

Einführung in die Widerstandsmessung,
eine geophysikalische Methode zur Aufnahme
von archäologischen Befunden unter der Erdoberfläche.

Von

Irwin Scollar.

Hierzu Tafel 47.

Teil I. Praktische Methoden. Darstellung der Meßergebnisse.*

E i n f ü h r u n g.

In der Archäologie macht sich schon lange der Mangel an einer Methode fühlbar, die es ermöglicht, unterirdische Befunde vor ihrer Ausgrabung festzustellen, einer Methode, die gleichzeitig wirtschaftlich ist und nichts zerstört. Die Geologen und Bergbauingenieure sehen sich demselben Problem gegenüber. Ihren Erfordernissen entsprechend wurden zahlreiche geophysikalische Erkundungstechniken ausgearbeitet. Die steigende Beachtung, die den Naturwissenschaften entgegengebracht wird, hat die Archäologie in den letzten Jahren auf diese Methoden aufmerksam gemacht. Einige sind bereits praktisch erprobt worden. Zwei solche Techniken, von denen die eine darauf basiert, daß der charakteristische Widerstand des Erdbodens beim Durchgang eines elektrischen Stromes gemessen wird, die andere, daß Schwankungen des Magnetfeldes an der Erdoberfläche gemessen werden, haben sich bewährt.

Der vorliegende Aufsatz behandelt die erste Technik.

Wenn durch einen elektrischen Leiter ein Strom fließt, bildet sich ein elektrisches Feld aus, dessen Form sich mathematisch exakt formulieren läßt. Falls der Leiter unvermischt homogen ist, dann ist die *G e s t a l t* des Feldes unabhängig von dem charakteristischen Widerstand des Leiters gegen den Durchgang des elektrischen Stromes. Sollte jedoch ein Abschnitt des Leiters einen höheren oder geringeren Widerstand aufweisen, so wird durch diese Störung das Feld geweitet oder verengt; Aufschluß über diese Störung im Feld kann man also erhalten, indem man beobachtet, wie leicht oder schwer

* Teil II erscheint später. Er bringt die Ergebnisse von Experimenten, die zur Grenzbestimmung der Methode an Modellen gemacht wurden.

sich ein Feld in dem gelösten Leiter erzeugen läßt. So können wir bis zu einem gewissen Grad die Messungen des charakteristischen Widerstandes eines Leiters dazu gebrauchen, um Uneinheitlichkeiten in diesem Leiter festzustellen. Die Erde ist bis zu einem bestimmten Ausmaß ein elektrischer Leiter. Die Geophysik hat schon lange entdeckt, daß man Uneinheitlichkeiten geologischer Art durch Messen des Erdwiderstandes feststellen kann¹⁾.

Die Erdoberfläche ist ein besonderer Leiter wegen ihrer feinen Struktur, die große Mengen Wasser enthält. Dieses Wasser löst Minerale, die durch Elektrolyse zerlegt werden und als Träger der Elektrizität fungieren. Je mehr Wasser oder je mehr lösliche Minerale vorhanden sind, desto besser ist die Leitung und desto geringer ist der charakteristische Widerstand.

Widerstandsmessung in der Archäologie.

Ein archäologisches Denkmal, das völlig der Oberflächensicht entzogen ist, kann ebenso als Uneinheitlichkeit des Bodens gedacht werden, vorausgesetzt, daß es aus einem Material besteht, das von dem charakteristischen Widerstand der umliegenden Erde hinreichend abweicht. Der Nutzen der Widerstandsmessung zur Feststellung und Kartierung unterirdischer archäologischer Befunde wurde zuerst von Atkinson entdeckt. Er benutzte Geräte, die für flache geophysikalische Prospektion konstruiert waren²⁾. Im Verfolg seiner Pionierarbeit hat eine Anzahl von Interessierten aus verschiedenen Ländern Atkinsons Methode mit unterschiedlichem Erfolg angewandt³⁾. Im Jahr 1959 entschloß sich das Rheinische Landesmuseum in Bonn, die Brauchbarkeit dieser Technik zu erforschen, und der Verfasser wurde mit dieser Aufgabe betraut. Wir entschieden uns, zuerst die theoretischen Grundlagen dieser Techniken zu vertiefen. Diese und eine Zusammenstellung der praktischen Details sind im vorliegenden Aufsatz wiedergegeben. Der erste Teil handelt von den praktischen Methoden mit einigen illustrativen Beispielen. Der Anhang behandelt einige Details der Auswertung von Resultaten.

Geräte für die Widerstandsmessung.

Die Ausrüstung für die Widerstandsmessung ist etwas komplizierter als das Gerät, das zum Ausmessen des Widerstandes eines Drahtes benötigt wird. Das kommt daher, daß die Erde nicht ein Draht mit zwei Enden ist, an die man

1) Eine vollständige Bibliographie über die Anwendung der Widerstandsmessung für geologische Probleme bringen: C. A. Heiland, *Geophysical Exploration* (New York 1946). – L. Cagniard, *La Prospection Géophysique* (Paris 1950). – P. Lasfargues, *Prospektion Electrique par courants continus* (Paris 1957). – V. Fritsch, *Elektrische Messungen an räumlich ausgedehnten Leitern* (Karlsruhe 1960).

