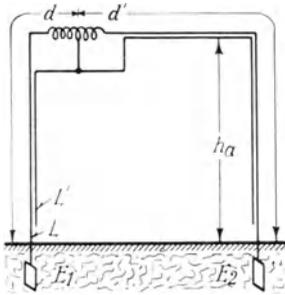


Abb. 68. Parallelleitung

die nur sehr wenig Fachkenntnisse besitzen. Aus diesem Grunde schieden seit jeher komplizierte Anordnungen aus. In der letzten Zeit wurden aber zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, um Gesichtspunkte für die Entwicklung hochfrequenter Meßmethoden zu gewinnen. Auch in rein apparatetechnischer Hinsicht wurden weitgehende Vereinfachungen möglich, so daß heute schon Meßeinrichtungen gebaut werden können, die auch dem Laien in die Hand gegeben werden können. Es besteht daher kein Grund, die Überprüfung mit Hochfrequenz weiterhin zu unterlassen, wo sie notwendig ist.

Durch die hochfrequente Messung wird zunächst einmal im allgemeinen ein höherer Ohmscher Widerstand ermittelt als bei Gleichstrom, weil der sogenannte Skineneffekt auftritt. Geschichtete Leiter werden z. B. eine andere Frequenzabhängigkeit zeigen als homogene. Weiter werden die kapazitive und induktive Komponente erfaßt. Dies ist besonders dann wichtig, wenn die in Betracht kommenden Leitungen lang sind und daher eine hohe Impedanz aufweisen. Störungen können durch jene Ströme bedingt werden, die in benachbarten Leitern induziert werden. Arbeitet man mit längeren Leitungen, so muß man daher unbedingt darauf achten, daß durch diese das Meßergebnis nicht verfälscht wird. Es ist insbesondere wichtig, daß die Kapazität solcher Leitungen gegen Erde einen konstanten Wert beibehält. Am einfachsten geschieht dies durch die Anwendung der Parallelleitung. Ein Beispiel zeigt Abb. 78. Die Leitungen nach den beiden Erdern  $E$  sind mit  $L$  bezeichnet. Sie haben die Länge  $d$  und  $d'$ . Um die Kapazität gegen

Erde möglichst klein zu halten, sind sie in entsprechender Höhe verspannt. Parallel zu jeder Leitung ist dann eine weitere Leitung  $L'$  verspannt, die mit dem neutralen Punkt des Meßgerätes verbunden ist. Wenn man dafür sorgt, daß die Leitungen  $L$  und  $L'$  einen konstanten Abstand haben, so bleibt die Leitungskapazität ständig gleich. Mit Vorteil kann man zu diesem Zwecke bestimmte abgeschirmte Kabel verwenden, die heute in sehr kapazitätsarmer Ausführung allgemein erzeugt werden. Für die Sonde kann man im allgemeinen einen sehr dünnen Draht verwenden, der nur eine geringe eigene Kapazität aufweist.

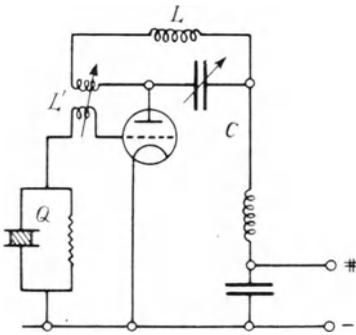


Abb. 69. Quarzgenerator

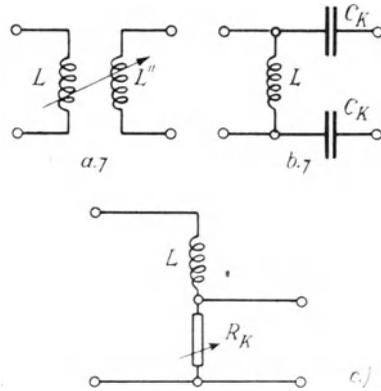


Abb. 70. Kopplung

Die HF-Generatoren werden in der auch sonst in der Funktechnik üblichen Schaltung ausgeführt. Durch die in Abb. 69 gezeigte Verwendung des Steuerquarzes erreicht man eine sehr hohe Konstanz der erzeugten Frequenz. Parallel zum Quarz  $Q$  liegt ein Widerstand, dessen Dimensionen dem Quarz anzupassen sind. Um den erzeugten Hochfrequenzstrom zum Meßkreis zu leiten, müssen diese beiden miteinander gekoppelt werden. Drei mögliche Kopplungsarten zeigt die Abb. 70. Bei a) sehen wir die induktive Kopplung. Mit dem Meßkreis wird die Spule  $L'$  verbunden, die dann neben der Spule  $L$  angeordnet wird. Skizze b) zeigt die kapazitive Kopplung. Sie wird durch die Kapazitäten  $C_K$  hergestellt. Bei c) erkennen wir schließlich noch eine galvanische Kopplung durch den Widerstand  $R'$ . Durch Veränderung dieses Widerstandes kann man die abgenommene Spannung variieren. Oft ergibt sich die Notwendigkeit, die erzeugte Hochfrequenz zu modulieren. Dies geschieht so,

daß ihr eine Niederfrequenz aufgeprägt wird. Im allgemeinen wird gerade für unsere Zwecke die Anodenstrommodulation am geeignetsten sein. Es können die heute schon bekannten Verfahren verwendet werden. Sie sind im allgemeinen dem besonderen Verwendungszweck etwas anzupassen. Praktisch ergaben sich gewisse Schwierigkeiten, die aber heute schon überwunden sind. Es handelte sich vor allem darum, die Ausführung des Gerätes so zu wählen, daß ohne Nachstellung die gewünschte modulierte oder nichtmodulierte Hochfrequenz abgenommen werden kann. Dies ist bereits ohne weiteres möglich. Ein für solche Zwecke ausgefertigtes Gerät zeigt schematisch die Abb. 71. Es wird wieder jene Schaltung verwendet, die wir schon bei den nieder-

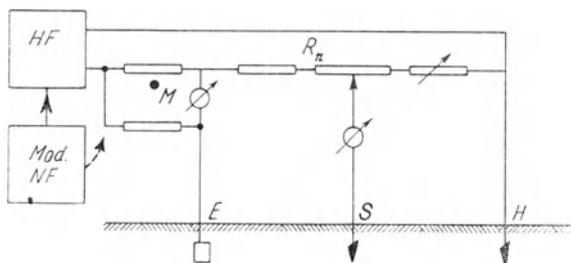


Abb. 71. HF-Erdungsmesser

requenten Verfahren besprochen haben. Links ist der Hochfrequenz-generator  $HF$  eingezeichnet, der mit dem Modulator  $MO$  verbunden wird. Mit dem Meßinstrument  $M$  wird zunächst die Abgleichung der beiden Stromkreise kontrolliert. Dann wird die Messung durchgeführt, bis am Gerät  $M'$  Spannungslosigkeit beobachtet wird. Um den Meßbereich zu erweitern, ist noch ein Widerstand  $R_n$  vorgesehen. Zwischen Erder  $E$ , Sonde  $S$  und Hilfserder  $H$  sind zwei Widerstände  $R'$  vorgesehen, die durch entsprechende Schalter eingeschaltet werden können. Sie dienen der Kontrolle und Nacheichung. Bei der praktischen Durchführung werden natürlich die beiden Meßgeräte  $M$  und  $M'$  wieder zusammengelegt. Weitere Umschaltungen gestatten dann an Stelle des Hochfrequenzgenerators direkt den Modulator anzuschalten und dadurch mit Mittelfrequenz zu arbeiten. Insgesamt werden also vier Meßgänge möglich sein. 1. Abgleichen mit Mittelfrequenz. 2. Messen mit Mittelfrequenz. 3. Abgleichen mit Hochfrequenz. 4. Messen mit Hochfrequenz. An den Umschalter, der die hierfür nötigen Umschaltungen durchführt, ist dann noch eine fünfte Stufe vorgesehen, die es gestattet,

das Meßgerät selbst bzw. das an dessen Stelle verwendete magische Auge selbständig zu verwenden. Die komplette Schaltung sehen wir in den folgenden Abbildungen. In Abb. 72 sehen wir links den Hochfrequenz- und rechts den Mittelfrequenzgenerator. Die beiden sind

