

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 42 (1964)

Heft: 12

Artikel: Die elektrische Leitfähigkeit des Untergrundes und deren Bestimmung = La conductibilité électrique du sous-sol et sa détermination

Autor: Vögtli, K.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-875189>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 29.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

voies par système, de sorte que la capacité totale sera au début de 1 500 voies. En divisant par deux les sections d'amplification et en élargissant la bande de fréquence transmise jusqu'à 6 MHz, on pourra transmettre 21 groupes secondaires par système et la capacité totale sera portée à 6 300 voies. Cette étape nouvelle correspond à la transistorisation des équipements terminaux dans la nouvelle construction 62.

La pose du câble Berne–Lausanne achève non seulement notre réseau de câbles coaxiaux 2,6/9,5 mm à 4 tubes réservé aux faisceaux de lignes interurbaines à grande distance, mais marque la fin de la technique des amplificateurs à tubes électroniques.

därgruppen je System übertragen werden. Dadurch lässt sich die Gesamtkapazität des gleichen Kabels auf 6300 Kanäle steigern.

Diese neue Etappe entspricht der Transistorisierung von Endausrüstungen in der neuen «Bauweise 62.»

Die Verlegung des Koaxialkabels Bern-Lausanne vollendet also nicht nur unser Normal-Koaxialnetz mit 4 Tuben 2,6 / 9,5 mm, die für Fernleitungsbündel grosser Distanz reserviert sind, sondern bedeutet auch das Ende der Verstärkertechnik mit Elektronenröhren.

Die elektrische Leitfähigkeit des Untergrundes und deren Bestimmung

La conductibilité électrique du sous-sol et sa détermination

Zusammenfassung. Zunächst werden einige Besonderheiten beschrieben, die den Untergrund als elektrischen Leiter charakterisieren. Dann werden die theoretischen Grundlagen gegeben, die, praktisch angewandt, Leitfähigkeitsmessungen an geologischen Strukturen ermöglichen.

Résumé. Au début de son article, l'auteur décrit quelques particularités qui donnent au sous-sol son caractère de conducteur électrique. Ensuite, il expose les principes théoriques qui, appliqués pratiquement, permettent de mesurer la conductibilité de structures géologiques.

Riassunto. Conduttività elettrica del sottosuolo e sua determinazione. Vengono dapprima descritte alcune particolarità caratterizzanti il sottosuolo quale conduttore elettrico. Seguono i principi teorici che, applicati praticamente, permettono di misurare la conduttibilità elettrica di strutture geologiche.

1. Einleitung

Kommt im Physikunterricht die Elektrizitätslehre an die Reihe, so dauert es jeweils nicht lange bis davon die Rede ist, dass das Erdpotential ein wichtiger Bezugspunkt für die Spannungsmessung sei und deshalb bei manchen Experimenten geerdet werden müsse. Solange es sich um Versuche mit statischer Elektrizität handelt, hat es den Anschein, die Erde sei eine sehr gut leitende Kugel mit einer Kapazität, die sämtliche zugeführten Ladungen aufnehmen könne, ohne dass dabei ihr Ladungszustand geändert wird. Kommt die Elektrodynamik aufs Programm, wird die Sache schon komplizierter, indem jetzt plötzlich zwischen guten und schlechten Erdungen unterschieden wird. Bei atmosphärischen Entladungen oder Fragen der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen in Bodennähe, muss man schliesslich den ideal leitenden Erdball, der bei der Diskussion der elektrostatischen Grundexperimente vorzügliche Dienste leistete, durch ein unübersichtliches Mosaik von Mittelwerten und Unstetigkeiten ersetzen, um den natürlichen Verhältnissen einigermaßen gerecht zu werden.

1. Introduction

Lorsque, en étudiant la physique, on arrive à l'électricité, on ne tarde pas à constater que le potentiel de terre est un point de référence important pour la mesure de la tension et que, par conséquent, il faut «mettre à la terre» lors de nombreuses expériences. Tant qu'il s'agit d'essais avec l'électricité statique, il semble que la terre est une sphère très bonne conductrice, dont la capacité absorbe toutes les charges qui lui sont amenées sans que son état de charge en soit modifié. Lorsque l'électrodynamique figure au programme, cela devient déjà plus compliqué étant donné qu'on fait tout à coup une distinction entre bonnes et mauvaises terres. Dans le cas de décharges atmosphériques ou de questions de propagation des ondes électromagnétiques au voisinage du sol, on doit finalement remplacer la terre paraissant être un conducteur idéal, qui a rendu de précieux services dans la discussion des expériences fondamentales électrostatiques, par une mosaïque enchevêtrée de valeurs moyennes et de discontinuités, pour approcher dans une certaine mesure les conditions naturelles.

Der Grund dafür liegt darin, dass die elektrischen Eigenschaften der Materialien, welche die Erde aufbauen, in sehr weiten Grenzen variieren.

Es gibt deshalb manche Fragen, die erst dann ernsthaft diskutiert werden können, wenn die Leitfähigkeit des Untergrundes bekannt ist. Wie man derartige Messungen mit Hilfe geoelektrischer Methoden an geologischen Objekten durchführen kann, und welche Schwierigkeiten dabei auftreten, sollen die folgenden Ausführungen zeigen.

2. Der Begriff: Spezifischer Widerstand

Denken wir uns aus dem zu untersuchenden Material – ob Metall, Gestein, Humus, Wasser oder Eis bleibt zunächst belanglos – einen Versuchskörper herausgeschnitten, der die Länge l und überall den gleichen Querschnitt (A) hat, so ist der elektrische Widerstand dieses Leiters proportional zur Länge und umgekehrt proportional zum Querschnitt, also:

$$R \sim \frac{l}{A} \quad (1)$$

Der numerische Wert von R hängt von der Wahl der Widerstandseinheit und der Längeneinheit sowie den elektrischen Eigenschaften des untersuchten Materials ab. Wandeln wir die Proportionalitätsbeziehung (1) mit Hilfe der Proportionalitätskonstante ϱ in die Gleichung

$$R = \varrho \frac{l}{A} \quad (2)$$

um und messen R in Ohm, l und A in Metern (m) beziehungsweise Quadratmetern (m^2), so erhält ϱ die Dimension: Ohm \times Meter (Ωm). ϱ nennt man den spezifischen Widerstand. In der Geophysik, das heisst bei Messungen an geologischen Körpern, wird ϱ gewöhnlich in Ωm gemessen, während zum Beispiel der Chemiker zur Charakterisierung leitender Flüssigkeiten fast immer die 100mal kleinere Einheit Ωcm verwendet. So kommt es, dass die spezifischen Widerstandswerte, mit denen die Chemiker rechnen für die gleichen Materialien 100mal grösser sind als jene der Geophysiker.

Den reziproken Wert ($1/\varrho = \kappa$) nennt man die spezifische Leitfähigkeit.

Der Zahlenwert von ϱ ist für ein bestimmtes Material gleich dem Widerstand des Einheitswürfels in einem Stromkreis, falls zwei einander gegenüberliegende Seiten mit einem leitenden Material beschichtet werden. Der Einheitswürfel des Geophysikers besitzt eine Kantenlänge von einem Meter, der Probewürfel des Chemikers eine solche von nur einem Zentimeter.

ϱ ist eine Materialkonstante, deren Wert aber von vielen Faktoren, wie Temperatur, Verformungsgrad, Stromstärke und Stromart, abhängt. Bei geologischen Leitern spielen ausserdem auch der Wassergehalt und die Art der Verteilung des Wassers innerhalb der Probe eine wesentliche Rolle.

Le motif réside dans le fait que les propriétés électriques des matériaux qui constituent la terre sont très différentes les unes des autres.

C'est pourquoi maintes questions ne peuvent être discutées sérieusement que lorsque la conductibilité du sous-sol est connue. Les explications qui suivent montrent comment on peut exécuter des mesures de ce genre à l'aide de méthodes géoélectriques sur des objets géologiques et à quelles difficultés on se heurte.

2. Résistivité (notion)

Si, du matériel à analyser – peu importe que ce soit au début du métal, de la roche, de l'humus, de l'eau ou de la glace –, nous prélevons un échantillon dont la longueur est l et la section (A) partout la même, la résistance électrique de ce conducteur sera proportionnelle à la longueur et inversement proportionnelle à la section, c'est-à-dire:

$$R \sim \frac{l}{A} \quad (1)$$

La valeur numérique de R dépend du choix de l'unité de résistance, de l'unité de longueur et des propriétés électriques du matériel analysé. Si nous transformons le rapport de proportionnalité (1) à l'aide de la constante de proportionnalité ϱ dans l'équation

$$R = \varrho \frac{l}{A} \quad (2)$$

et si nous mesurons R en ohms, l et A en mètres (m) ou en mètres carrés (m^2), ϱ a la dimension: ohms \times mètres (Ωm). ϱ est la résistance spécifique ou résistivité. En géophysique, c'est-à-dire dans le cas de mesures sur des corps géologiques, ϱ est ordinairement mesuré en Ωm , tandis que, par exemple, le chimiste utilise presque toujours l'unité 100 fois plus petite, Ωcm , pour caractériser des liquides conducteurs. Il arrive que les valeurs de résistivité à l'aide desquelles les chimistes calculent sont pour les mêmes matériaux cent fois plus grandes que celles des géophysiciens.

La valeur réciproque ($1/\varrho = \kappa$) est la conductibilité spécifique ou conductivité.

La valeur numérique de ϱ est, pour un matériel déterminé, égal à la résistance du cube unitaire dans un circuit, dans le cas où deux côtés parallèles sont liés avec un matériel conducteur. La longueur des arêtes du cube unitaire du géophysicien est d'un mètre, celle des arêtes du cube du chimiste d'un centimètre seulement.

ϱ est une constante matérielle, dont la valeur dépend de nombreux facteurs, tels que la température, les déformations, l'intensité et le genre de courant. En outre, dans les conducteurs géologiques, la teneur en eau et le genre de répartition de l'eau à l'intérieur de l'échantillon jouent un rôle primordial.