2) R. J. C. Atkinson, *Field Archaeology* (2nd ed., London 1952).

3) Die zahlreichen Veröffentlichungen von C. M. Lerici und seiner Mitarbeiter mit vollständiger Bibliographie in seinem *Archaeological Prospecting* (Milano 1959). – S. Diceglie, M. Mosetti, *Applicazione dei metodi geoelettrici alle esplorazioni archeologiche*. *Bollettine di Geodesia e Scienze Affini; Rivista dell' Istituto Geografico Militare* 16, 1957, 367 ff. – G. Th. Schwarz, *Geoelektrische Bodenuntersuchungen als Hilfsmittel der Archäologie*. *Jahrb. d. Schweiz. Ges. f. Urgesch.* 47, 1958/1959, 96 ff. – F. Hampel u. V. Fritsch, *Geoelektrische Messungen in ihrer Anwendung für die Archäologie*. *Technische Beiträge zur Archäologie* 1 (Mainz 1959). – Hiermit ist die Aufzählung keineswegs erschöpft.

leicht einen Meßapparat anschließen kann. Bei den meisten Methoden muß man Metallelektroden in den Boden einführen. Zwischen der Elektrode und dem Erdboden ist ein gewisser Widerstand, der von dem ungleichen Kontakt zwischen Boden und Metall herrührt. Dieser sogenannte Kontaktwiderstand muß bei den Messungen ausgeschaltet werden. Das kann geschehen, indem man vier Elektroden benutzt, sowie eine besondere Meß-Stromkreisanlage⁴⁾. In Westdeutschland stellen zwei Firmen (Siemens und Gossen) geeignete Meßgeräte her. Die notwendigen Kabel, Schalter usw. muß sich jedoch der Benutzer selbst anfertigen. Das Gerät, das das Rheinische Landesmuseum verwendet, zeigt *Tafel 47*.

Der Meßleiter sitzt an einem kleinen Tisch (oder in einem Auto). Links vor ihm steht der Widerstandsmeßapparat (von P. Gossen & Co., Erlangen, Bayern). In der Mitte ist ein Schalter, dessen Funktion später erklärt wird; rechts steht eine Batteriedose für ein Telefon zwischen dem Meßleiter und dem Gehilfen, der die Elektroden einschlägt (im Hintergrund). Ein langes Kabel, das zweckdienlicherweise auf eine Kabeltrommel aufgerollt wird, sieht man links auf der Erde⁵⁾. Die Meßwerte werden auf Millimeterpapier nach einer geeigneten Skala aufgetragen, die vom Abstand der Meßpunkte abhängt. Auf dem Erdboden werden Quadrate von je 25 m Seitenlänge nach der gewöhnlichen Aufnahmetechnik ausgelegt, mit einem optischen Quadrat oder Doppelpentagon, das man an die Katastersteine anhängt. Zwei mit Draht verstärkte Stoff-Meßbänder – Metallmeßbänder sollte man nicht verwenden – werden auf entgegengesetzten Seiten des Quadrats parallel zueinander angelegt, so daß die Zahlenmarkierungen in derselben Richtung laufen. Ein drittes Meßband wird zwischen den beiden ausgelegt. Indem man die Enden des dritten Meßbandes bei einer bestimmten Meterzahl auf den beiden parallelen Meßbändern ansetzt, kann man nun die Messungen in Zwischenräumen vornehmen, die das ganze Quadrat erfassen und die direkt an der richtigen Stelle auf dem Millimeterpapier aufgetragen werden. Wenn nur ein einziges Widerstandsprofil, anstatt einer Flächenaufnahme, gebraucht wird, genügt ein einziges Meßband.

Für die Messungen sind vier Elektroden nötig. Es gibt viele Möglichkeiten zur Anordnung dieser Elektroden, aber für unsere Zwecke hat sich herausgestellt, daß die sogenannte Wenner-Anordnung, bei der die vier Elektroden in gleichem Abstand in einer Reihe stehen, die einfachste ist⁶⁾. Diese Elektroden werden an den Meßpunkten längs des Meßbandes in den Boden gestoßen. Wenn nur vier Elektroden benutzt werden, muß man sie alle zugleich längs des Meßbandes vorrücken, um die nächste Messung durchzuführen. Um Zeit zu sparen, konstruierte Atkinson ein einfaches Schaltsystem mit fünf Elektroden,

4) Detaillierte Beschreibung der Arbeitsweise des Instrumentes im Anhang.

5) Von P. Eisemann u. Co. (einer Tochtergesellschaft von Robert Bosch GmbH).