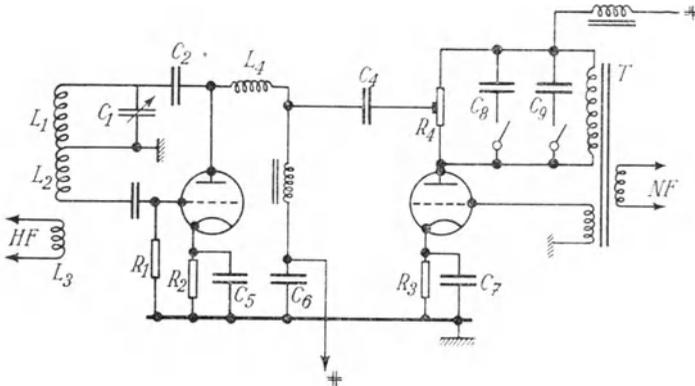


Abb. 72. HF-Generator

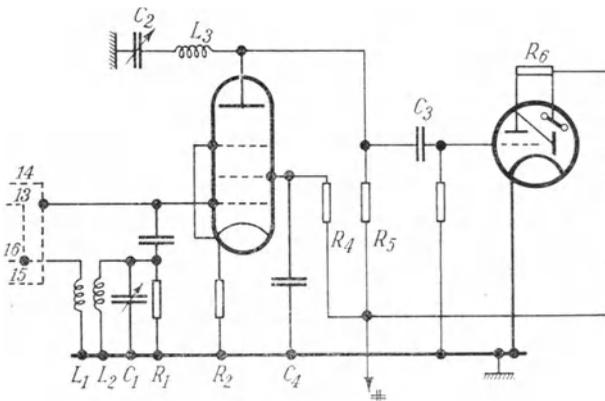


Abb. 73. Anzeigeteil

durch die feste Kapazität  $C_4$  gekoppelt. Der Modulationsgrad kann an den Widerstand  $R_4$  eingestellt werden. Die Frequenz des Modulators wird wieder durch die Festkapazitäten  $C_8$  und  $C_9$  bestimmt. Ganz rechts sehen wir den Eisentransformator für den Modulator, während ganz links das Spulensystem des Hochfrequenzgenerators  $L_1 \dots L_2 \dots L_3$  zu sehen ist. Bei  $HF$  wird die Hochfrequenz und bei  $NF$  die

Niederfrequenz abgenommen. In Abb. 73 sehen wir den Anzeigeteil. Rechts ist wieder das magische Auge eingezeichnet, dessen Schaltung schon früher besprochen wurde. Links sehen wir die Vorverstärkerröhre.

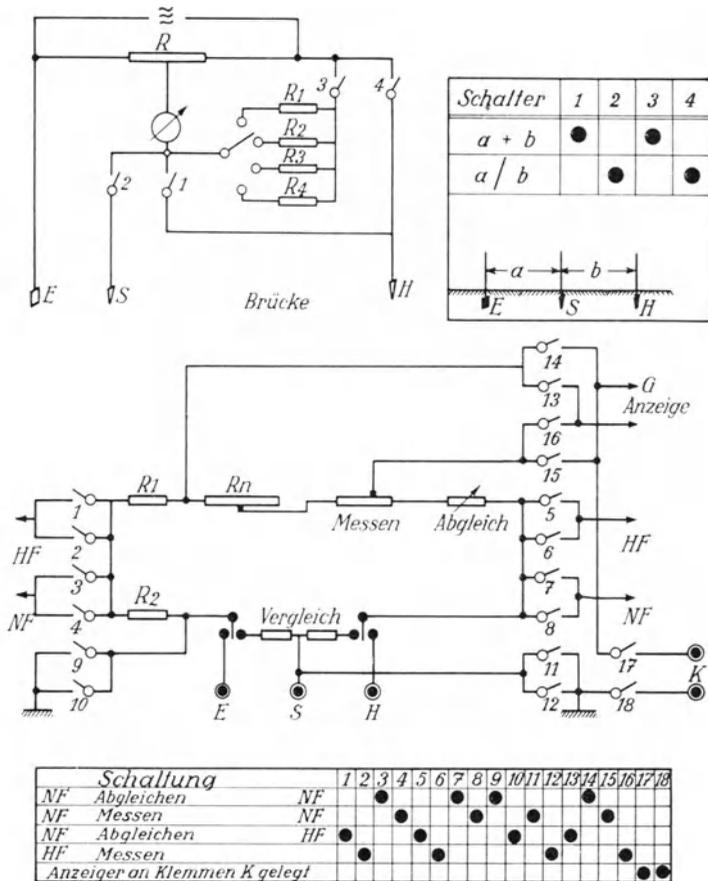


Abb. 74. Meßteil (nach Lang)

Neu tritt die Gitterabstimmung  $L_2 \dots C_1$  dazu. In der Anode der Verstärkerröhre liegt der Kreis  $L_3 \dots C_2$ . Die übrige Anordnung entspricht der, die wir schon früher besprochen haben. In Abb. 74 sehen wir den Meßteil und alle erforderlichen Schalter. Die Bezifferung dieser Schalter stimmt mit jener der anderen Abbildungen überein. Unter dem Schema sind die erforderlichen Schalterstellungen ein-

gezeichnet, und zwar oben die Hochfrequenz  $HF$  und darunter die Niederfrequenz  $NF$ .  $E \dots S \dots H$  sind die Anschlüsse für Erder, Sonde und Hilfserder.  $K$  sind die Klemmen, zu denen bei entsprechender Schalterstellung die Zuleitungen zum Anzeigeteil herausgeführt werden. Rechts oben sind schließlich die Leitungen eingezeichnet, die zum Anzeigeteil (Abb. 73) führen. Der Generator, das Netzanschlußgerät und der Meßteil nebst Anzeigeteil sind in drei selbständige Blocks eingebaut, die untereinander durch Netzsehnüre verbunden werden. In dem Koffer ist auch noch Platz für eine einfache Meßbrücke, deren Schaltung in der Abb. 74 eingezeichnet ist. Die Hochfrequenz wird parallel zum Brückenwiderstand  $R$  angelegt.  $R_1 \dots R_4$  sind die Vergleichswiderstände. An Stelle des eingezeichneten Meßgerätes wird natürlich der Anzeigeteil verwendet. Der Anschluß erfolgt über die Klemmen  $K$ . Die vier Schalter sind miteinander gekoppelt, so daß die zwei in der Abbildung eingezeichneten Stellen