3. Die Richtungsabhängigkeit des spezifischen Widerstandes

Schneiden wir aus einem kaltgewalzten Kupferblech ein Probewürfchen derart heraus, dass die Kanten parallel und senkrecht zur Walzrichtung verlaufen und benutzen nacheinander die drei möglichen Flächenpaare für einen Leitfähigkeitsversuch, so werden wir feststellen, dass das Material in der Walzrichtung einen etwas anderen spezifischen Widerstand besitzt als senkrecht dazu. Dies ist ein Beispiel für eine richtungsabhängige Leitfähigkeit.

Geologische Leiter sind im allgemeinen keine einheitlichen Körper. Häufig bestehen sie aus einem beinahe nichtleitenden Mineraliengerüst, in das verhältnismässig gut leitendes Bodenwasser eingelagert ist. Bei derartigen Systemen kann die Richtungsabhängigkeit der Leitfähigkeit stark ausgeprägt sein.

Denken wir uns zum Beispiel einen Leiter, der aus lauter feinen, parallel laufenden Röhrcchen aufgebaut ist. Nehmen wir an, die Wände dieser Röhrcchen beständen aus einem idealen Isoliermaterial, die Flüssigkeit, die diese Röhrcchen enthalten soll, sei dagegen ideal leitend. Würde man aus einem derartigen System gemäss *Figur 1* einen Versuchswürfel heraus schneiden, so wäre der spezifische Widerstand in der Richtung der Röhrcchenachsen verschwindend klein, senkrecht dazu aber unendlich gross.

Denken wir uns ferner ein geschichtetes Material aus abwechselnd leitenden und isolierenden Lagen, so wird der spezifische Widerstand senkrecht zur Schichtung einen sehr viel höheren Wert aufweisen als in jeder anderen Richtung.

Ein Material, bei dem der Wert ρ von der Richtung abhängt, nennt man bezüglich des spezifischen Widerstandes anisotrop. Diese elektrische Anisotropie findet man aber nicht nur bei Leitern, die aus mehreren Komponenten bestehen, sondern auch viele Einkristalle sind elektrisch anisotrop.

Da in der angewandten Geophysik gewöhnlich grössere Objekte untersucht werden, die sehr viele Einzelkristalle enthalten, wirkt sich die Anisotropie der Einkristalle nicht mehr aus, falls im polykristallinen Körper die Kristallite willkürlich gelagert sind. Wissen wir, dass ein Objekt aus anisotropen Elementen besteht, so können wir umgekehrt durch Leitfähigkeitsmessungen in verschiedenen Richtungen feststellen, ob die Elemente völlig willkürlich angeordnet sind oder eine gewisse Anisotropie der Leitfähigkeit eine bevorzugte Richtung der Anordnung verrät.

Ist ein Körper gebietsweise geordnet, so lässt sich auch dies durch Untersuchungen an geeignet dimensionierten Probekörpern feststellen.

Wechselnde Verhältnisse bei der Erstarrung des Magmas, Unterschiede bei der Sedimentation sowie tektonische Einflüsse sind die Ursachen dafür, dass der Untergrund oft ganz ungleichmässig aufgebaut ist. Die Mächtigkeit der Schichtfolgen ist derart, dass auch der grösste Probekörper nicht mehr genügen

3. La dépendance de la direction de la résistivité

Si nous découpons dans une plaque de cuivre laminée à froid un petit cube de façon que les arêtes soient parallèles et perpendiculaires à la direction de laminage et si nous utilisons successivement les trois paires de surfaces possibles pour un essai de conductibilité, nous constaterons que le matériel possède dans le sens de laminage une résistivité quelque peu différente de celle du sens vertical. C'est un exemple de conductibilité dépendante de la direction.

Les conducteurs géologiques ne sont généralement pas des corps homogènes. Ils se composent fréquemment d'un support de minéraux pour ainsi dire non conducteur, dans lequel est emmagasinée de l'eau de sol formant un conducteur assez bon. Dans le cas de systèmes de ce genre, la dépendance de la direction de la conductibilité peut être très prononcée. Prenons par exemple un conducteur composé entièrement de fins petits tubes placés parallèlement les uns aux autres. Admettons que les parois de ces petits tubes sont d'un matériel isolant idéal et qu'en revanche le liquide renfermant ces petits tubes est un conducteur idéal.

Si l'on prélevait un cube d'essai de ce système selon *figure 1*, la résistivité serait infiniment petite

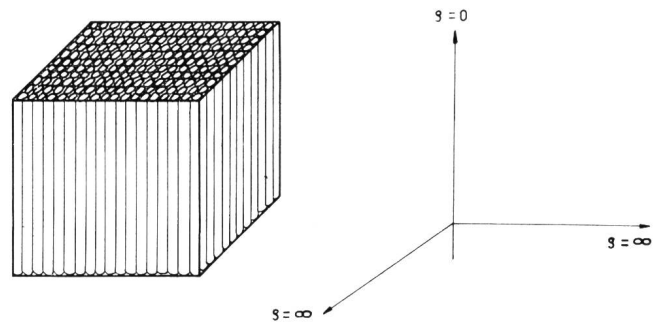


Fig. 1

Denkt man sich einen Körper aus einem Bündel Isolierröhrcchen, die mit einer sehr gut leitenden Flüssigkeit gefüllt sind, so ist der spezifische Widerstand in Richtung der Röhrcchenachsen verschwindend klein, senkrecht dazu dagegen unendlich gross.

Si on se représente un corps constitué d'un faisceau de petits tubes isolants qui sont remplis d'un liquide très bon conducteur, la résistivité tend à disparaître dans le sens des axes, des petits tubes et devient infiniment grande perpendiculairement à ces axes.

dans la direction des axes des petits tubes, mais infiniment grande verticalement.

Si nous prenons un matériel disposé par couches alternativement conductrices et isolantes, la résistivité aura une valeur beaucoup plus élevée verticalement à la disposition par couches que dans toute autre direction.

Un matériel, pour lequel la valeur ρ dépend de la direction, est *anisotrope* par rapport à la résistivité. Cette anisotropie électrique ne se trouve pas uniquement dans des conducteurs comptant plusieurs composantes, mais aussi dans de nombreux monocristaux.

würde, um eine für das Ganze repräsentative Leitfähigkeitsmessung durchzuführen. Zur Anisotropie gesellt sich noch die Inhomogenität.

4. Homogenität und Isotropie geologischer Körper

Ausgangspunkt unserer Betrachtung sei ein parallel geschichteter Untergrund. Nehmen wir zum Beispiel an, dünne Lehmschichten würden mit harten Kalkbänken eine gleichförmige Wechsellagerung bilden. Natürlich ist in diesem Fall der spezifische Widerstand des Kalkes grösser als jener des Lehms. Denken wir uns deshalb einen riesigen Probewürfel herausgeschnitten, so würde eine Messung mit der Stromrichtung parallel zu den Lehmschichten ein kleineres ρ ergeben als senkrecht dazu, weil in diesem Fall die Stromlinien immer wieder die schlecht leitenden Kalklagen durchqueren müssen. Der Riesenwürfel würde also eindeutig anisotrop sein.

Machen wir nun aber nur kleine Probekörper, so werden wir schliesslich Würfel erhalten, die nur aus Kalk und solche die nur aus Lehm bestehen. Jetzt finden wir, dass sich die Proben isotrop verhalten. Ein und derselbe Körper kann sich also, je nach den Versuchsbedingungen, isotrop oder anisotrop verhalten. Ein und derselbe Körper kann aber auch, je nach Probengrösse, homogen oder inhomogen erscheinen.

Ein Sandsteinwürfel wird zum Beispiel richtungsunabhängige Widerstandswerte aufweisen, solange die Proben im Vergleich zu den Einzelkörnern gross sind. Sollten wir uns aber darauf versteifen, die Messungen an dünnen Plättchen durchzuführen, so würden unsere Messwerte stark streuen, je nachdem ob wir beim Versuch mehr oder weniger Bindematerial erfassen. In diesem Fall würde sich das Material als inhomogen erweisen. Bei mikroskopisch kleinen Prüfkörpern würden wir schliesslich feststellen, dass ein Sandstein aus Quarzkörnern, einem Bindemittel und Poren besteht, das heisst aus drei Bestandteilen mit ganz verschiedenen elektrischen Eigenschaften, die zudem zumindest bei den Quarzkörnern richtungsabhängig sind. Trotzdem verhält sich eine grössere Sandsteinprobe wie ein homogener und isotroper Leiter, falls die Elemente rein zufällig angeordnet sind.

Einige Beispiele sollen die verschiedenen Möglichkeiten veranschaulichen:

Ein Stück Glas, ein Klumpen Wachs oder eine klare Flüssigkeit sind Beispiele von Körpern, die sich bis in den submikroskopischen Bereich hinein als homogen und isotrop erweisen. Ein weitgehend aber doch nicht bis in den molekularen Bereich homogener und isotroper Stoff wäre eine kolloidale Lösung, ein Aerosol oder auch eine Emulsion. Homogen und isotrop bezüglich immer grösserer Proben würde sich Lehm, Sand, Kies, Schotter, Moränenmaterial und schliesslich auch noch ein Haufen Bergsturzmaterial erweisen, dessen Einzelblöcke, die Grösse eines Hauses haben können, wenn nur der Probekörper

Etant donné que la géophysique appliquée analyse ordinairement de grands objets qui contiennent de très nombreux cristaux isolés, l'anisotropie des monocristaux n'a plus d'influence lorsque les cristallites sont disposés arbitrairement dans le corps polycristallin. Si nous savons qu'un objet renferme des éléments isolés anisotropes, nous pouvons, en procédant inversement à des mesures de conductibilité dans diverses directions, constater si les éléments sont disposés de façon entièrement arbitraire ou si une certaine anisotropie de la conductibilité décelé une direction préférée de l'arrangement.

Des analyses sur des échantillons dimensionnés de façon appropriée permettent de constater si un corps est disposé en zones.