6) Die Wenner-Anordnung wird auch von Atkinson, Lericci, Diceglie und Mosetti gebraucht. Schwarz wendet eine asymmetrische Anordnung an, mit zwei Elektroden zum Suchen und zwei anderen, die in großer Entfernung im rechten Winkel zu den Suchelettroden stehen. Er verwendet einen Verstärker, der bei den Suchelettroden eingebaut ist. Er gibt an, es sei deshalb nicht nötig, die Suchelettroden in den Boden einzuführen. Ferner ist er der Meinung, daß die asymmetrische Anordnung tiefer dringt, weil das elektrische Feld ein größeres Geländestück erfaßt. Darüber in Teil II dieses Aufsatzes.

das wir unserer Ausrüstung angepaßt haben. Der Arbeitsgang ist folgender: Angenommen, wir haben die Elektroden bei der 0, 1, 2, 3 und 4 m-Markierung des Meßbandes angeordnet. Mit dem Schalter in Stellung 1 wird der Widerstand unter Benutzung der 0, 1, 2 und 3 m Elektroden gemessen. Dann wird die Elektrode bei 0 zum Fünfmeterpunkt versetzt, und der Schalter wird in die zweite Stellung gebracht, so daß der Widerstand unter Benutzung der Elektroden bei 1, 2, 3 und 4 m abgelesen werden kann. So ist der Ablesepunkt um 1 m vorgerückt, aber nur eine Elektrode anstelle von allen vieren mußte versetzt werden. Die Zeit, die man zum Versetzen der Elektroden braucht, ist, wie die Praxis zeigt, der bestimmende Faktor für das Tempo der Meßarbeiten, so daß sich jede Zeitersparnis dabei auf eine Beschleunigung der Gesamtmessung auswirkt. Mit der gezeigten Schaltanordnung können zwei Personen an einem Tag 1200 Punkte einmessen, einschließlich der Zeit, die benötigt wird für das Aufstellen der Geräte, der Ausführung der notwendigen Aufnahme und der Abschlußtätigkeiten am Ende eines normalen Arbeitstages.

Wenn trotz großer Elektrodenabstände eine etwas größere Dichte der horizontalen Meßpunkte erwünscht ist, kann man natürlich immer das ganze Elektrodensystem bewegen, nämlich vier Elektroden auf einmal in beliebig kleinen Abständen. Das erfordert sehr viel mehr Zeit als die Schaltmethode und lohnt den Aufwand nur in den seltensten Fällen.

Abbildung 1 zeigt in schematischer Darstellung einen Schaltplan des Schaltgerätes. Der Widerstandsmesser ist in unserem Fall der Gossen-Geohm-Erdungsmesser. Man drückt auf einen Knopf, dreht eine Skala so, daß der Zeiger auf Null steht und liest dann den Widerstandswert von der Skala ab. Nach geringer Übung ist das eine Sache von wenigen Sekunden. Der eingestellte Wert bleibt bis zum nächsten Ablesen auf der Skala stehen, eine schätzenswerte Einrichtung, die Irrtümer bei der Aufzeichnung verhindert. Der Meßapparat ist durch ein kurzes Vierdrahtkabel mit passenden Kupplungen an eine kleine Dose angeschlossen, die einen 4 Pol-5 Stufen-Schalter enthält, wie der Schaltplan zeigt. Dieser Schalter erlaubt, alle nötigen Kombinationen von vier Elektroden bei fünf Schaltmöglichkeiten auszusuchen. Der Schalter ist durch ein langes Fünfadernkabel mit einem Verteilerkopf verbunden, an dem fünf einzelne Kabel für die fünf Elektroden befestigt sind. Um die Elektroden aus der Entfernung gut unterscheiden zu können, sind sie um die Mitte herum mit farbigem Lack angestrichen. Die oberen und unteren Enden sind natürlich blank, denn die Farbe würde als Isolation wirken. Es wurde ein Farbsystem gewählt, das gute Sichtbarkeit und geringe Verwechslungsmöglichkeiten gewährleistet. Die Elektroden sind lang genug (1 m), daß man sie aus dem Stehen in den Boden stoßen oder mit einem Gummihammer einschlagen kann, falls der Boden zu hart ist. Material für die Herstellung des Zubehörs bekommt man bei fast allen Großhändlern für Radio- und Elektrozubehör. Die Elektroden, die aus härtester Duraluminiumlegierung bestehen, kann man aus dem Vorrat, den das Inventar der meisten Großmetallhändler bietet, beschaffen. Rostfreie Stahlelektroden wären wünschenswerter, obgleich sie schwerer und beträchtlich teurer sind. Bei Benutzung in steinigem Boden muß man die Elektroden öfters anscharfen. Deshalb ist es ratsam, mehrere Fünfersätze von

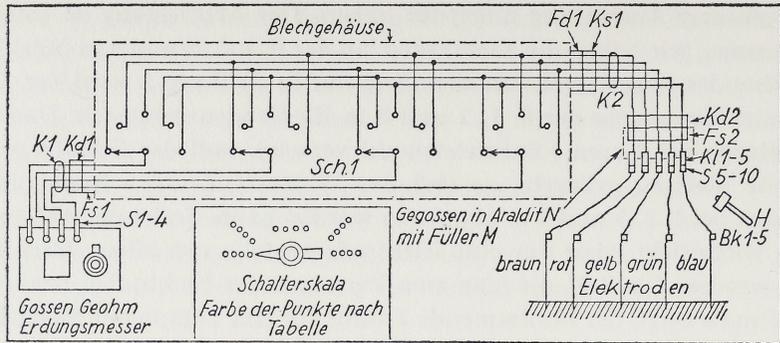


Abb. 1. Schematischer Schaltplan des Elektrodenwahlschalters.