Abb. 75. Messung im Gelände

lungen möglich sind. Im ersten Falle wird die Summe, im zweiten das Verhältnis der einerseits zwischen Erder und Sonde, andererseits zwischen Sonde und Hilfserder liegenden Widerstände bestimmt. In Abb. 75 sehen wir das Gerät bei einer Messung im Gelände. Wie bedeutend mitunter die Unterschiede zwischen hochfrequenter und niederfrequenter Messung sein können, zeigt in zwei Beispielen die Abb. 76. Bei a) sehen wir eine Gebäudeerdung, die an eine längere Wasserleitung angeschlossen ist, bei b) eine an zwei Stellen geerdete Nulleitung. Man sieht, daß zwischen der hochfrequenten und niederfrequenten Vermessung, besonders im Falle der Leitung, sehr bedeutende Unterschiede entstehen können. Es wurde schon früher

darauf hingewiesen, daß hochfrequente Messungen auch dazu führen, Korrosionsschichten an Erdern nachzuweisen. In Tafel VII sind einige Ergebnisse zusammengestellt, die bei der Vermessung von Platten erhalten wurden, die mit einer dünnen, nichtleitenden Schicht überzogen waren.

Man sieht sehr deutlich, daß die Werte, die man mit Hochfrequenz erhält, ungefähr jenen entsprechen, die bei der Vermessung einer

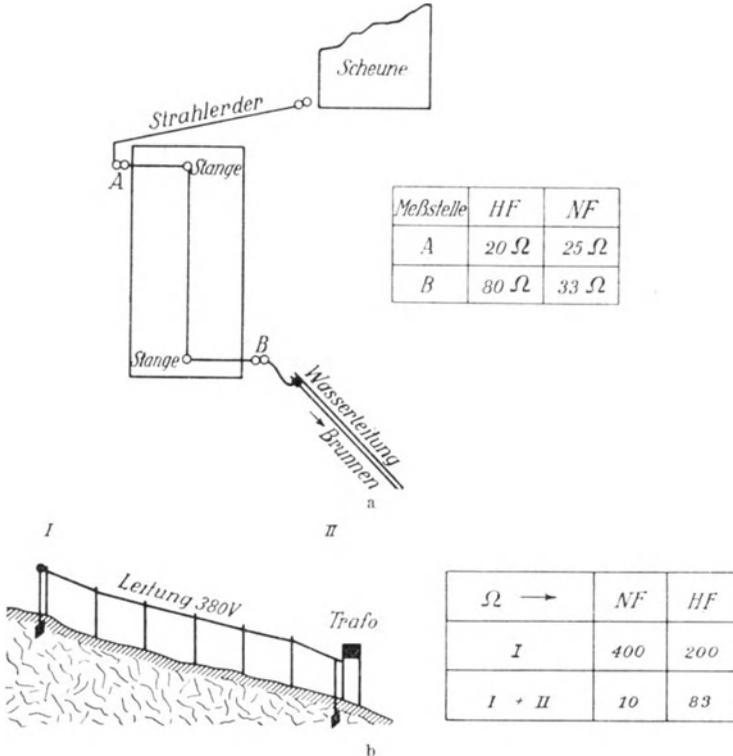


Abb. 76. Hochfrequente Messungen an Gebäude- und Leitungserdern

blanken Platte mit Gleichstrom erzielt wurden. Wenn man also gleichzeitig eine niederfrequente und eine hochfrequente Messung durchführt, so kann man erkennen, ob eine Vergrößerung des Widerstandes durch Korrosion und ähnliche Faktoren, oder aber durch eine Verschlechterung des Gebirgswiderstandes entstanden ist. Diese Unterscheidung ist, wie bereits früher ausgeführt wurde, ungemein wichtig.

Tafel VII (nach Lang)

Erder in feuchtem Sand	Resultierender Übergangswiderstand in Ohm pro dm <sup>2</sup> bei einer Meßfrequenz von			
	50 Hz	500 Hz	5000 Hz	300 000 Hz
Rohrerder, lackiert . . . . .	5,4	2,7	2,5	2,3
Plattenerder, lackiert . . . . .	11,4	8,0	7,0	3,2
Plattenerder, blank . . . . .	4,5	3,9	3,9	3,7
Rohrerder mit Picceinüberzug . . . . .	5,8	4,9	4,2	1,2
Strahlererder 1 m/m, Emailldraht . . . . .	26,0*)	24,0*)	22,7*)	13,7*)

\*) Pro 1 m Länge.

Neben dem absoluten Wert interessiert uns auch oft die Phasenlage, also der Winkel, den Strom und Spannung im Erder einschließen. Man kann zu diesem Zweck eine Anordnung verwenden, die von Geyger entwickelt wurde. Sie ist in Abb. 77 dargestellt. Über die Spulen  $L_1 \dots L_2$  sind zwei Kreise an den Erderstromkreis angekoppelt, in denen, wie man leicht ersehen kann, die Spannungen gegeneinander um  $90^\circ$  verschoben sind. Die übrige Schaltung ist nach dem, was früher ausgeführt wurde, sicher verständlich. An den beiden eingezeichneten Meßdrähten werden die Gleitkontakte so lange verschoben, bis das Nullinstrument stromlos wird.

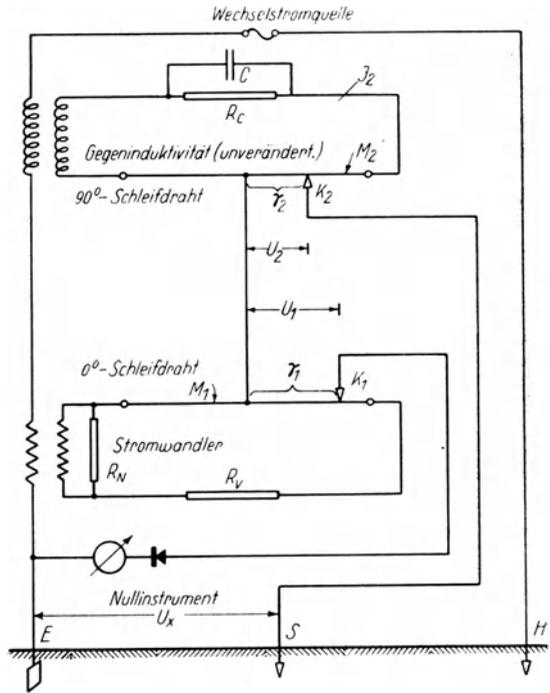


Abb. 77. Bestimmung der Phasenlage

Außer den hier besprochenen Verfahren sind natürlich auch solche zu verwenden, die in der Hochfrequenztechnik zu anderen Zwecken schon lange verwendet werden. Man kann z. B. den zu untersuchenden

Widerstand  $R$  in einen elektrischen Schwingungskreis einschalten, so wie dies in Abb. 78 gezeigt wird. Man erhält dann eine Schwingungsdauer  $T$

$$T = \frac{1}{\nu} = 2\pi \sqrt{CL} \sqrt{1 + CL \cdot \left(\frac{R}{2L}\right)^2} = T_0 k.$$