Des changements de conditions survenant au moment du refroidissement du magma, des différences se produisant lors de la sédimentation ainsi que des influences tectoniques sont les causes de la structure souvent tout à fait inégale du sous-sol. L'épaisseur des couches successives est telle que même l'échantillon le plus grand ne suffirait plus à mesurer une conductibilité assez représentative de l'ensemble. A l'anisotropie se joint encore l'inhomogénéité.

4. Homogénéité et isotropie de corps géologiques

Nos considérations partent d'un sous-sol stratifié parallèlement. Admettons par exemple que de minces couches d'argile alternent avec des couches de chaux dures pour constituer une stratification uniforme. Dans ce cas, la résistivité de la chaux est naturellement plus grande que celle de l'argile. C'est pourquoi si nous prélevions un cube d'essai géant, une mesure avec la direction de courant parallèle aux couches d'argile donnerait ρ plus petit qu'avec la direction de courant verticale à ces couches, vu que, dans ce cas, les lignes de courant doivent toujours traverser les couches de chaux mauvaises conductrices. Le cube géant serait alors nettement anisotrope.

Si nous prenons uniquement de petits échantillons, nous obtiendrons finalement des cubes ne se composant que de chaux ou d'argile. Nous trouvons alors que les échantillons sont isotropes. Un même corps peut ainsi, selon les conditions d'essai, être isotrope ou anisotrope. Mais un même corps peut aussi, suivant la grosseur de l'échantillon, se révéler homogène ou inhomogène.

Un cube de grès aura par exemple des valeurs de résistance indépendantes de la direction, tant que les échantillons seront grands par rapport aux grains isolés. Mais si nous nous obstinons à faire les mesures sur de minces plaquettes, nos valeurs différeront beaucoup, selon que nous ajouterions plus ou moins de liant lors de l'essai. Dans ce cas, le matériel se révélerait inhomogène.

Pour des échantillons microscopiques, nous constaterions finalement qu'un grès se compose de grains de quartz, d'un liant et de pores, c'est-à-dire de trois éléments ayant des propriétés électriques

genügend gross gewählt wird. Homogen und anisotrop bis in den submikroskopischen Bereich sind manche Einkristalle. Homogen und anisotrop bis zur Grössenordnung der Kristallite sind die meisten mechanisch kaltbearbeiteten Metalle, aber auch ein Kalkschiefer oder Gneis. Inhomogen und anisotrop sind geschichtete Mehrkomponentensysteme, wobei aber eine gleichmässige Wechsellagerung genügend grosse Proben homogen erscheinen lässt.

Zur Charakterisierung einer geologischen Formation werden oft mehrere Eigenschaften gleichzeitig benutzt. Ein System in der Färbung deutlich verschiedener Sandsteinlagen mit gleichbleibender Leitfähigkeit würde man hinsichtlich des Aufbaus als inhomogen, bezüglich des spezifischen Widerstandes aber als homogen bezeichnen.

Eine Emulsion, als weiteres Beispiel eines inhomogenen Systems, kann von blossen Auge betrachtet homogen erscheinen, weil die Komponenten derart fein verteilt sind, dass der inhomogene Aufbau erst bei Betrachtung mit einem Mikroskop ersichtlich ist. Bei chemischen Verbindungen und manchen Legierungen muss man sogar bis zur Grössenordnung der Molekülabstände hinuntergehen, bis man den inhomogenen Aufbau bemerkt, und trotzdem ist die Angabe der Komponentenverhältnisse in diesen Fällen eine sehr praktische Art der Charakterisierung.

Eine weitere Komplikation besteht bei geologischen Gebilden darin, dass eine bestimmte Formation, ihre Eigenschaften nicht im ganzen Gebiet ihres Vorkommens beibehält. Zum Beispiel kann eine Nagelfluhbank langsam in eine solche aus reinem Sandstein übergehen, ein massiger Kalk wird mehr und mehr von Mergellagen durchsetzt, ein Sandsteinvorkommen erscheint immer weniger gebunden und wird schliesslich zu unverfestigtem Sand oder was praktisch immer der Fall ist, die der Verwitterung ausgesetzten Schichten haben andere Eigenschaften als die unbeeinflussten, tieferliegenden Schichten. Häufig sind es gerade diese langsamen Wechsel, welche die Interpretation der Messergebnisse stark erschweren. Für den Erfolg einer Untersuchung im Feld ist es deshalb oft entscheidend, ob es gelingt, im Gelände Gebiete mit übersichtlichen Strukturverhältnissen zu finden. Die Beherrschung der Messmethodik sowie gute Apparate bieten deshalb noch keine Gewähr, dass die gewonnenen Resultate auch vernünftig gedeutet werden können.

5. Die Bestimmung des spezifischen Widerstandes ausgedehnter Formationen

Es wurde bereits mehrfach erwähnt, dass der spezifische Widerstand eines Materials an Probestücken ermittelt werden kann. Diese Methode ist bei metallischen Leitern allgemein gebräuchlich. Bei geologischen Körpern ist sie aber häufig nicht anwendbar. Es gibt dafür verschiedene Gründe. Oft ist es praktisch nicht möglich Proben zu entnehmen, ohne dass dabei die Struktur des zu untersuchenden Materials

totalmente différentes qui dépendent en outre de la direction, tout au moins pour les grains de quartz. Malgré cela, un grand échantillon de sable se comporte comme un conducteur homogène et isotrope lorsque les éléments sont disposés absolument au hasard.

Quelques exemples illustrent les différentes possibilités:

Un morceau de verre, une boule de cire ou un liquide limpide sont des exemples de corps qui se révèlent homogènes et isotropes jusque dans le domaine submicroscopique. Une solution colloïdale, un aérosol ou aussi une émulsion seraient des substances largement homogènes et isotropes, cependant pas jusque dans le domaine moléculaire. Pour des échantillons toujours plus grands, l'argile, le sable, le gravier, le gravier concassé, les matériaux de moraines et finalement aussi un tas de matériel d'éboulement, dont les blocs isolés peuvent avoir la grandeur d'une maison, se révéleraient homogènes et isotropes lorsque seul l'échantillon est choisi assez grand. Homogènes et anisotropes jusque dans le domaine submicroscopique sont de nombreux monocristaux. La plupart des métaux travaillés mécaniquement à froid, mais aussi l'ardoise ou des gneiss sont homogènes et anisotropes jusqu'à la grandeur des cristallites. Inhomogènes et anisotropes sont les systèmes à plusieurs composantes stratifiées, une stratification uniforme faisant toutefois paraître homogènes des échantillons assez grands.

Pour caractériser une formation géologique, on utilise souvent plusieurs propriétés simultanément. On désignerait par inhomogène en ce qui concerne la structure mais par homogène quant à la résistivité un système de coloration de couches de sables nettement différentes à conductibilité constante. Autre exemple de système inhomogène, une émulsion considérée à l'œil nu peut paraître homogène, les composantes étant si finement réparties que la structure inhomogène ne se révèle qu'à l'observation à l'aide d'un microscope. Dans les combinaisons chimiques et dans de nombreux alliages, on doit même pousser jusqu'à l'ordre de grandeur des espaces entre les molécules pour remarquer la structure inhomogène et, malgré cela, l'indication des rapports entre les composantes est dans ces cas un mode de caractérisation très pratique. Le problème des phénomènes géologiques se complique encore par le fait qu'une formation déterminée ne conserve pas ses caractéristiques dans toute la zone de sa présence. Par exemple un banc de poudingue calcaire peut se transformer lentement en un banc de sable pur, des calcaires compacts seront de plus en plus envahis par des couches de marne, un banc de grès paraît toujours moins compact et se transforme finalement en sable sans consistance ou, ce qui est pratiquement toujours le cas, les couches exposées aux intempéries ont d'autres propriétés que les couches profondes ne subissant pas d'influences. Il arrive fréquemment que ces lentes transformations rendent très difficile l'interprétation des résultats des mesures. C'est pourquoi,

unzulässig verändert wird. Wie soll man zum Beispiel einen Zylinder oder Würfel aus einem lockeren Sandboden herauspräparieren, ohne dass dabei der Sand gepresst wird oder die Probe zerfällt? Eine andere Schwierigkeit besteht darin, dass bei manchen Materialien der Wassergehalt oder die Art der Verteilung der Feuchtigkeit bei der Probenahme verändert wird. Auch der Gehalt an im Porenwasser gelösten Gasen kann rasch ändern und damit auch die Leitfähigkeit des Elektrolyten. Bei Stoffen mit sehr geringem elektrischem Leitvermögen besteht ferner noch die Gefahr, dass die Messresultate durch verhältnismässig gut leitende Schichten an der Oberfläche der Probekörper verfälscht werden. Der weitestwichtigste Grund, weshalb die Methode mit den Probekörpern bei geologischen Gebilden fast regelmässig versagt, ist aber der Umstand, dass gewöhnlich keine genügend grosse Proben hergestellt werden können. Entweder sind die Komponenten, aus denen die Masse zusammengesetzt ist schon extrem «grobkörnig» – man denke etwa an eine Moräne oder einen Bergsturz – oder dann verlangen die vorhandenen Spalten und Klüfte unrealisierbare Dimensionen für eine wirkliche Durchschnittsprobe. Messungen an Probekörpern liefern deshalb Ergebnisse, die nur mit grossen Vorbehalten auf ausgedehnte Formationen übertragen werden dürfen. In vielen Fällen sind sie sogar völlig unbrauchbar.

Trotzdem wird zum Beispiel immer wieder versucht bei inhomogenen Körpern aus den Eigenschaften der einzelnen Komponenten, die sich verhältnismässig leicht bestimmen lassen, etwas über die Leitfähigkeit des Ganzen auszusagen. Das bekannteste Beispiel in dieser Richtung sind wohl die verschiedenen Formeln für die Berechnung des spezifischen Widerstandes eines unter dem Grundwasserspiegel liegenden Lockermaterials. Aber selbst in diesem Fall bildet ausser der Leitfähigkeit des Wassers und der Grösse der Porosität die Art der Hohlräume eine Unbekannte, die derartige Berechnungen sehr unsicher macht.