Blech Gehäuse $8 \times 8,5 \times 16$ cm.

Schalter – 4 pol, 5 stellen

Knopf – Zeiger

S 1–10 – Kabelschuhe

K 1 – vierpolige Kabel NLH 4 0,75

Kd 1 – fünfpolige Kabel-Dose.

Fs 1 – fünfpoliger Flansch-Stecker

Fd 1 – fünfpolige Flansch-Dose

Ks 1 – fünfpoliger Kabel-Stecker

K 2 – fünfpoliges Kabel, NLH 5 0,75 bis 100 Meter lang.

Kd 2 – fünfpolige Kabel-Dose

Fs 2 – fünfpoliger Flansch-Stecker

Kl 1–5 – Apparate Klemmen

H – No. 2 oder No. 3 Gummihammer

Bk 1–5 – 25 Ampère Batterie Klemmen

Gießharz- Araldit N, mit Füller M (Ciba A. G., Wehr/Baden).

verschiedenfarbigen Elektroden zur Hand zu haben. Rostfreie Stahlelektroden brauchen weniger oft geschärft zu werden. Krokodilklemmen, Stecker und kleines Handwerkszeug sollte man ebenfalls mitnehmen, wenn die Aufnahme in größerer Entfernung von einer geeigneten Werkstatt durchgeführt wird, denn die Geräte werden gewöhnlich von den ungeübten Meßgehilfen sehr grob behandelt. Ein guter Batterienvorrat für den Meßapparat ist zu empfehlen, und es ist ratsam, jeden Morgen mit einer frischen Batterie anzufangen.

Die mechanische und elektrische Anordnung, die wir zeigen, ist nicht obligatorisch. Andere Anordnungen, die unseren entsprechen, können ebenso praktisch sein. Ein einfaches System mit nur vier Kabeln und ohne Schalter ist für diejenigen, die nur eine sehr beschränkte Zahl von Messungen vorzunehmen haben, ebenfalls brauchbar. In diesem Fall werden die Endpole des Meßapparates durch ein Kabel ohne Schalter direkt mit den Elektroden verbunden.

Durchführung einer Widerstandsaufnahme.

Die Grundidee der Widerstandsermittlung beruht darauf, daß man die Abweichungen des Widerstandes bei vermutlich einheitlichem Boden mißt. Daher muß man sich vor Beginn jeder Aufnahme eine Vorstellung von dem jeweiligen Boden verschaffen. Diese gewinnt man am besten mit Hilfe einer Bodensonde. Der Verfasser wandte einen Sondentyp an, der speziell für das

Centre des Cartes des Sols, Gent, Belgien, angefertigt wurde. Sie hat eine Maximaltiefe von 125 cm und kann auch in steinigem Boden von einem einzelnen Mann bedient werden. Wichtig ist die Feststellung, wie einheitlich der Boden ist, ob z. B. eine zweite Schicht, die in ihrer Dicke oder Höhe schwankt, in Oberflächennähe kommt, und ob sie von sehr abweichendem Charakter ist.

Nachdem man ein Bodenprofil erhalten hat, am besten aus einem ungestörten Bereich, der von dem vermuteten Denkmal abliegt, braucht man als nächstes das gleiche Profil im Sinne des Bodenwiderstandes. Das ist mit dem Vierelektrodensystem der Wenner-Anordnung leicht zu finden. Die größte Tiefe, in die der zwischen den beiden äußeren Elektroden fließende elektrische Strom eindringt, ist dem Abstand zwischen zwei angrenzenden Elektroden grob vergleichbar. Deshalb verändert man die Eindringungstiefe des elektrischen Stromes, wenn man den Elektrodenabstand ändert. Der Meßapparat zeigt den scheinbaren Widerstand des Vierelektrodensystems auf. Dieser muß natürlich für die Elektrodenabstände korrigiert werden. Elektrodenabstände kleiner als 50 cm sollte man nicht anwenden, weil die oberste Schicht gewöhnlich weitaus zu unregelmäßig ist, um sinnvolle Messungen zu erlauben.

Der gemessene Punkt liegt im Zentrum des Elektrodensystems. Bei 1 m Abstand z. B. sind die vier gemessenen Elektroden längs einer Linie von 3 m Länge aufgestellt, und das Zentrum des Systems ist 1,5 m von jedem Ende entfernt. Daran muß man denken, wenn man die Resultate notiert. Wenn man ein 25 m Bandmaß und 1 m Elektrodenabstand benutzt, liegt der erste gemessene Punkt nicht beim Nullpunkt des Bandmaßes, sondern bei 1,5 m und der letzte bei 23,5 m. Um ein senkrecht Widerstandsprofil zu erhalten, das man Sondage nennt, werden die Elektrodenabstände stufenweise erhöht. Das Zentrum des Systems bleibt aber an der gleichen Stelle. Eine typische Meßreihe in vollkommen einheitlichem (homogenem) Boden würde dann folgendermaßen aussehen:

Elektrodenabstand	Abgelesene Widerstandswerte
50 cm	100 Ohm
1 m	50 Ohm
2 m	25 Ohm
4 m	12,5 Ohm

Man beachte, daß bei einem vollkommen einheitlichen Boden die Widerstandswerte, die man auf dem Apparat abliest, proportional mit der Zunahme des Elektrodenabstandes abnehmen. Deshalb muß man, um die Werte verschiedener Tiefen vergleichen zu können, bei jedem Ablesen einen Multiplikator anwenden, der den Abständen entspricht, so daß die obigen Werte nach der Korrektur so aussehen:

Elektrodenabstand	Scheinbare Widerstandswerte
50 cm	100 Ohm $\times \frac{1}{2} = 50$ Ohm
1 m	50 Ohm $\times 1 = 50$ Ohm
2 m	25 Ohm $\times 2 = 50$ Ohm
4 m	12,5 Ohm $\times 4 = 50$ Ohm

Bei der Wenner-Anordnung (siehe Anhang) muß der Wert des so gewonnenen scheinbaren Widerstandswertes mit $2\pi = 6,28$ multipliziert werden, damit man den wirklichen charakteristischen Widerstand in Ohm/Meter erhält. Da dieser Multiplikator für alle Messungen mit derselben Elektrodenanordnung konstant ist, kann man ihn außer acht lassen. Wenn verschiedene Elektrodenanordnungen auf dem gleichen Terrain miteinander verglichen werden, muß der Faktor 2π in Rechnung gestellt werden.

Sehr wenige Böden werden die vollkommen gleiche lineare Reihe von Werten bieten, wie sie oben angegeben sind. Der Bodenwiderstand hängt weitgehend von der Wassermenge ab, die sich im Boden gesammelt hat, und von der Menge, der hier befindlichen Mineralien. Da die Feuchtigkeit selten gleichmäßig in vertikaler Richtung verteilt ist, wird der Widerstand ansteigen oder fallen, je nachdem, ob der Boden unter der Oberfläche trockener oder nasser ist. Wenn eine tiefere geologische Schicht dicht unter der Oberfläche liegt, z. B. wenn das verwitterte Gestein, auf dem die Krume liegt, ansteigt, dann wird sich bei dieser Tiefe ein scharfer Wechsel in dem charakteristischen Widerstand zeigen.

Nachdem man nun den charakteristischen Bodenwiderstand an einem gesonderten Platz in der Nähe des vermuteten Denkmals bestimmt hat, hängt der nächste Schritt davon ab, ob ein Teil des Denkmals, etwa durch zufällige Entdeckung oder frühere Ausgrabung schon bekannt ist. Wenn ein bekannter Teil vorliegt, wird eine Vertikalsondage über diesem Stück durchgeführt. Sie soll bestimmen, wie sehr der charakteristische Widerstand sich mit der Tiefe ändert. Wenn der Wechsel im Widerstand nicht viel größer ist als derjenige, den man im ungestörten Boden beobachtet hat, dann hat man wenig Aussichten für weitere Messungen, da der charakteristische Bodenwiderstand gleich dem Objektwiderstand ist.

Wenn der Unterschied mindestens 10% in jeder Richtung im Vergleich zu dem ungestörten Boden beträgt, werden die Widerstandsmessungen aller Wahrscheinlichkeit nach erfolgreich sein. Bei der Vertikalsondage über einem bekannten Teil des Denkmals kann man einen Elektrodenabstandswert auswählen, der die größte Abweichung vom einheitlichen Boden gibt. Dieser Wert wird dann für alle weiteren Messungen beibehalten. Man tut gut daran, diese Sondage an mehreren Stellen durchzuführen, damit man zufällige Abweichungen ausschaltet. Wenn jedoch kein Teil des Denkmals bekannt ist, geht man am besten so vor, daß man ein sehr weitmaschiges Gitternetz über das ganze verdächtige Gebiet legt. Dann wird eine Reihe von Messungen in jeder Richtung längs der Gitterlinien mit 1 m Elektrodenabstand ausgeführt. Als nächstes wiederholt man die Messungen über den gleichen Linien mit 2 m Abstand. Dieser Vorgang kann mit dem Gossenapparat bis zu einer praktischen Grenze von ungefähr 5 m fortgesetzt werden, was sehr grob gerechnet einer Tiefenmessung von 5 m entspricht. Auf jeder Meßlinie (Profil) müssen die Zentren der gemessenen Punkte auf die gleichen Stellen fallen. Das erfordert für bestimmte Werte die Verschiebung des Bandmaßes um 50 cm in der einen oder anderen Richtung. Liegt z. B. bei 1 m Elektrodenabstand der erste gemessene Punkt bei 1,5 m vom Nullpunkt des Bandmaßes entfernt, dann liegt der zweite

gemessene Punkt bei 2,5 m usw. Bei 2 m Elektrodenabstand liegt der erste gemessene Punkt bei 3 m. Wenn diese zweite Messung mit den 1 m-Werten verglichen werden soll, muß das Meßband 50 cm in der Anfangsrichtung zurückgezogen werden, so daß der 3 m-Punkt über den 2,5 m-Punkt der ersten 1 m-Abstand-Serie zu liegen kommt.