Bei einer Wellenlänge von 1000 m, einer Kapazität  $C$  von 100 cm und einer Selbstinduktion  $L$  von  $2,5 \cdot 10^6$  cm erhält man bei einem eingeschalteten Widerstand von  $R = 100$  Ohm für den Wert  $k^2 = 1,0001$ . Daraus erhält man dann, wenn  $\nu_0$  die Frequenz bei kurzgeschlossenem Widerstand bedeutet:

$$\nu_0 = \nu_0 k$$

Wenn wir nun die Frequenz konstant erhalten, indem wir den Kondensator  $C$  verändern, so können wir den Wert, um den die Kapazität geändert wird, in folgender Weise erhalten:

$$\Delta C = \frac{T_0^2}{4\pi^2 L} (k^2 - 1) = C_0 (k^2 - 1).$$

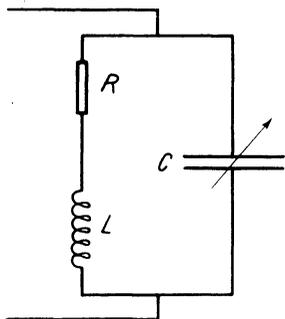


Abb. 78. Schwingungskreis

Ausgerechnet ergibt dies einen Kapazitätsunterschied von ungefähr 0,01 cm. Wenn wir die Kapazität  $C$  mit 1000 cm wählen und die Selbstinduktion  $L$  entsprechend kleiner mit  $2,5 \cdot 10^5$  cm annehmen, so erhalten wir in gleicher Weise für  $k^2 \sim 1,01$  und für die notwendige Kapazitätsänderung bereits 10 cm. Wir sehen also, daß es nötig ist, die Kapazität nicht zu klein zu wählen. Ein bestimmtes oberes Maß ist natürlich dadurch gegeben, daß die Selbstinduktion einen bestimmten Wert nicht unterschreiten darf. Dieser Wert muß so groß sein, daß ihm gegenüber die Selbstinduktion der Zuleitungen zu vernachlässigen ist. Da die Kapazität der Leitungen und bei längeren Leitungen schließlich auch deren Selbstinduktion im allgemeinen als Unbekannte in die Rechnung eingehen, so empfiehlt sich stets die Anwendung einer Kompensationsmethode. Es wird ein Widerstand von bekannter Größe vorgeschaltet und dieser einfach solange verändert, bis wieder bei der ursprünglichen Kondensatorstellung auch die ursprüngliche Frequenz erreicht wird. Der Betrag, um den dieser Widerstand geändert wird, entspricht dann dem gesamten Widerstand. Zur Messung wird das Schwebungs- und das Reißverfahren verwendet. In Abb. 79 und 80 ist das Schwebungsverfahren dargestellt. In Abb. 79 sehen wir

die schematische Anordnung. Der Generator  $O_2$  wird durch einen Quarz auf konstanter Frequenz erhalten. Der zweite Generator  $O_1$  ist mit dem Meßkreis verbunden. Dadurch wird seine Frequenz geändert. Durch die Überlagerung der beiden Frequenzen entsteht dann eine Schwebung, die am Instrument  $J$  abgelesen werden kann. Es werden dann der Kondensator  $C$  bzw. der Widerstand  $R'$  solange verstellt, bis die Schwebung wieder verschwindet und das Instrument  $J$  daher keinen Ausschlag anzeigt. Durch den Schalter  $S$  kann der Erderstromkreis kurzgeschlossen werden. Man bestimmt dann  $R'$  einmal bei geöffnetem und einmal bei geschlossenem Schalter  $S$ . Die Differenz ist gleich der Summe der Ausbreitungswiderstände der Erder  $E_1$  und  $E_2$ . Mit diesen Instrumenten sind noch sehr empfindliche Messungen möglich.

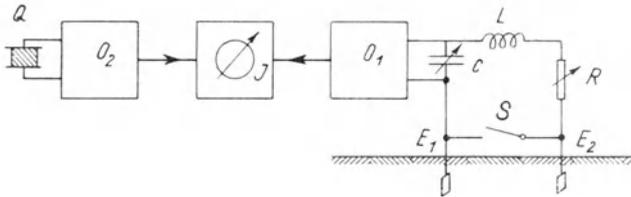


Abb. 79. Schwebungsverfahren

Neuerdings werden die beiden Röhren  $R_1$  und  $R_2$  in eine einzige zusammengelegt. Man verwendet dann Schaltungen mit Achtpolröhre. Sehr häufig wird auch das Reißverfahren verwendet. In Abb. 80 ist dieses schematisch dargestellt. Im Gitterkreis einer Röhre liegt ein Steuerquarz  $Q$ . Im Anodenkreis eine Selbstinduktion  $L$  und eine Kapazität  $C$ . Das Instrument  $J$  gestattet die Stärke des Anodengleichstromes abzulesen. Wenn wir nun  $C$  verändern, so wird sich damit auch der Anodengleichstrom  $J$  verändern und wir erhalten die eingezeichnete Kurve. Der plötzliche Rückgang des Anodengleichstromes entspricht dem Schwingungseinsatz. Würden wir zu  $C$  eine weitere Kapazität parallel schalten, so würde sich auch der Punkt  $S$  auf der Abszisse verschieben. Wenn wir daher einmal ohne diese Kapazität, das andere Mal mit ihr den Punkt  $S$  bestimmen, dann wissen wir, daß die Verschiebung des Punktes  $S$  auf der Abszisse den gleichen Wert angibt wie jenen der zugeschalteten Kapazität. In Abb. 81 ist eine praktische Schaltung zu sehen.  $Q$  entspricht wieder dem Steuerquarz. Im Anodenkreis liegt einmal die Kapazität  $C$ , weiter die Spule  $L$  und der geringe veränderliche Widerstand  $R$ . Wir legen nun den

ingezeichneten Umschalter an den linken Kontakt und stellen  $R$  auf einen bestimmten Wert ein. Es wird dann  $C$  solange verändert werden, bis das Abreißen der Schwingungen beobachtet wird. Dann wird der Umschalter nach rechts gelegt und jetzt  $R$  so geändert, daß die Schwingungen wieder bei der gleichen Stellung von  $C$  einsetzen. Der Betrag, um den  $R$  verändert wurde, entspricht dann der Summe der beiden Erderwiderstände. Parallel zum Meßgerät liegt noch ein Shunt und

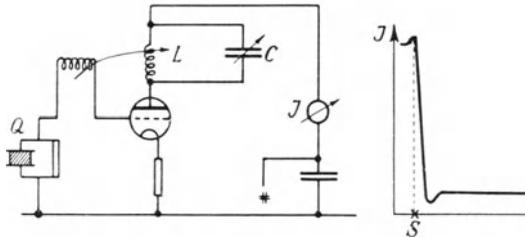


Abb. 80. Reißverfahren

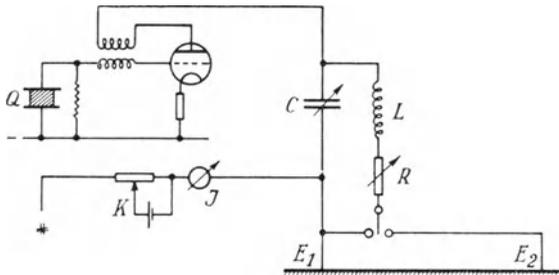


Abb. 81. Erdmessung nach der Reißmethode

in der Leitung ist eine Kompensationsstufe eingeschaltet. Das komplette Untersuchungsgerät enthält dann natürlich noch weitere Einrichtungen, die hier nicht weiter besprochen werden sollen.