Wenn immer möglich, wird man deshalb versuchen, den spezifischen Widerstand eines geologischen Körpers gleich an Ort und Stelle zu bestimmen. Dies ist aber wiederum nur unter gewissen Voraussetzungen möglich, die in der Praxis leider auch nicht immer erfüllt sind.

6. Der homogene, isotrope Halbraum

Die günstigsten Voraussetzungen liegen dann vor, wenn das zu untersuchende Material elektrisch isotrop und homogen ist, einen ganzen Halbraum erfüllt und dessen Grenzfläche zudem zugänglich ist. In die Sprache der Praxis umgesetzt, bedeutet dies, dass das zu untersuchende Material in einer grossen – theoretisch unbegrenzten – Ebene zu Tage tritt, und der Untergrund bis in sehr grosse Tiefen – theoretisch unendlich tief – aus diesem Material besteht. Die elektrischen Eigenschaften sollen zudem richtungs- und ortsunabhängig, das heisst homogen und isotrop sein. Der ganze Raum würde dann aus der nicht-

pour mener une analyse en campagne au succès, il est souvent important de réussir à trouver dans le terrain des endroits présentant des conditions de structure claires. Le fait de posséder la méthodologie des mesures et d'avoir de bons appareils n'est pas encore la garantie que les résultats acquis peuvent être interprétés logiquement.

5. Détermination de la résistivité de vastes formations

Il a déjà été mentionné à maintes reprises que la résistivité d'un matériel pouvait être déterminée sur des échantillons. Cette méthode est généralement utilisée pour les conducteurs métalliques. Mais elle est rarement applicable pour les corps géologiques. Différents motifs en sont la cause. Il n'est souvent pratiquement pas possible de prélever des échantillons sans modifier de façon inadmissible la structure du matériel à analyser. Comment doit-on, par exemple, prélever un cylindre ou un cube d'un sol sablonneux meuble sans que le sable soit comprimé ou que l'échantillon se désagrège? Une autre difficulté réside dans le fait que, pour de nombreux matériaux, la teneur en eau ou le genre de répartition de l'humidité sont modifiés lors du prélèvement de l'échantillon. La teneur en gaz dissous dans l'eau des pores peut aussi rapidement changer et de ce fait aussi la conductibilité de l'électrolyte. Les substances ayant une conductibilité électrique très faible présentent, en outre, encore le danger que des couches assez bonnes conductrices à la surface des échantillons faussent les résultats des mesures. Mais le motif de loin le plus important, pour lequel la méthode consistant à prélever des échantillons dans les formations géologiques échoue presque régulièrement, est le fait qu'il est généralement impossible de réaliser des échantillons assez grands. Ou bien les composants qui constituent la masse sont déjà à «grains extrêmement gros» – il suffit de penser à une moraine ou à un éboulement – ou alors les fissures et les crevasses exigent des dimensions irréalisables pour un échantillon moyen correct. C'est pourquoi les mesures sur des échantillons donnent des résultats qui ne peuvent être appliqués à de vastes formations qu'avec une grande réserve. Dans de nombreux cas, ils sont même absolument inutilisables.

Malgré cela, on essaie par exemple toujours, pour les corps inhomogènes, d'émettre un avis sur la conductibilité de l'ensemble en partant des propriétés des différents composants, qui se déterminent assez aisément. Les différentes formules utilisées pour calculer la résistivité d'un matériel mouvant situé sous la nappe souterraine sont bien l'exemple le plus connu dans ce sens. Mais, même dans ce cas, la nature des cavités constitue, à part la conductibilité de l'eau et la grandeur de la porosité, une inconnue qui rend les calculs de ce genre très incertains.

C'est pourquoi on essaiera si possible de déterminer la résistivité d'un corps géologique directement

leitenden Atmosphäre und dem zu untersuchenden Material bestehen, wobei die Trennfläche eben und zugänglich sein soll. Dass diese Voraussetzungen in jedem praktischen Fall nur annähernd erfüllt sein können, versteht sich von selbst.

Auch ist die Atmosphäre streng genommen kein absoluter Isolator, weil die Gase durch die kosmische Strahlung und andere Einflüsse stets schwach ionisiert sind. Trotzdem kann die Luft in unserem Fall als vollkommen nichtleitend angesehen werden, da selbst Eis und Schnee noch sehr viel besser leitend sind als die Gasphase. Befindet sich in der Grenzfläche zwischen dem leitenden Halbraum und dem nichtleitenden Luftraum eine punktförmige Stromquelle, so werden die elektrischen Ladungen gleichmässig nach allen Richtungen in den Untergrund abfliessen (Fig. 2).

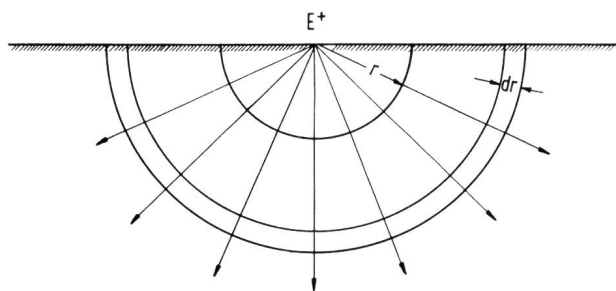


Fig. 2

Stromlinien und Äquipotentialflächen bei einem in der Oberfläche des leitenden Halbraumes gelegenen Quellpunkt (E^+).

Lignes de courant et surfaces équipotentiellles d'une source punctiforme (E^+) sise à la surface du semi-espace conducteur.

Der Potentialabfall zwischen zwei Halbkugelflächen, deren Radien um einen kleinen Betrag (dr) verschieden sind, beträgt nach Formel (2) und dem Ohmschen Gesetz:

$$dV = \rho \cdot I \cdot \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (3)$$

Das Potential einer Halbkugelfläche mit dem Radius r beträgt deshalb gegenüber einem im Unendlichen liegenden Vergleichspunkt, der definitionsgemäss das Potential Null aufweisen soll:

$$V_r = \rho \frac{I}{2\pi r} \quad (4)$$

wobei I die Grösse des gesamten in den Untergrund fliessenden Stromes ist.

In der Praxis lässt sich eine einzige Stromquelle nicht realisieren, da der elektrische Strom stets nur in einem geschlossenen Stromkreis stationär fliessen kann. Dazu ist zu bemerken, dass zur Messung der spezifischen Widerstände vor allem Gleichströme und allenfalls niederfrequente Wechselströme benutzt werden, um unangenehme Phasenverschiebungen zu vermeiden, die bei den grossen Dimensionen geologischer Strukturen rasch entstehen. Ist im leitenden

sur place. Mais cela n'est à nouveau possible que sous certaines conditions qui ne sont malheureusement pas toujours satisfaites en pratique.

6. Semi-espace homogène isotrope

Les conditions les plus favorables se présentent lorsque le matériel à analyser est électriquement isotrope et, en outre, homogène et remplit un semi-espace entier, dont la surface limite est de plus accessible. Dans le langage courant, cela signifie que le matériel à étudier affleure dans une grande plaine – théoriquement illimitée – et que le sous-sol se compose de ce matériel jusqu'à de très grandes profondeurs – théoriquement infinies –. De plus, les propriétés électriques doivent être indépendantes de la direction et du lieu, c'est-à-dire être homogènes et isotropes. L'espace entier comprendrait alors l'atmosphère non conductrice et le matériel à analyser, la surface de séparation devant être plane et accessible. Il est évident que ces conditions ne peuvent être satisfaites qu'approximativement dans chaque cas pratique.

L'atmosphère même n'est, strictement parlant, pas un isolant absolu, étant donné que les gaz sont sans arrêt faiblement ionisés par des rayons cosmiques et d'autres influences. Malgré cela, l'air peut, dans notre cas, être considéré comme un non-conducteur intégral, car même la glace et la neige sont des conducteurs bien meilleurs que la phase gazeuse. Si une source de courant punctiforme se trouve dans la surface limite entre le semi-espace conducteur et l'espace aérien non conducteur, les charges électriques s'écouleront uniformément dans toutes les directions du sous-sol (Fig. 2).

La chute de potentiel entre deux surfaces hémisphériques, dont les rayons diffèrent d'une faible valeur (dr), s'élève selon la formule (2) et la loi d'Ohm à:

$$dV = \rho \cdot I \cdot \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (3)$$

C'est pourquoi, par rapport à un point de comparaison situé à l'infini qui doit avoir par définition le potentiel zéro, le potentiel d'une surface hémisphérique de rayon r s'élève à:

$$V_r = \rho \frac{I}{2\pi r} \quad (4)$$

où I est la grandeur de tout le courant s'écoulant dans le sous-sol.

En pratique, une source de courant unique ne peut pas se réaliser, le courant électrique ne s'écoulant de façon stationnaire que dans un circuit fermé. Il y a lieu de remarquer que, pour mesurer les résistivités, on utilise surtout des courants continus et, le cas échéant, des courants alternatifs à basse fréquence pour éviter des déphasages désagréables qui se produisent rapidement dans les grandes dimensions de structures géologiques.

Halbraum der Abstand eines Punktes von der Eintrittsstelle des Stromes r_1 und von der Austrittsstelle r_2 entfernt (Fig. 3), so ist das Potential (V_P):

$$V_P = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (5)$$

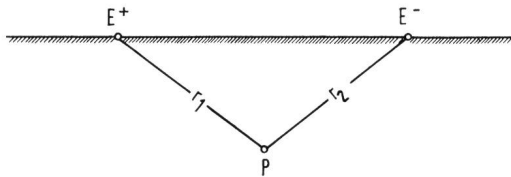


Fig. 3

E^+ und E^- sind zwei Quellpunkte entgegengesetzt gleicher Ergiebigkeit in der Oberfläche des leitenden Halbraumes. Das Potential eines Punktes ist dann, ausser von der Quellstärke und dem spezifischen Widerstand, nur noch von den beiden Abständen zu den Quellpunkten abhängig (vergleiche Formel 5).

E^+ et E^- sont deux sources punctiformes de même rendement mais de signe contraire à la surface du semi-espace conducteur. Le potentiel d'un point ne dépend, à part l'intensité de la source et la résistivité, que des deux distances aux sources punctiformes (voir formule 5).