Nachdem man eine Reihe von Profilen in dem groben Gitternetz mit 3 oder mehr verschiedenen Elektrodenabständen gemessen hat, werden die abgelesenen Werte durch Multiplikation der scheinbaren Widerstandswerte umgerechnet. Oft sieht man sofort, daß die größte Abweichung von der Einheitlichkeit in horizontaler Richtung mit einem bestimmten Elektrodenabstand gleichläuft, wodurch das Vorhandensein einer Mauer oder einer Grube angezeigt wird. Wenn bei keinem Elektrodenabstand eine solche Abweichung zu erkennen ist, ist es unwahrscheinlich, daß Widerstandsmessungen der Erforschung dieses Denkmals nützen werden.

Wenn man sich mit den genannten Mitteln für den besten Elektrodenabstand entschieden hat, kann man für die weiteren Messungen zwei Wege beschreiten. Die Wahl hängt von der Art des Denkmals ab. Die eine Möglichkeit ist die, eine Reihe von Widerstandsprofilen mit großem Abstand voneinander aufzumessen, wobei man so lange Profile wählt, daß auf jeder Seite noch einiges ungestörtes Gelände mit erfaßt wird. Die andere Möglichkeit besteht in Widerstandsmessungen auf dem ganzen in Frage kommenden Gebiet. Man benutzt dazu ein Gitternetz, dessen Quadrate gleich dem Elektrodenabstand sind. Die erste Methode sollte man auf einfache Denkmäler anwenden, die langgestreckt sind, wie einfache, geradlinige Mauern oder Gräben von beträchtlicher Länge, während die zweite besser für Objekte von komplizierterer Gestalt paßt. Es ist klar, daß die erste weit schneller geht, aber auch die Möglichkeit birgt, sich zu irren, weil die gemessenen Punkte verhältnismäßig weit auseinander liegen. Die vollständige Flächenkartierung ist zu empfehlen, wenn man genügend Zeit hat. Die große Anzahl der gemessenen Punkte verringert die Möglichkeit von Fehlinterpretationen. Die Anzahl der Punkte, die für eine volle Flächenaufnahme benötigt werden, wächst im Quadrat mit der Länge einer Seite, so daß für ein beträchtliches Geländestück eine sehr große Zahl von Messungen nötig wird. Gewöhnlich ist eine Kombination von Profil-Sondage-Messungen, die zur Kontrolle der ursprünglichen Lage und Tiefe dienen, mit Flächenaufnahmen, die besonders interessante Stellen erfassen, die beste Praxis. Die gefundenen Werte werden auf Millimeterpapier eingetragen. Der Maßstab 1 : 100 wird vom Verfasser am liebsten gebraucht, da dieser anscheinend die geringsten Notierungsirrtümer in den Händen ungeübter Personen mit sich bringt. Mit dem abgebildeten Apparat können sich Arbeiter von normaler Schulbildung die Meßmethode in einem Tag aneignen. Dadurch wird das höher qualifizierte Personal für die darauffolgende Interpretation frei.

Darstellung und Interpretation der Meßergebnisse.

Nach durchgeführter Messung besitzt man zunächst einen Widerstandsspiegel des Bodens. Handelt es sich nun um Auffindung einfacher Objekte,

oder soll die Lage großer Mauern bestimmt werden, genügt oft einfache Einsichtnahme, um den hohen Widerstand zu sehen, den eine Mauer in einem Lehmboden verursacht, oder den geringen, den ein feuchter, versunkener Graben in einer trockenen Umgebung bewirkt. Wenn man eine Reihe von Profilen gemacht hat, ist die einfachste Art der Darstellung, die überhaupt kein Rechnen erfordert, diejenige, daß man den Abstand der Meßpunkte horizontal und den