In Abb. 82 sehen wir den Abgleichkreis dargestellt. Zunächst wird der Schalter  $S$  auf den oberen Kontakt gestellt und mittels  $R'$  abgeglichen. Dann wird der Schalter nach unten geschoben und nun  $R$  solange eingestellt, bis wieder der gleiche Abreiß- oder Anspringpunkt erreicht ist. Der Betrag, um den dann  $R$  verstellt wurde, entspricht der Summe der beiden Erderwiderstände.

Geräte dieser Art können ohne weiteres für die in Betracht kommenden Widerstandsmeßbereiche von 0 bis 200 Ohm gebaut werden. Die Meßgenauigkeit beträgt ungefähr 1 bis 2 %.

Der Widerstand kann auch einem Teile der Spule parallel geschaltet werden oder mit dem Abstimmkreise z. B. transformatorisch gekoppelt werden. Zu solchen Anordnungen wird man mitunter greifen, wenn man Geräte für weite Meßbereiche konstruieren soll.

Schwankungen der Heiz- und Anodenspannung spielen bei längeren Messungen eine nicht unbedeutende Rolle. Bei genügend großen

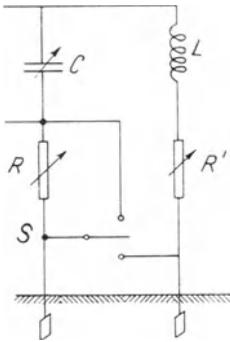


Abb. 82. Abgleichkreis

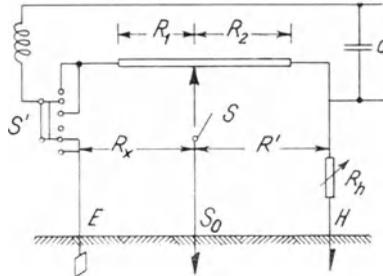


Abb. 83. Brückenordnung (nach Fritsch)

Batterien sind aber ohne weiteres ausreichend genaue Angaben zu erhalten.

Schließlich kann noch die in Abb. 83 dargestellte Anordnung verwendet werden. Zunächst steht der Schalter  $S'$  am obersten Kontakte. Man bestimmt den Widerstand  $R_1 + R_2$ . Dann wird dieser auf den mittleren Kontakt gestellt und durch Abgleichen am Widerstande  $R_h$

$$R_x + R' = R_1 + R_2$$

gewählt. Wir erhalten nun bei offenem Schalter  $S$

$$R = (R_x + R') (R_1 + R_2) / (R_1 + R_2 + R' + R_x)$$

und bei geschlossenem Schalter  $S$

$$\bar{R} = R_x R_1 / (R_x + R_1) + R' R_2 / (R' + R_2).$$

Wenn nun  $R_1/R_x = R_2/R'$  bzw.  $R_x = k R'$  und  $R_1 = k R_2$ , so erhalten wir, wenn  $(1 + k) = \alpha$ , sowohl bei offenem als auch bei geschlossenem Schalter  $S$

$$R = \alpha (R' \cdot R_2)/(R' + R_2).$$

Es tritt in diesem Falle also keine Gesamtwiderstandsänderung ein. Verschieben wir den Gleitkontakt, so daß das Verhältnis  $R_1/R_2$  geändert wird, so tritt aber eine solche ein und kann bei der großen Empfindlichkeit des Reißverfahrens auch nachgewiesen werden. Wenn also beim Tasten des Schalters  $S$  keine Widerstandsänderung mehr eintritt und das im Anodenkreise liegende Mikroamperemeter daher auch ruhig bleibt, so kann dann der dem Erder  $E$  zugehörige Widerstand dem Widerstande  $R_1$  gleichgesetzt werden. Wichtig ist, daß sowohl der Hilfsrider  $H$  als auch die Sonde  $So$  möglichst geringe Übergangswiderstände aufweisen, um die Empfindlichkeit der Anordnung nicht zu sehr zu verkleinern. Die Sonde muß natürlich auch wieder außerhalb des Sperraumes um  $E$  liegen.

Es bestünde natürlich noch die Möglichkeit, viele andere Verfahren für diesen Zweck zu verwenden. Von einer Besprechung soll aber hier Abstand genommen werden, da die Verfahren bisher noch nicht praktisch verwendet wurden und andererseits die bereits besprochenen Anordnungen vollkommen ausreichen, um alle notwendigen Messungen durchzuführen.

## VI. Anwendungen

Im Rahmen dieses Buches kann natürlich kein Überblick über die zahlreichen Anwendungen der Erdung geboten werden und noch weniger über deren Einbau in irgendwelche Leitungsnetze. Dies fällt in den Rahmen anderer Zweige der Elektrotechnik, und da darüber eine reiche Fachliteratur existiert, so hätte es keinen Sinn, eine unvollständige Wiederholung dessen zu bieten, was anderswo viel genauer ausgeführt ist. Ich möchte mich daher darauf beschränken in einigen Beispielen zu zeigen, inwieweit geoelektrische Faktoren zu berücksichtigen sind, da gerade dieser Punkt oft übersehen wird. Besonders auf dem Gebiete der Blitzerdung sind solche von weitgehender Bedeutung. Sie werden im übrigen in eigenen größeren Arbeiten behandelt, so daß auch hier ein kurzer Hinweis genügen dürfte.

## 1. Betriebserder

Der Betriebserder hat den Zweck, entweder einen Leiter zu ersetzen, oder aber einen Betriebszustand zu schützen. Er tritt z. B. bei Störungen infolge Kurzschlusses, beim Übergang von Hochspannung auf Niederspannungsnetze und in ähnlichen Fällen in Funktion. Der Zweck des Erders besteht darin, zu verhindern, daß die Spannung des in Betrieb befindlichen Leiters ein bestimmtes, meist durch Vorschriften festgelegtes Maß überschreitet. Daraus geht hervor, daß die Bemessung eines solchen Erders ausschließlich von der Art und Dimensionierung der betriebenen Anlage, den örtlichen Verhältnissen und schließlich noch von den gesetzlichen Vorschriften abhängig ist. Es ist daher kaum möglich, allgemeingültige Gesichtspunkte zu entwerfen.

## 2. Schutzerder

Das Wesen des Schutzerders wurde schon früher kurz besprochen. Hier ist es möglich, gewisse allgemeine Richtlinien aufzustellen. In

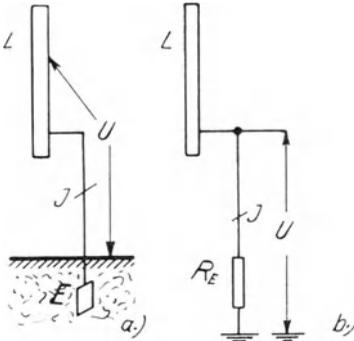


Abb. 84. Schutzerdung

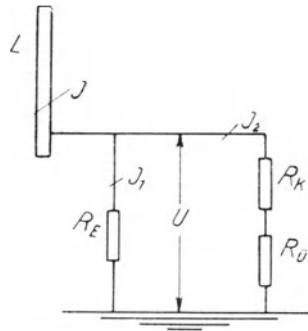


Abb. 85. Schutzerdung

Abb. 84 sehen wir einen Leiter  $L$ , der an einen Erder  $E$  angeschlossen ist. Wenn nun durch die Erdleitung ein Strom  $J$  fließt, so ist die Spannung zwischen der Erdoberfläche und dem Leiter  $U$  bekanntlich  $J \cdot R_E$ . Diese Spannung darf ein bestimmtes gefährliches Maß nicht überschreiten. Bei b ist das entsprechende Ersatzschema eingezeichnet. Wenn nun den Leiter eine Person berührt, die am Erdboden steht, so erhalten wir das in Abb. 85 gezeichnete Ersatzschema. Der menschliche