Wir sehen, dass das Potential eines Beobachtungspunktes in einfacher Weise mit der Grösse des spezifischen Widerstandes verknüpft ist und eine Strommessung (I) nebst einer Potentialmessung (V_P) grundsätzlich zur Bestimmung des spezifischen Widerstandes (ρ) genügen, falls die Geometrie der Elektrodenanordnung bekannt ist.

7. Die Elektrodenanordnung nach Wenner

Bei der *Wennerschen* Elektrodenkonfiguration [1] werden vier Elektroden benutzt, die in einer Geraden mit gleich grossen Zwischenräumen aufgestellt werden (Fig. 4).

Bezeichnet man den Grundabstand mit a , so erhält man nach (5) für den spezifischen Widerstand den Ausdruck:

$$\rho = 2\pi a \frac{U}{I} \quad (6)$$

Die Spannung U , die zwischen den Potentialsonden auftritt, ist demnach umso grösser, je grösser der Strom ist, der durch den Untergrund fliesst, je näher die Elektroden beieinanderstehen, das heisst je kleiner a und je grösser der spezifische Widerstand des Untergrundes ist.

Die Tatsache, dass die Spannung U mit zunehmendem Grundabstand a linear kleiner wird, hat zur Folge, dass bei grossen Profillängen die Spannung an den Potentialsonden schliesslich nicht mehr mit genügender Genauigkeit gemessen werden kann. Sinkt diese nämlich unter einige Millivolt, so erlauben die meist vorhandenen Streuströme und die Schwankungen der Übergangspotentiale bei den Elektroden keine genügend genauen Messungen mehr.

Si, dans un semi-espace conducteur, un point est à une distance r_1 de l'entrée du courant et à une distance r_2 de la sortie (Fig. 3), le potentiel (V_P) est:

$$V_P = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (5)$$

Nous voyons que le potentiel d'un point d'observation est lié d'une façon simple à la grandeur de la résistivité et que, en plus d'une mesure du potentiel (V_P), une mesure du courant suffira pour déterminer la résistivité (ρ) lorsque la géométrie de la disposition des électrodes est connue.

7. Disposition des électrodes selon Wenner

Dans la configuration des électrodes selon Wenner [1], on utilise quatre électrodes qui sont placées sur une droite à des intervalles égaux (Fig. 4).

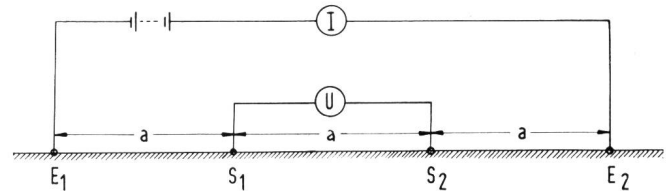


Fig. 4

Prinzip der Bestimmung des spezifischen Widerstandes nach der Methode von Wenner.

Principe de la détermination de la résistivité selon la méthode de Wenner.

Si l'on désigne la distance fondamentale par a , on obtient selon (5) pour la résistivité l'expression:

$$\rho = 2\pi a \frac{U}{I} \quad (6)$$

Par conséquent, la tension U qui apparaît entre les sondes de potentiel est d'autant plus grande que le courant qui s'écoule à travers le sous-sol est plus grand et que les électrodes sont plus rapprochées les unes des autres, c'est-à-dire que a est plus petit et que la résistivité du sous-sol est plus grande.

Le fait que la tension U diminue linéairement au fur et à mesure que la distance fondamentale a augmente a pour conséquence que, sur de grandes longueurs profilées, la tension aux sondes de potentiel ne peut plus être mesurée avec une exactitude suffisante. Si cette dernière tombe au-dessous de quelques millivolts, les courants de dispersion généralement existants et les variations des potentiels de passage aux électrodes ne permettent plus d'exécuter des mesures assez précises.

Sur le Plateau suisse, la résistivité du sous-sol est d'environ $100 \Omega\text{m}$. Un courant I de $0,1 \text{ A}$ d'intensité peut généralement être atteint sans difficultés. Si les électrodes extérieures qui amènent le courant au sol sont distantes les unes des autres d'un kilomètre, la

Im schweizerischen Mittelland beträgt der spezifische Widerstand des Untergrundes etwa 100 Ωm . Ein Strom I von 0,1 A Stärke lässt sich meistens mit geringem Aufwand erreichen. Sind dann die äusseren Elektroden, die den Strom dem Boden zuführen, einen Kilometer voneinander entfernt, so beträgt die Spannung an den innern Sonden 1,6 mV. Gelingt es dagegen auf einem Gletscher, dessen Eismassen einen spezifischen Widerstand von 10 Millionen Ωm aufweisen, bei der gleichen Elektrodenanordnung auch nur ein mA Strom einzuspeisen, so tritt über den Potentialsonden eine Potentialdifferenz von 1,6 V auf. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Spannungsquelle im ersten Fall verhältnismässig niederohmig, im zweiten dagegen sehr hochohmig ist.

Entfernt man eine Stromelektrode sehr weit von den übrigen Elektroden (Fig. 5), so kann der Einfluss dieser Stromquelle auf die Potentialverhältnisse vernachlässigt werden und wir erhalten nach (5):

$$\varrho_{(E_1 \rightarrow \infty)} = 4\pi a \frac{U}{I} \quad (7)$$

Bei gleichem Grundabstand ist in diesem Fall die Spannung U nur halb so gross wie bei der normalen Anordnung. Der Wert dieser Elektrodenanordnung liegt darin, dass nur noch drei Elektroden verstellt werden müssen, wenn von einem zu einem benachbarten Messpunkt übergangen werden soll.

Nehmen wir auch noch eine Potentialsonde weit weg, wobei diese natürlich nicht in die Nähe der bereits entfernten Stromelektrode gestellt werden darf, so nimmt diese das Potential Null an und die Spannung U steigt wieder auf den ursprünglichen Wert. Obwohl jetzt bei einem Positionswechsel nur noch zwei Elektroden verschoben werden müssen, wird diese Anordnung nur selten benützt. In den Gebieten mit stärkeren vagabundierenden Strömen, ist es vor allem die Grösse der Störspannungen, welche die Methode unbrauchbar macht. Zur Sondierung kleiner Flächen ist sie dagegen gut geeignet. Der spezifische Widerstand beträgt:

$$\varrho_{(E_1, S_1 \rightarrow \infty)} = 2\pi a \frac{U}{I} \quad (8)$$

8. Die Elektrodenanordnung nach Schlumberger

Die Elektrodenanordnung nach *Schlumberger* [2] ist in der Praxis sehr beliebt, weil bei dieser Konfiguration die Potentialsonden immer nahe nebeneinander stehen. Gewöhnlich richtet man den Messplatz in der Nähe der Profilmittelpunkte ein, so dass die Potentialsonden nötigenfalls rasch erreichbar sind (Fig. 6). Nach Gleichung (5) erhält man für die Elektrodenanordnung nach Schlumberger den Ausdruck:

$$\varrho = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U}{I} \cdot \left(\frac{l^2 - b^2}{b} \right) \quad (9)$$

Ist b viel kleiner als l , so lässt sich der Ausdruck (9) in guter Näherung vereinfachen:

tension aux sondes intérieures est de 1,6 mV. Si, en revanche, sur un glacier dont les masses de glace accusent une résistivité de 10 millions de Ωm , on ne réussit à injecter qu'un courant d'un mA pour la même disposition des électrodes, une différence de potentiel de 1,6 V apparaît à travers les sondes de potentiel. A ce propos, il faut en effet tenir compte de ce que la source de tension est dans le premier cas à assez faible résistance ohmique, en revanche dans le second cas à très forte résistance ohmique.

Si on éloigne beaucoup une électrode de courant des autres électrodes (Fig. 5), on peut négliger l'in-

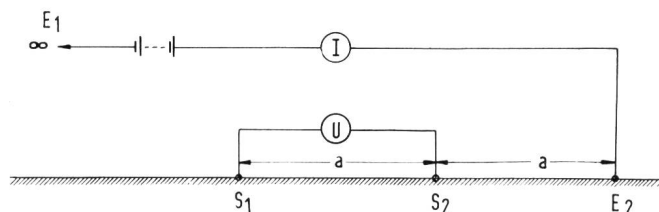


Fig. 5

Anordnung der Elektroden nach Wenner mit einer weit entfernten Stromelektrode

Disposition des électrodes selon Wenner avec une électrode de courant très éloignée.

fluence de cette source de courant sur les conditions de potentiel et on obtient selon (5):

$$\varrho_{(E_1 \rightarrow \infty)} = 4\pi a \frac{U}{I} \quad (7)$$

Lorsque la distance fondamentale est égale, la tension U n'est dans ce cas que la moitié de celle de la disposition normale. La valeur de cette disposition d'électrodes réside dans le fait que seules trois électrodes doivent encore être déplacées s'il faut passer d'un point de mesure au voisin.

Si nous éloignons encore une sonde de potentiel, celle-ci ne pouvant naturellement pas être placée à proximité de l'électrode de courant déjà éloignée, cette dernière acquiert le potentiel zéro et la tension U remonte à la valeur initiale. Bien que pour un changement de configuration il ne faille déplacer que deux électrodes, cette disposition n'est que rarement utilisée. Dans les régions à forts courants vagabonds, la grandeur des tensions perturbatrices rend la méthode inutilisable. En revanche, elle convient bien pour sonder de petites surfaces. La résistivité est:

$$\varrho_{(E_1, S_1 \rightarrow \infty)} = 2\pi a \frac{U}{I} \quad (8)$$

8. Disposition des électrodes selon Schlumberger

La disposition des électrodes selon *Schlumberger* [2] est en pratique très appréciée, étant donné que cette configuration permet d'avoir les sondes de potentiel toujours les unes à côté des autres. On installe normalement la position de mesure au voisinage du milieu

$$\rho \cong \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U}{I} \cdot \frac{l^2}{b} \quad (10)$$

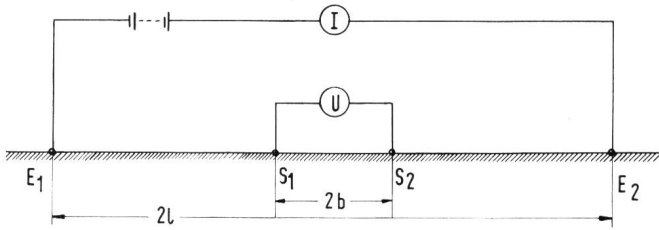


Fig. 6

Prinzip der Bestimmung des spezifischen Widerstandes nach der Methode von Schlumberger.