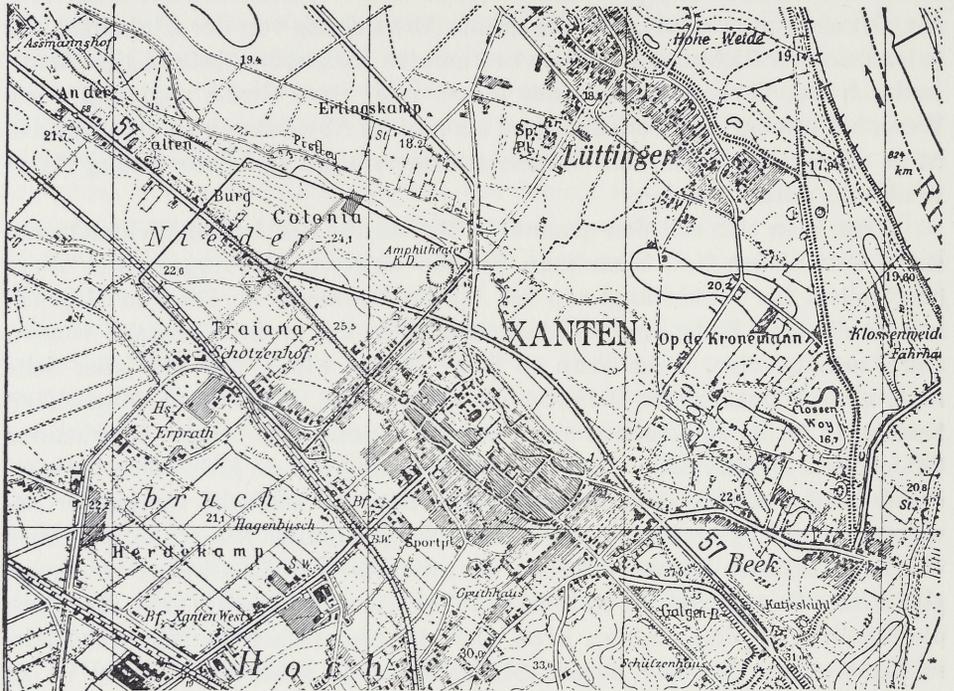


Abb. 2. Xanten. Lage der Colonia Traiana.

Widerstandswert vertikal einträgt. Verbindet man die Punkte durch eine Kurve nach Augenmaß, hat man einen Eindruck von der horizontalen Widerstandsveränderung über dem Profil. Atkinson empfahl diese Methode. Richtig angewandt ist sie vielleicht am einfachsten. Sie verbirgt aber verschiedene gefährliche Fallen. Hat man eine Reihe von Profilen, kann man sie alle zugleich auf einer Karte darstellen, vorausgesetzt, daß die Profile weit genug voneinander entfernt sind oder daß ein genügend kleiner Maßstab gewählt wird. Im folgenden geben wir ein Beispiel für diese Darstellungstechnik.

Bei Xanten liegt die Colonia Traiana in offenem Ackerland, nördlich von der modernen Stadt. Die ungefähre Örtlichkeit der Mauern kennt man aus Grabungsberichten, die z. T. alt und nur summarischen Charakters sind. Die allgemeine Lage sieht man auf der Karte von *Abbildung 2*.

Wir machten eine Reihe Widerstandsprofile mit verschiedenem Elektrodenabstand längs einer Linie, die nach unserer Annahme rechtwinklig zur Nordwestmauer verlief. Ein Abstand von 2 m schien für das in Frage kommende