Körper ist bekanntlich ein elektrischer Leiter, und wir können ihn in grober Annäherung durch den Körperwiderstand  $R_K$  und den Übergangswiderstand  $R_{ii}$  ersetzen. Unter dem Körperwiderstand wollen wir hierbei den Widerstand des gesamten menschlichen Organismus verstehen, während der Übergangswiderstand am Kontakt des menschlichen Organismus einerseits mit dem Leiter, andererseits mit dem Erdboden auftritt. Er wird also vor allem durch die Beschaffenheit der Haut, dann aber auch durch andere Faktoren, wie z. B. das Schuhwerk usw. bedingt werden. Schließlich spielt auch die Beschaffenheit der Erdoberfläche eine Rolle. Es ist

$$J = J_1 + J_2;$$

weiter :

$$J_2 = \frac{U}{R_K + R_{ii}} = J_1 \frac{R_E}{R_K + R_{ii}}.$$

Aus physiologischen Gründen darf nun der Strom  $J_2$  nicht gefährlich werden. Er muß also unter ungefähr 30 Milliampere bleiben. Natürlich ist dieses Maß kein feststehendes. Es ist von den verschiedensten Faktoren abhängig, auf die hier nicht weiter eingegangen werden kann. Der Körperwiderstand  $R_K$  ist nun sowohl biologisch als auch elektrisch variabel. Er ist vor allem von der Durchfeuchtung der Hautschichten abhängig. Weiter wissen wir, daß er sich bei bestimmten Krankheiten verändert. Infolge des Erschreckens treten z. B. sprunghafte Änderungen ein, die natürlich gerade hier von Bedeutung sein können. Auch von elektrischen Faktoren ist er abhängig, so z. B. von der Stromstärke und der Frequenz. Im allgemeinen wird er zwischen 500 und 2000 Ohm schwanken. Als Mittelwert können wir 1000 bis 1300 Ohm annehmen. Der Übergangswiderstand  $R_{ii}$  ist schließlich vor allem durch die Bodenbeschaffenheit bestimmt. Steht eine Person mit bloßen Füßen am Boden, so ist nach Löbl der Übergangswiderstand ungefähr dem 1,7fachen des Bodenwiderstandes gleich. Natürlich spielen auch da wieder eine ganze Reihe weiterer Faktoren eine Rolle, so daß man auch diesen Wert nicht immer als feststehend betrachten kann. Es ist nun wichtig, besonders bei der Schutzerdung darauf zu achten, daß der Spannungstrichter um die betreffende Erdung immer genau bestimmt wird. Geoelektrische Diskontinuitäten können es mitunter bedingen, daß die Schutzerdung ihren Zweck nicht richtig erfüllt. Oft ist es schwierig, den Spannungstrichter genau festzulegen.

besonders dann, wenn der Raum beschränkt ist. Dies wird z. B. in Gruben der Fall sein. Trotzdem muß in jedem Falle die Vermessung auf größere Entfernungen ausgedehnt werden, denn z. B. gerade in Gruben kann es möglich werden, daß einzelne leitende Schichten, die mit der Erdung in Berührung stehen, in größerer Entfernung von dieser ausbeüßen und dadurch andere Verhältnisse bedingen, als zunächst aus einer Vermessung in der Nähe des Erders entnommen werden konnte. Besonders wird es nötig sein, auf einzelne durchfeuchtete Stellen, wasserführende Spalten usw. Rücksicht zu nehmen. Obertags werden diese Schwierigkeiten in der Regel fortfallen, da die oberste Erdschicht, die ja gerade bei dieser Erdung wichtig ist, meist genügend homogen ist. Auf jeden Fall ist aber auf Rohrleitungen usw. Bedacht zu nehmen, durch die die Widerstandsverhältnisse im Untergrunde recht bedeutend verändert werden können.

### 3. Blitzerder

Am wichtigsten sind geoelektrische Faktoren natürlich beim Blitzerder. Es wurde auch darauf hingewiesen, daß im ungünstigen Gelände nur die hochfrequente Überprüfung ein ungefähr richtiges Bild von den bei Blitzdurchströmung auftretenden Widerstandsverhältnissen geben kann. Diese Überprüfung darf sich nun aber keineswegs bloß auf den Erder selbst erstrecken, sondern muß sich auch auf dessen weitere Umgebung beziehen. Befinden sich nämlich in der Umgebung des Erders Stellen von einer Leitfähigkeit, die die an der Erdungsstelle wesentlich übertrifft, so besteht immer die Gefahr des Abspringens. Der Blitz gleitet dann von der Erdleitung ab und nimmt seinen Weg nach einer solchen gutleitenden Stelle. Es kann dann natürlich geschehen, daß in dem Raume zwischen Erder und dieser Stelle schwere Schäden angerichtet werden. Solche abspringenden Blitzäste sind wohl auch besonders deshalb gefährlich, weil sie oft ziemlich schräg einfallen und daher z. B. Objekte an Stellen treffen, die normalerweise überhaupt nicht gegen Blitzschlag gesichert werden. Im allgemeinen genügt es, wenn die Umgebung im Umkreise von 30 bis 50 m untersucht wird. Eine solche Untersuchung kann unterbleiben, wenn entweder der Boden in seinen Oberflächenschichten völlig homogen ist, oder aber wenn die Blitzerde selbst einen ausreichend niedrigen Ausbreitungswiderstand (also ungefähr 5 bis 10 Ohm)

aufweist. Unbedingt notwendig werden solche Messungen im Gebirge, das im allgemeinen sehr schlecht leitet und von einzelnen gutleitenden Spalten durchzogen wird. In solchen Fällen wird es nötig werden, überhaupt eine geoelektrische Vermessung des Untergrundes vorzunehmen, ehe man die Erdungsstellen auswählt. Sehr oft werden Blitz-erder bis zum Grundwasser niedergebracht und zu diesem Zwecke mitunter auch eigene Bohrungen angelegt. In diesen Fällen muß man unbedingt untersuchen, ob der Grundwasserspiegel nicht größeren Schwankungen unterworfen ist. Es kann nämlich durchaus möglich sein, daß z. B. im Frühjahr der Erder im Grundwasser liegt, während er im Hochsommer, also zu einem Zeitpunkt, in dem er am meisten gebraucht wird, bereits über dem inzwischen abgesunkenen Wasserspiegel liegt. Ist dies der Fall, so verliert er jeden Wert. Überhaupt muß der Veränderung des Erdwiderstandes gerade bei Blitzeerden größte Aufmerksamkeit zugewendet werden. Im ungünstigen Gelände können Schwankungen innerhalb so weiter Grenzen auftreten, daß dadurch die Erdung einen jeden Wert verliert. Um solche Schwankungen festzustellen, werden in bestimmten zeitlichen Abständen die Erder überprüft. Die Ergebnisse dieser Überprüfung werden dann in Kontrollkarten eingetragen. Die Kontrollkarte soll unbedingt Angaben über die Bodenbeschaffenheit, über die Witterung am Tage der Messung und in der der Messung vorausgehenden Zeit, über die Vegetation an der Erdungsstelle und die wichtigsten hydrologischen Daten enthalten. Die heute aufgelegten Kontrollkarten enthalten leider diese Angaben in den seltensten Fällen und können dann kaum eine Grundlage für die Beurteilung des Erders bieten. Mit einer Überprüfung im Abstände von 2 bis 3 Jahren kann man sich, wenn nicht besondere Umstände dagegensprechen, im allgemeinen einverstanden erklären. Unbedingt notwendig wäre es, daß mindestens im ersten Jahre zu verschiedenen Jahreszeiten gemessen und dadurch jener Zeitpunkt festgestellt wird, an dem der Erderwiderstand den größten Wert erreicht. Die folgenden Überprüfungen wären dann immer zu diesem so bestimmten Zeitpunkt durchzuführen. Heute wird leider oft die Erdung zu einem ganz unpassenden Zeitpunkt überprüft. So führt man mit Vorliebe Kontrollmessungen im Frühjahr durch und bestimmt dann Werte, die in den meisten Fällen ungleich günstiger sind als jene, die während des Sommers gelten. Man approbiert dann Anlagen, die später vollkommen versagen. Es wäre nötig, solche Möglichkeiten durch entsprechende Vorschriften zu verhindern.