Principe de la détermination de la résistivité selon la méthode de Schlumberger.

Würde man eine Wennersche Anordnung ($b=l/3$) nach der Formel (10) auswerten, so würde der Wert des spezifischen Widerstandes um einen Achtel zu hoch ausfallen. Ist b zehnmal kleiner als l , so beträgt der Fehler bei Benützung der Näherung (10) nur noch 1%.

Es wurde schon im vorhergehenden Abschnitt darauf hingewiesen, dass die Profillängen, die mit genügender Genauigkeit ausgemessen werden können, begrenzt sind. Die Potentialdifferenzen, die sich unter dem Einfluss des in den Untergrund geleiteten Stromes zwischen den Potentialsonden ausbilden, werden nämlich immer kleiner, je grösser man die Abstände wählt. Bei der Methode nach Schlumberger nimmt die zu messende Spannung quadratisch ab, während bei der Wenner-Anordnung die Abschwächung linear ist.

Günstig wirkt sich dagegen in vielen Fällen, abgesehen von der Arbeitersparnis beim Umstellen der Messanordnung, der Umstand aus, dass man in einem Gebiet mit horizontalen Inhomogenitäten leichter eine Stelle findet, wo wenigstens die Potentialsonden innerhalb eines homogenen Bezirks zu liegen kommen.

Auch bei der Schlumberger-Methode ist es möglich, eine der Stromelektroden ins Unendliche zu verlegen. Diese Massnahme lässt wiederum bei sonst gleichen Bedingungen die Spannung über den Potentialsonden auf die Hälfte sinken. Der spezifische Widerstand berechnet sich dann nach der Formel:

$$\rho_{(E_1 \rightarrow \infty)} = \pi \cdot \frac{U}{I} \left(\frac{l^2 - b^2}{b} \right) \quad (11)$$

Da bei der Elektrodenanordnung nach Schlumberger die zu messenden Spannungen stets kleiner sind als bei der Wennerschen Methode, könnte man annehmen, dass die mit der Entfernung der einen Elektrode verbundene Herabsetzung der Spannungsempfindlichkeit dieses Verfahren zum vorneherein in den meisten Fällen ausschliesse. Es ist aber dabei folgendes zu berücksichtigen: Die Forderung, dass

du profil de sorte que les sondes de potentiel sont, si nécessaire, rapidement accessibles (Fig. 6).

D'après l'équation (5), on obtient pour la disposition des électrodes selon Schlumberger l'expression:

$$\rho = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U}{I} \cdot \left(\frac{l^2 - b^2}{b} \right) \quad (9)$$

Si b est beaucoup plus petit que l , l'expression (9) se simplifie en bonne approximation:

$$\rho \cong \frac{\pi}{2} \cdot \frac{U}{I} \cdot \frac{l^2}{b} \quad (10)$$

Si on appréciait une disposition de Wenner ($b=l/3$) selon la formule (10), la valeur de la résistivité serait trop élevée d'un huitième. Si b est dix fois plus petit que l , l'erreur n'est plus que de 1% lors de l'utilisation de l'approximation (10).

Le paragraphe précédent fait déjà remarquer que les longueurs profilées qui peuvent être mesurées avec une exactitude suffisante sont limitées. Les différences de potentiel qui se forment entre les sondes de potentiel sous l'influence du courant conduit dans le sous-sol deviennent de plus en plus petites lorsqu'on choisit les distances plus grandes. Dans la méthode de Schlumberger, la tension à mesurer diminue au carré, tandis que dans la disposition de Wenner l'affaiblissement est linéaire. En revanche, le fait qu'on trouve dans une région à inhomogénéités horizontales plus facilement un endroit où les sondes de potentiel tout au moins sont situées à l'intérieur d'une zone homogène a une influence favorable dans de nombreux cas, indépendamment de l'économie de travail réalisée lors du déplacement du dispositif de mesure.

La méthode de Schlumberger permet aussi de déplacer une des électrodes de courant à l'infini. Cette disposition réduit à nouveau, dans des conditions par ailleurs identiques, de moitié la tension à travers les sondes de potentiel. La résistivité se calcule d'après la formule:

$$\rho_{(E_1 \rightarrow \infty)} = \pi \cdot \frac{U}{I} \left(\frac{l^2 - b^2}{b} \right) \quad (11)$$

Etant donné que, dans la disposition des électrodes selon Schlumberger, les tensions à mesurer sont constamment plus petites que dans la méthode de Wenner, on pourrait admettre que ce procédé est exclu d'emblée dans la plupart des cas par la diminution de la sensibilité à la tension liée à l'éloignement d'une électrode. A ce propos, il faut considérer que, lorsqu'une source punctiforme doit être déplacée à l'infini, cela implique en pratique qu'on éloigne une électrode de courant environ dix fois plus loin des sondes de potentiel que celle qui provoque la chute de potentiel dans la région des sondes de potentiel. Dans nombre de cas, on trouvera dans le voisinage éloigné de la place de mesure dans le terrain un endroit où, sans difficultés, la résistance de passage entre le conducteur de terre

der eine Quellpunkt ins Unendliche versetzt werden soll, bedeutet in der Praxis, dass man die eine Stromelektrode etwa zehnmal weiter von den Potentialsonden entfernt als jene, durch welche der Potentialabfall im Gebiete der Potentialsonden erzeugt wird. In manchen Fällen wird man in der weitem Umgebung des Messplatzes im Gelände eine Stelle finden, wo mit geringem Aufwand der Übergangswiderstand zwischen dem metallischen Erder und dem Untergrund klein gemacht werden kann. Sehr gut geeignet sind hierzu Tümpel, Flüsse und Bäche oder auch sumpfige Niederungen. Da der Strom, der dem Untergrund zugeführt wird, kaum je durch den inneren Widerstand der benutzten Stromquelle, sondern praktisch stets durch den Widerstand des äusseren Stromkreises gegeben ist, wobei die Übergangswiderstände der Elektroden meistens den Hauptanteil ausmachen, kann oftmals durch eine geschickte Wahl des Standortes der weit entfernten Elektrode, der Widerstand des Stromkreises durch den Untergrund stark herabgesetzt werden. Nicht selten lässt sich der Stromfluss praktisch verdoppeln, wodurch die Einbusse bei der Spannungsempfindlichkeit durch die Erhöhung des Stromes ausgeglichen wird.

Was die Übergangswiderstände betrifft, so ist darauf hinzuweisen, dass diese weder bei den stromführenden Elektroden, noch bei den Potentialsonden bekannt sein müssen, da sie in keinem Fall in die Berechnung der spezifischen Widerstände eingehen. Dies ist von grösster praktischer Bedeutung, weil Übergangswiderstände nur schlecht gemessen und kaum konstant gehalten werden können. Könnte man die Übergangswiderstände leicht bestimmen, so würde es an sich genügen, zwei Elektroden in den Boden zu stecken, eine Spannung anzulegen und den Strom zu messen, dessen Grösse dann ein Mass für die Leitfähigkeit des Untergrundes liefern würde. Derartige «Zweielektrodenverfahren» sind aber wegen der Inkonzanz der Übergangswiderstände verpönt. Wir wollen auch nicht auf Messverfahren eintreten, bei denen die Übergangswiderstände vernachlässigbar klein, oder mit Zusatzwiderständen die Kreise symmetrisch gemacht werden müssen.

9. Die Eindringtiefe

Von einer Punktquelle in der Oberfläche eines homogenen und isotropen Halbraumes fliesst der Strom gleichmässig in den Untergrund ab und die Stromdichte ist nur vom Abstand des beobachteten Punktes von der Stromquelle abhängig. Die Stromdichte nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab, entsprechend der Zunahme der vom Strom durchflossenen Fläche, und die Stromrichtung ist in jedem Punkt durch die Verbindungslinie zur Quelle gegeben. Leitet man den Strom nicht erst im Unendlichen ab, sondern in einem gewissen Abstand durch eine zweite Punktquelle mit entgegengesetzt gleicher Ergiebigkeit, so wird die Stromverteilung komplizierter. Das Potential irgend eines Punktes innerhalb des leitenden

metallique et le sous-sol pourra être rendue petite. Les étangs, les rivières et les ruisseaux ou aussi les bas-fonds marécageux conviennent très bien à cet effet. Vu que le courant qui est amené au sous-sol est rarement fourni par la résistance intérieure de la source de courant utilisée mais pratiquement toujours par la résistance du circuit extérieur, les résistances de passage des électrodes faisant généralement la partie principale, on peut souvent, en choisissant judicieusement l'emplacement de l'électrode très éloignée, diminuer fortement la résistance du circuit par le sous-sol. Il arrive fréquemment que le courant soit pratiquement doublé, la perte due à la sensibilité à la tension étant compensée par l'augmentation du courant.

Quant aux résistances de passage, il faut rappeler qu'elles ne doivent être connues ni pour les électrodes chargées ni pour les sondes de potentiel, car elles n'entrent en aucun cas dans le calcul des résistivités. Cela est de la plus haute importance pratique, les résistances de passage ne pouvant être mesurées que difficilement et pour ainsi dire pas maintenues constantes. Si on pouvait facilement déterminer les résistances de passage, il suffirait en somme de planter deux électrodes dans le sol, d'appliquer une tension et de mesurer le courant, dont la grandeur donnerait une mesure de la conductibilité du sous-sol. Pareilles «méthodes à deux électrodes» sont peu prisées par suite de l'inconstance des résistances de passage. Nous ne voulons pas non plus parler des méthodes de mesure dans lesquelles les résistances de passage doivent être rendues négligeables ou les circuits rendus symétriques par des résistances complémentaires.