In diesen Zeilen konnte natürlich nur das Notwendigste über den Gegenstand mitgeteilt werden. Leser, die die eine oder andere Frage näher interessiert, müssen auf die zahlreichen Spezialarbeiten verwiesen werden, von denen einige wichtige im Schrifttumverzeichnis angeführt sind. Daß dieses keinerlei Wert auf Vollständigkeit legt, möge ausdrücklich betont werden. Die Erdermeßtechnik, die in verhältnismäßig kurzer Zeit entwickelt wurde, ist heute sicher schon so vorgeschritten, daß sie alle Aufgaben, die man ihr stellen kann, in zufriedenstellender Weise behandeln kann. Im übrigen muß sie laufend der Entwicklung jener Zweige der Elektrotechnik angepaßt werden, in deren Dienst sie jeweils gestellt wird.

# Einige Literaturangaben

## Allgemeines

- Albrecht, D., Siemens-Ztg. **6**, 248, 1926.  
Anleitung zur Vornahme von Erdungsmessungen bei Blitzableiteranlagen.  
Herausgegeben von der Sächsischen Brandversicherungskammer in  
Dresden 1938.  
Blitzschutz. Bearbeitet vom A. B. B. 4. Aufl. Neudruck (1940). Berlin,  
Wilh. Ernst & Sohn.  
Grammatčikov, A. S., Električestvo **61**, 16, 1940.  
Horth, F. M. Electr. World **114**, 64, 126, 1940.  
Lea, J., Electr. Engineer **8**, 837, 1939.  
Löbl, O., Erdung, Nullung, Schutzschaltung. Berlin, Springer, 1933.  
Ollendorf, F., Erdströme. Berlin, Springer, 1928.  
Priblonskij, E. N., Vestn. elektr. promišl **11**, 451, 1940.  
VDE.-Vorschriften. VDE 0141/XII. 40; ETZ **62**, 373, 1941.

## Angaben über die Eigenschaften geologischer Leiter

- Akopjan, A., Električestvo **61**, 46, 1940.  
Bourquin, H., Bull. S. E. V. **30**, 771, 1939.  
Fritsch, Volker, Ergebn. kosm. Physik **4**, 219, 1939.  
Handbuch der Experimentalphysik **25**, 3. Teil. Leipzig, Akademische  
Verlags-G. m. b. H.  
Henney, K. A., Techn. Mittlg. d. Studiengesellschaft für Höchstspannungs-  
anlagen, Nr. 69. Berlin 1935.  
Horváth, B. von, Int. Mitteilg. f. Bodenkde., 230, 1916.  
Hummel, J. N., Z. f. angew. Geophysik **5**, 32, 1935; Z. f. Geophysik **5**,  
89 u. 228, 1929.  
Löwy, H., Ann. d. Physik (4) **36**, 125, 1911.  
Lurje, A. I., Električestvo **61**, 9, 1940.  
Marsch, B., ATM. Juni 1938.  
Münger, O., Bull. S. E. V. **31**, 529, 1940.  
Ratmirov, J., Električestvo **61**, 45, 1940.  
Reich, H., Angewandte Geophysik. Leipzig, Akademische Verlags-  
G. m. b. H.  
Smith-Rose, R. L., Proc. Roy. Soc. London (A) **1940**, 359, 1933; **144**,  
500, 1937.  
Wintsch, H., Helvetica acta physica **5**, 126, 1932.

## Allgemeine Meßtechnik

- Ebert, L., Angew. Chemie **47**, 305, 1934, (Über Dielkometrie.)  
Erdungsmesser. A. T. M. Dezember 1938.  
Fritsch, Volker, A. T. M. V-65-13, 1939; E. N. T. **17**, 77, 1940.

- Geyger, W., Arch. f. Elektrot. **23**, 109, 1929.  
 Krönert, J., A. T. M. V—35, 192—1, 1932; Meßbrücken und Kompensatoren. München 1935.  
 Maša, P., Elektr. Obzor **29**, 481, 1940.  
 Niemayer, Dissertation. Hannover 1929. (DK-Bestimmungen.)  
 Pflieger, P. M., Siemens-Ztg. **13**, 12, 1933; **19**, 396, 1939; A. T. M. V—35, 192—2, 1934. Pflieger, P. M. und Marsch, B., E. T. Z. **62**, 619, 1941.  
 Pohlhausen, VDE-Fachberichte **2**, 39, 1927.  
 Rhode u. Schwarz, Hochfrequenztechn. u. Elektroakt. **43**, 156, 1934.  
 Schahfer, R. M. u. Knutz, W. H., Electr. World **114**, 1163, 1940.  
 Schmidt, H. J., E. N. T. **18**, 173, 1941.  
 Schrank, W., E. T. Z. **60**, 485, 901, 1939; **61**, 925, 949, 1940; **62**, 836, 1941.  
 Siemens & Halske A.-G., A. T. M. (Gesch.-Mitteilg.) V—35, 192—4, 1938.  
 Stubbings, G. W., Electr. Engineer **9**, 857, 1940.

### Hochfrequenz- und Stoßstrommeßtechnik

- Aigner, V., E. T. Z. **54**, 1233, 1933.  
 Baatz, H., E. T. Z. **59**, 1263, 1938.  
 Bellaschi, P. L., Electrician **123**, 271, 1939.  
 Binder, L., Sondertagung des Verbandes sächsischer E-Werke 1932.  
 Elsner, R., E. T. Z. **60**, 1368, 1939.  
 Fritsch, Volker, Grundzüge der Funkgeologie. Braunschweig, Verlag Friedr. Vieweg & Sohn, 1939; Hochfrequenztechn. u. Elektroakt. **56**, 54, 1940; Geofisica pura e applicata **2**, Heft 2, 1940.  
 Graul, F., Sachsenwerk Mittlg. **9**, 3, 1939. (Stoßstromgeneratoren.)  
 Lang, W., Prager Dissertation 1940.  
 Müller, H., Heschommitteilungen **2240**, 1933.  
 Rein, H. u. Wirtz, K., Radiotel. Praktikum. Berlin, Springer, 1922.  
 Stanek, J., Europäischer Fernsprehdienst **55**, 119, 1940.  
 Zinke, O., Hochfrequenzmeßtechnik. Leipzig, Verlag Hirzel, 1938.

### Blitzschutz

- Beljakov, A. P., Električestvo **61**, 37, 1940.  
 Blitzschläge und Gebäudeblitzschutz. Bull. S. E. V. **31**, 178, 1940.  
 Fritsch, Volker, Gerlands Beitr. **57**, 65, 1940; Geofisica pura e applicata **1**, Heft 3/4, 1939; E. T. Z. **61**, 739, 1940; Bautenschutz **12**, 17, 1941.  
 Lehmann, G., E. T. Z. **53**, 980, 1932; **56**, 1371, 1935.  
 1. Heft 3/4, 1939; E. T. Z. **61**, 739, 1940; Bautenschutz **12**, 17, 1941.  
 Lehmann, G., E. T. Z. **53**, 980, 1932; **56**, 1371, 1935.  
 Lewis, W. u. Foust, C. M., Electr. Engineer **59**, 227, 1940. Trans. Section.  
 Meek, J. M., Phys. Rev. II. sect. **55**, 972, 1939.  
 Moench, F., E. T. Z. **62**, 356, 1941.  
 Norrinder, H., E. T. Z. **62**, 617, 1941.  
 Schwaiger, A., Schutzbereich von Blitzableitern. München-Berlin, Verlag Oldenbourg, 1938.  
 Valeev, Ch. S. u. Ponomarenko, V. D., Električestvo **61**, 38, 1940.

# Sachregister

- Abgleichverfahren 41ff.  
—, automatisches 43.  
—, einfaches 43.  
Ausbreitungswiderstand des Erdes  
12ff., 26ff.
- B**  
Bänderder 4.  
Betriebserder 1ff., 79.  
Bettungswiderstand 13.  
Bettungswiderstandes, Bestimmung  
des 35.  
Blitzerder 44, 72, 81.  
Brücke mit konstanter Teilung 48.  
Brückenschaltung 48.
- E**  
Einzelder 4.  
Elektrodenanordnung in Spalten 33.  
Erden 1ff.  
Erder 1ff.  
—, Band- 4.  
—, Betriebs- 1ff., 79.  
—, Blitz- 44, 72, 81.  
—, Einzel- 4.  
—, Füll- 4.  
—, Gruben- 12.  
—, Gruppen- 4, 18.  
—, Platten- 4.  
—, Ramm- 12.  
—, Rohr- 4.  
—, Schutz- 1ff., 79.  
—, Seil- 4.  
—, Überspannungs- 1ff.  
—, die wichtigsten 2.  
Erdpunkt 1ff., 26ff.  
Erdung, Anlage und Ausführung 4ff.  
Erdungen im Brunnen 5, 31.  
Erdung in einer Spalte 19, 29.
- F**  
Frequenz, äquivalente 65.  
Füllerder 4.
- G**  
Gebirgswiderstand 13, 15.  
Geologischer Leiter 15, 20.  
Grundwasserwiderstand 25.  
Grubenerder 12.  
Gruppenerder 4, 18.
- H**  
Hilfselektrodenverfahren 44.  
HF-Erdungsmesser 68ff.  
Hochfrequente Messungen an Ge-  
bäude- und Leitungserder 72.  
Hydrologische Faktoren 20ff.
- K**  
Kontrollkarte 82.  
Kontrollmessungen 82.  
Körperwiderstand 80.
- L**  
Leitfähigkeit von Böden 17.
- M**  
Material für Erder 4.  
Meßbrücke 47, 53, 54.  
Meßgerät mit magischem Auge 55  
56.  
Messung „über Dach“ 44.
- NF**-Erdungsmesser für Stark-,  
Schwachstrom und Baugrund-  
untersuchungen 58ff.
- P**  
Phasenlage, Bestimmung der 73.  
Plattenerder 4.
- R**  
Rammerder 12.  
Registriergerät für Erdermessungen  
51ff.  
Reißmethode 76ff.  
Resultierender Widerstand 38.  
Röhreder 4.  
Rohrleitung als Erder 29, 34, 36.
- S**  
Schutzerder 1ff., 79.  
Schwebungsverfahren 75.  
Seilerder 4.  
Spannungstrichter 26.  
Sperrflächen 28ff.  
Sperraum 28.  
Strom- und Spannungsmessung an  
einem Erder 40.
- T**  
Tongenerator 50.
- Ü**  
Übergangswiderstand 13, 37.  
Übergangswiderstandes, Ermittlung  
des 38, 73.  
Überspannungserder 1ff.  
Untergrund, homogener 10.  
—, inhomogener 11.
- W**  
Wellenwiderstand 36.  
Widerstand feuchter Gesteine 16.  
— trockener Gesteine 14.  
Widerstandsschwankungen an Er-  
dern 22.  
Witterung, Einfluß der 20.

# **Verfahrens- und Meßkunde der Naturwissenschaft**

## **In Vorbereitung befindliche Hefte:**

- Antweiler, Dr. H. J., Elektrometrische Methoden in der Chemie**
- Bauder, Prof. Reinhold, Messung von Drehmoment, Leistung und Drehzahl**
- Blechschildt, Dr. Erich, Induktivität und Wirkwiderstände**
- Cordes, Dr. Heinrich, Die chemische Theorie der Explosionen**
- Dahlke, Dr. Walter, Experimentelle Methoden in der Ultrarotspektroskopie**
- Dunken, Dr. Heinz, Destillieren, Kristallisieren, Sublimieren**
- Dunken, Dr. Heinz, Kalorimetrie**
- Gielessen, Dr. J., Vakuummessung**
- Harms, Dr. Helmut, Dipolmomente und Polarisierbarkeit**
- Kast, Prof. Dr. W., Die Streuung der Röntgen- und Elektronenstrahlen an Dämpfen**
- Matossi, Dr. Frank, Ramaneffekt**
- Moser, Dr. Helmut, und Tingwaldt, Dr., Thermolemente**
- Picht, Prof. Dr. J., Optische Meß- und Prüfmethode der Wehrtechnik**
- Philipp, Prof. Dr. K., Meßmethoden der natürlichen und künstlichen Radioaktivität**
- Rexer, Dr. Ernst, Bestimmung der thermischen Eigenschaften von Gläsern**
- Roth, Prof. Dr. Walter, Thermochemische Meßmethoden**
- Scholz, Dipl.-Chem. Günther, Verfahren zur Herstellung von Nebeln und Rauchen**
- Schulze, Dr.-Ing. R., Strahlenmeßtechnik**
- Seybold, Prof. Dr. August, Chromatographische Analyse**
- Stach, Dr. Erich, Kohlenpetrographische Untersuchungsverfahren**
- Tomaschek, Prof. Dr., und Deutschbein, Dr., Gitter- und Prismenspektrographen**
- Voigt, Dr. Ehrhard, Methoden der Konservierung und Untersuchung von Braunkohlenfossilien**
- Volkman, Dr. H., Drehung der Ebene des polaren Lichtes**
- Volkman, Dr. H., Künstliche Doppelbrechung**
- Wolf, Prof. Dr. K. L., und Dunken, Dr. H., Oberflächenaktivität und Oberflächenfilme**
-