9. Profondeur de pénétration

Le courant s'écoule régulièrement dans le sous-sol d'une source punctiforme à la surface d'un semi-espace homogène et isotrope, et la densité de courant ne dépend que de la distance du point observé de la source de courant. La densité de courant diminue au carré de l'éloignement conformément à l'augmentation de la surface parcourue par le courant et la direction du courant est donnée dans chaque cas par la ligne de jonction à la source. Si on ne dérive pas simplement le courant à l'infini, mais à une certaine distance par une seconde source punctiforme de rendement égal mais de sens opposé, la répartition du courant devient plus compliquée. Le potentiel d'un point quelconque à l'intérieur du semi-espace conducteur est égal à la somme algébrique des influences de potentiel des deux sources punctiformes. Il s'ensuit que le plan qui passe par les deux sources punctiformes et est perpendiculaire à la surface du semi-espace partage le champ du potentiel en deux parties symétriques. Est également symétrique le plan qui passe par le milieu de la ligne de jonction des sources punctiformes et qui est traversé perpendiculairement par cette dernière. En outre, les surfaces qui contiennent tous les points avec le même potentiel, dites

Halbraumes ist dann gleich der algebraischen Summe der Potentialeinflüsse beider Quellpunkte. Damit ist ohne weiteres ersichtlich, dass die Ebene, die durch die beiden Quellpunkte geht und senkrecht auf der Oberfläche des Halbraumes steht, das Potentialfeld in zwei symmetrische Hälften teilt. Ebenfalls eine Symmetrieebene ist jene Ebene, die durch die Mitte der Verbindungslinie der Quellpunkte geht und von dieser senkrecht durchstossen wird. Ferner müssen die Flächen, die alle Punkte mit gleichem Potential enthalten, die sogenannten Äquipotentialflächen, Rotationsflächen sein mit der Verbindungslinie der beiden Quellpunkte als Achse. Ohne eine genauere Analyse des Stromlinienverlaufs durchzuführen, wollen wir festhalten, dass in der Umgebung der Quellpunkte die Stromdichte besonders gross ist, und ganz allgemein die Stromdichte mit zunehmendem Abstand von den Quellpunkten sinkt (*Fig. 7*).

Als praktische Faustregel kann man sich merken, dass Schichten, die tiefer liegen als es der Distanz des halben Elektrodenabstandes entspricht, die Stromverteilung nur noch geringfügig beeinflussen. Im homogenen und isotropen Halbraum fliesst nämlich in der oberflächennahen Schicht mit der Mächtigkeit des halben Elektrodenabstandes etwa 70% des gesamten Stromes. Auch Störobjekte in der Grenzfläche, zum Beispiel ein Fluss oder eine Eisenbahnschiene sind ohne grossen Einfluss, falls der minimale Abstand zur Verbindungslinie der Quellpunkte mindestens die Hälfte des Abstandes dieser Quellpunkte beträgt.

Bei derartigen Abschätzungen muss man berücksichtigen, dass eine Messung des spezifischen Widerstandes einer geologischen Struktur auch unter günstigen Voraussetzungen nur auf etwa 10% genau gemacht werden kann. Nur in seltenen Fällen ist der Untergrund derart einheitlich aufgebaut, dass genauere Ergebnisse erhalten werden. Eine Genauigkeit von 10% ist aber meistens durchaus genügend, besonders, wenn man bedenkt, dass der spezifische Widerstand der Böden und Gesteine von wenigen Ωm bis über 10000 Ωm schwankt, und, falls man Meerwasser und alpines Eis als weitere extreme Medien in Betracht zieht, die Grenzen bei ungefähr einem Ωm und rund 100 Millionen Ωm liegen.

10. Eine kleine Zwischenbilanz

Ob all den theoretischen Betrachtungen könnte man die eigentliche Aufgabe, nämlich praktische Leitfähigkeitsmessungen im Feld durchzuführen, leicht vergessen. Wir wollen deshalb die bisherigen Ausführungen auf ihren praktischen Wert hin prüfen.

Zunächst haben wir gesehen, dass der natürliche Untergrund einen elektrischen Leiter besonderer Art darstellt. Besonders dürfen wir das Problem der Anisotropie nicht aus dem Auge verlieren. Bis anhin sind wir dieser Schwierigkeit einfach dadurch aus dem Wege gegangen, dass wir vorausgesetzt haben, die zu

surfaces équipotentiellen, doivent être des surfaces de rotation avec la ligne de jonction des deux sources punctiformes comme axe. Sans effectuer une analyse plus précise de la courbe des lignes de courant, nous constatons qu'au voisinage des sources punctiformes la densité du courant est particulièrement grande et qu'en général elle diminue au fur et à mesure que la distance aux sources punctiformes augmente (*Fig. 7*).

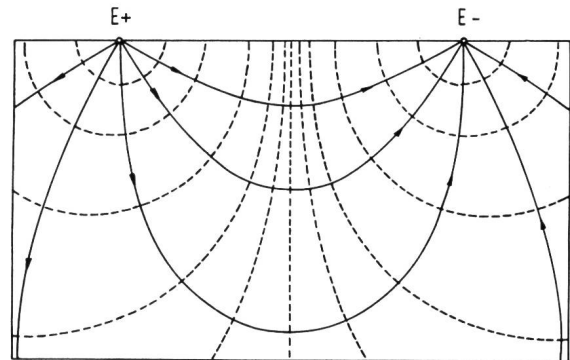


Fig. 7

Stromlinien und Äquipotentialflächen im Falle von zwei entgegengesetzt gleich starken Quellen an der Oberfläche.

Lignes de courant et surfaces équipotentiellen dans le cas de deux sources de même puissance mais de signe contraire à la surface d'un semi-espace conducteur.

On peut retenir comme règle empirique pratique que des couches, situées plus bas que la moitié de la distance des électrodes, n'influencent plus que faiblement la répartition du courant. Dans le semi-espace homogène et isotrope, 70% environ de tout le courant s'écoule en effet dans la couche proche de la surface avec la puissance de la moitié de la distance des électrodes. Les objets perturbateurs dans la surface limite, par exemple un cours d'eau ou une ligne de chemin de fer, n'ont pas non plus une grande influence lorsque la distance minimum à la ligne de jonction des sources punctiformes est au moins la moitié de la distance de ces sources punctiformes.

En faisant des estimations de ce genre, on doit tenir compte du fait que la résistivité d'une structure géologique ne peut, même dans des conditions favorables, être mesurée qu'avec une exactitude d'environ 10%. Dans des cas tout à fait rares, le sous-sol est si homogène qu'il est possible d'avoir des résultats plus précis. Mais une exactitude de 10% est en général absolument suffisante, surtout si l'on songe que la résistivité des sols et des masses de roches varie entre quelques Ωm et plus de 10000 Ωm et que, au cas où on prend en considération l'eau de mer et la glace alpine comme milieux extrêmes, les limites sont à environ un Ωm et 100 millions de Ωm .

10. Bilan provisoire

En se perdant dans toutes ces considérations théoriques, on pourrait facilement oublier la tâche essentielle qui est d'exécuter des mesures de conductibilité pratiques dans le terrain. C'est pourquoi nous

messenden Böden würden sich elektrisch isotrop verhalten. Wir werden später nochmals auf diese Frage zurückkommen, es sei aber bereits jetzt erwähnt, dass praktisch alle Widerstandsmessungen unter der Annahme durchgeführt werden, das untersuchte Material sei elektrisch isotrop.

Neben der Anisotropie war die häufig inhomogene Beschaffenheit der Böden eine weitere Eigenschaft, durch welche die Bestimmung des spezifischen Widerstandes erschwert wird. Wir haben gesehen, dass man die Inhomogenität eines aus verschiedenen Komponenten aufgebauten Materials ausschalten kann, indem man grosse Massen in die Untersuchung einbezieht. Betrachtet man etwa einen Würfel aus Moränenmaterial von 100 m Kantenlänge, so ist es belanglos wie die gröberen Gesteinsbrocken, die kopfgrossen Stücke und die kleineren Kiesel in der feineren Sandmasse verteilt sind. Ein derartiger Würfel ist als Ganzes gesehen wieder homogen und seine Eigenschaften sind von einem gleichgrossen, benachbarten nicht verschieden.

Wir haben gesehen, dass ein solcher Würfel, und auch ein viel kleinerer, nicht ungestört aus einem natürlichen Vorkommen herausgelöst werden kann. Sinnvolle Leitfähigkeitsmessungen können deshalb in vielen Fällen nur an Ort und Stelle vorgenommen werden. Dass derartige Messungen mit Hilfe einer geeigneten Elektrodenkonfiguration durchgeführt werden können, wurde in den vorausgehenden Abschnitten ausführlich erläutert. Eine Strom- und eine Spannungsmessung genügen, um bei bekannter Elektrodenanordnung den spezifischen Widerstand zu bestimmen, vorausgesetzt, und dies ist eine ganz wesentliche Einschränkung, dass der Untergrund einen elektrisch homogenen und isotropen Halbraum darstellt. Dies ist aber in der Praxis nur selten der Fall. Meistens ist das Material, dessen spezifischer Widerstand gemessen werden soll, mindestens oberflächlich verwittert. Damit ist aber auch die Leitfähigkeit der obersten Schicht eine andere als jene des unveränderten Untergrundes. Am besten wären die verlangten Voraussetzungen noch bei einem frischen Steinbruch oder in einer im Abbau befindlichen Grube erfüllt. Die bis anhin beschriebenen Methoden erlauben also nur eine zuverlässige Bestimmung des spezifischen Widerstandes, wenn unverändertes Material irgendwo an der Erdoberfläche zugänglich ist. Derartige Messmöglichkeiten am Anstehenden wird man immer mit Freude benutzen, sie sind aber selten. Viel häufiger sind jene Fälle, in denen eine oft viele Meter dicke Verwitterungsschicht, mächtige Ablagerungen von Bergsturzmaterial oder Gehängelehme die Schichten verdecken, deren spezifischer Widerstand gemessen werden soll. Oder wie soll man vorgehen, wenn in einem Sedimentbecken der Grundwasserspiegel einige Meter tief liegt und oberflächlich nur ausgetrocknetes Material zugänglich ist? Wie, wenn eine Schicht gutgedüngter Ackererde über felsigem Untergrund oder in einem Kiefernwald ein meterdickes Polster von halbverrotteten Nadeln auf

allons examiner la valeur pratique des explications données jusqu'ici.

Nous avons d'abord vu que le sous-sol représente un conducteur électrique d'un genre spécial. Nous ne devons en particulier pas perdre de vue le problème de l'anisotropie. Jusqu'à présent, nous avons simplement tourné la difficulté en supposant que les sols à mesurer devraient être électriquement isotropes. Nous reviendrons par la suite à nouveau sur cette question, mais nous devons déjà dire que nous effectuons pratiquement toutes les mesures de résistance en admettant que le matériel analysé est électriquement isotrope.

Outre l'anisotropie, l'inhomogénéité des sols est fréquemment une caractéristique qui rend difficile la détermination de la résistivité. Nous avons vu qu'on peut éliminer l'inhomogénéité qui résulte d'un matériel constitué de différents composants en incluant de grandes masses dans l'analyse. Si on considère un cube de matériaux de moraine, dont les arêtes ont 100 m de long, il importe peu de savoir comment les grossiers fragments de roches, les grands morceaux et les plus petits cailloux sont répartis dans la masse de sable plus fin. En tant que tout, un cube de ce genre est à nouveau homogène et ses caractéristiques ne diffèrent pas d'un cube voisin de même grandeur.

Nous avons vu qu'un cube de ce genre, et même un cube beaucoup plus petit, ne peut pas être détaché sans inconvénient de son habitat naturel. C'est pourquoi, dans de nombreux cas, des mesures de conductibilité valables ne peuvent être faites que sur place. Les paragraphes précédents ont expliqué en détail que ces mesures peuvent être réalisées à l'aide d'une configuration d'électrodes appropriée. Une mesure du courant et de la tension suffira pour déterminer la résistivité dans un dispositif d'électrodes connu, sous réserve que, et cela est une restriction très importante, le sous-sol représente un semi-espace électriquement homogène et isotrope. Mais cela est rarement le cas en pratique. Le matériel dont la résistivité doit être mesurée est généralement désagrégé, tout au moins à la surface. La conductibilité de la couche supérieure est donc autre que celle du sous-sol non modifié. Les conditions exigées seraient le mieux remplies dans une carrière nouvelle ou dans une mine en exploitation. Les méthodes décrites jusqu'ici ne permettent de déterminer de façon convenable la résistivité que si du matériel non modifié est accessible quelque part à la surface de la terre. On utilisera toujours avec plaisir ces possibilités de mesure sur le vif, mais elles sont rares. Beaucoup plus fréquents sont les cas où une couche de désagrégation souvent de plusieurs mètres d'épaisseur, d'imposants dépôts de matériel d'éboulement ou des argiles suspendues recouvrent les couches dont la résistivité doit être mesurée. Comment doit-on procéder lorsque, dans un bassin de sédiments, le niveau de la nappe souterraine est à quelques mètres plus bas et que seul du matériel desséché est accessible à la surface? Comment doit-on faire si une couche de terre arable bien

dem eigentlichen Boden liegt? Kurz und gut, wenn es nicht möglich wäre, Leitfähigkeitsmessungen über einem geschichteten Untergrund so auszuführen, dass die Eigenschaften einer jeden einzelnen Schicht bestimmt werden können, müsste man in manchen Gebieten zum vorneherein auf Widerstandsbestimmungen verzichten. Glücklicherweise ist es aber in vielen Fällen möglich, auch über einem geschichteten Untergrund erfolgreich Messungen durchzuführen, wovon in den nächsten Kapiteln die Rede sein soll.

(Fortsetzung folgt)

fumée recouvre un sous-sol rocheux ou si, dans une forêt de pins, un épais tapis d'aiguilles à demi pourries se trouve sur le sol proprement dit? En bref, s'il n'était pas possible d'exécuter des mesures de conductibilité dans un sous-sol stratifié de manière à pouvoir déterminer les propriétés de chaque couche, on devrait renoncer d'avance à déterminer la résistance dans de nombreuses régions. Mais il est heureusement possible dans beaucoup de cas de réaliser avec succès des mesures dans un sous-sol stratifié. Ce problème fera l'objet des chapitres suivants.

(A suivre)

Bibliographie

[1] Wenner F.: A method of measuring earth resistivity US Bureau Stand. Bull. 12, 1916, Nr. 4, p. 469...478.

[2] Schlumberger C.: Etude de la prospection électrique du sous-sol. Gauthier-Villars, Paris 1920.

Verschiedenes – Divers – Notizie varie

23. Schweizerische Tagung für elektrische Nachrichtentechnik:

621.382–181.4

Miniaturisierung von Elementen und Schaltungen

Mit einer Rekordbeteiligung von mehr als 550 Zuhörern fand am 8. September 1964 im Zürcher Kongresshaus die vom Schweizerischen Elektrotechnischen Verein (SEV) und der Pro Telephon gemeinsam veranstaltete 23. Schweizerische Tagung für elektrische Nachrichtentechnik statt. Das ausserordentlich starke Interesse der Teilnehmer aus Industrie und Verwaltung ist wohl auf die Aktualität des gewählten Themas, das der Miniaturisierung von Elementen und Schaltungen galt, zurückzuführen. Damit wurde für einmal weniger der Fernmeldetechniker angesprochen als vielmehr der Elektroniker ganz allgemein sowie all jene im besonderen, die mit digitalen Steuerungen, elektronischen Überwachungseinrichtungen und Rechenautomaten zu tun haben.

Nach der Eröffnung der Tagung durch den Präsidenten der Pro Telephon, Direktor W. Werdenberg (Cortailod), konnte dieser unter den Anwesenden zahlreiche Gäste, darunter Vertreter der Hochschulen und Techniken, des Militärs und der PTT-Betriebe, u. a. den Direktor der Fernmeldedienste, Dipl.-Ing. A. Langenberger, begrüßen.

Als erster Vortragender sprach, an Stelle des ursprünglich vorgesehenen, in Amerika weilenden Prof. Dr. Speiser, stellvertretend Dr. Ing. G. Kohn (Forschungslaboratorium der International Business Machines IBM, Rüschlikon ZH) zum Thema.

Grundlagen der Miniaturisierung in der Digitaltechnik

Obwohl die elektronischen Rechenanlagen erst etwa 20 Jahre alt sind, haben sie sich in unserem modernen Leben einen festen Platz gesichert. Zu ihrer ursprünglichen Aufgabe, dem Wissenschaftler Berechnungen zu ermöglichen, die ihres Umfangs wegen der menschliche Rechner nicht bewältigen kann, ist bald die noch viel grössere Aufgabe getreten, die riesige Zahl der in der Wirtschaft anfallenden Daten zu verarbeiten und dem Menschen Routinearbeit abzunehmen. Es kann mit Sicherheit angenommen werden, dass die stürmische Entwicklung der Datenverarbeitung weitergehen wird. Elektronische Rechenanlagen werden helfen, industrielle Prozesse zu kontrollieren, die Sicherheit im Luftverkehr zu erhöhen, die Wetterbeobachtung und -voraussage zu verfeinern, um nur einige Möglichkeiten zu erwähnen.

Die Entwicklungsgeschichte digitaler Rechenanlagen lässt sich in Generationen einteilen. In der ersten wurden Elektronenröhren zur Verknüpfung von Informationen eingesetzt. Grundsätzliche Nachteile, wie die grosse Hitzeentwicklung und vor allem die verhältnismässig geringe Zuverlässigkeit, begrenzten die Einsatzmöglichkeit röhrenbestückter Anlagen. Erst der zweiten Generation gelang der Durchbruch zur heutigen Bedeutung. Festkörperschaltungen mit Transistoren, Dioden und Magnetkernen ergaben eine Zuverlässigkeit, Geschwindigkeit und Handlichkeit, wie sie den heutigen marktgängigen Anlagen eigen ist.

Die militärische Entwicklung der Elektronik der letzten Jahre hat den Anstoss zum Bau sehr kleiner Digitalrechner gegeben; sie werden für Flugzeuge, Raketen und Satelliten benötigt. Dazu versucht man heute die Komponenten, aus denen solche Anlagen zusammengesetzt sind, zu miniaturisieren und in Bausteine zu integrieren, die sich als Einheit herstellen lassen. Da man erwarten darf, dass diese Miniaturschaltungen nicht nur kleiner, sondern auch schneller als die bisherigen Schaltungen gemacht werden können, und man zudem annehmen kann, mit ihrer Hilfe in handlichen Anlagen noch wesentlich umfangreichere Probleme zu bearbeiten, greift die Anwendung der Miniaturtechnik weit über den militärischen Bereich hinaus auch auf zivile Gebiete über.

Die dritte Generation der Digitalrechner wird mit grosser Wahrscheinlichkeit von miniaturisierten Schaltelementen, die zu Baugruppen integriert sind, Gebrauch machen. Der Bedeutung dieses aussichtsreichen Gebietes der Elektronik entsprechend, befasste sich der Referent in seinem Vortrag sehr eingehend mit den Grundlagen der Miniaturisierung in der Digitaltechnik. Er erläuterte einmal die grundsätzlichen Fragen nach der grösstmöglichen Packungsdichte der Bauelemente. Heute ist man in der Lage, zwischen 0,2...1 Elemente bis zu 10^3 Elemente je cm^3 (bei der Minuteman-Rakete) zu packen. Der praktischen Technologie wird es jedoch nur gelingen, etwa 10^1 ... 10^2 Elemente auf einem Kubikzentimeter zu konzentrieren. Beschränkungen ergeben sich u.a. aus der Wärmeentwicklung, die eine Folge von Signalpegel und Spannung darstellt. Die Frage nach der höchstmöglichen Geschwindigkeit miniaturisierter Schaltungen hängt einmal von