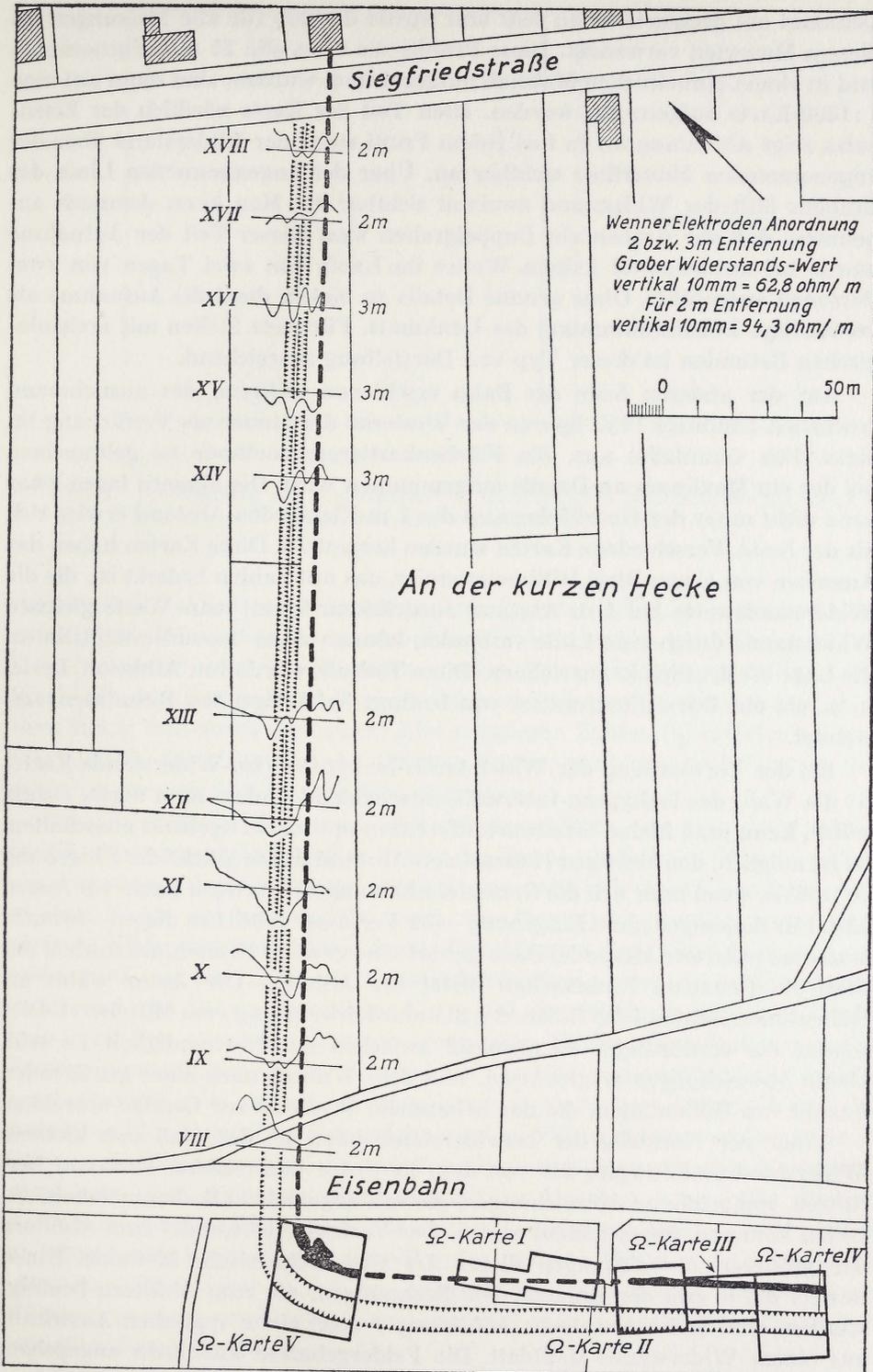


Abb. 3. Allgemeiner Plan der Widerstandsmessungen in Xanten, einschließlich der Widerstandskarten von der West-Mauer und dem West-Turm.

Denkmal am geeignetsten zu sein und wurde deshalb für alle Messungen an diesem Mauerteil verwendet. Diese Profile, die etwa alle 25 m aufgenommen und in einem einheitlichen Maßstab aufgezeichnet wurden, sind dann auf eine 1:1000-Karte aufgetragen worden. (Den Teil der Karte nördlich der Eisenbahn zeigt *Abbildung 3*). In fast jedem Profil steigt der Widerstand über der angenommenen Mauerlinie sichtbar an. Über der angenommenen Linie des Grabens fällt der Widerstand zweimal sichtbar ab. Man kann demnach annehmen, daß der Graben ein Doppelgraben war. Dieser Teil der Aufnahme wurde bei ausnehmend kaltem Wetter im Laufe von zwei Tagen von zwei Personen ausgeführt. Ohne genaue Details zu bieten, dient die Aufnahme als vernünftige Lokalbestimmung des Denkmals. Für viele Stellen mit archäologischen Befunden ist dieser Typ von Darstellung ausreichend.

Auf der anderen Seite der Bahn erschienen während des ausnehmend trockenen Sommers 1959 Spuren der Westecke der Mauer als Verfärbung im Gras. Das veranlaßte uns, die Flächenkartierungsmethode zu gebrauchen, bei der ein Maximum an Details aufgenommen wird. Die Mauern lagen zwar ganz dicht unter der Oberfläche, und der 1 m-Elektroden-Abstand erwies sich als der beste. Verschiedene Karten wurden hergestellt. Diese Karten haben das Aussehen von einem Blatt Millimeterpapier, das mit Zahlen bedeckt ist, die die Widerstandswerte bei 1 m Abstand ausdrücken. Wenn man Werte gleichen Widerstands durch eine Linie verbindet, können diese 'Isowiderstandslinien' die Lage oft deutlich kennzeichnen. Diese Technik wurde von Atkinson, Lerici u. a. als ein Darstellungsmittel von bedingt befriedigenden Resultaten verwendet.

Bei der Verwendung der Widerstands-Isohypsen (Iso-Widerstands-Karte) ist die Wahl des Isohypsen-Intervalls entscheidend. Indem man dieses richtig wählt, kann man kleine Streuwertdifferenzen optisch weitgehend ausschalten. Es ist möglich, den richtigen Höhenlinien-Abstand durch glückliche Eingebung zu treffen, wenn man sich die Gesamterscheinung der fertigen Karte vor Augen hält. Für diejenigen ohne Eingebung – der Verfasser gehört zu diesen – braucht man eine präzisere Methode. Dazu gehört eine gewisse Elementarkenntnis der Statistik. Genauere Einzelheiten bietet der Anhang. Der Autor wählt als Höhenlinien-Abstand die Hälfte der Standardabweichung vom Mittelwert. Dies scheint ein vernünftiger Kompromiß zwischen der Notwendigkeit zu sein, kleine Abweichungen wegzulassen, und dem Wunsch nach einer genügenden Anzahl von Höhenlinien, die das behandelte Denkmal zur Genüge umreißen.

Einer der Nachteile der Isowiderstandslinien ist der, daß sich kleinere Widerstandsänderungen, die von dem in Frage kommenden Denkmal herühren, von größeren Abweichungen, die von allgemeinen Bodenuneinheitlichkeiten kommen, überschattet zeigen. Der Verfasser verwendet zum Abfiltern der größeren Abweichungen dieser Art eine rechnerische Methode. Einen Beweis dafür gibt der Anhang. Die Rechnungen, die zum Abfiltern benötigt werden, sind äußerst einfach: *Abbildung 4* zeigt einen typischen Ausschnitt aus einem Widerstands-Meßblatt. Die Feldergebnisse sind links angegeben. Für einen 1 m-Elektrodenabstand und 1:100-Maßstab wird eine Schablone aus Plexiglas von 12 x 12 cm hergestellt. An den bezeichneten Punkten werden

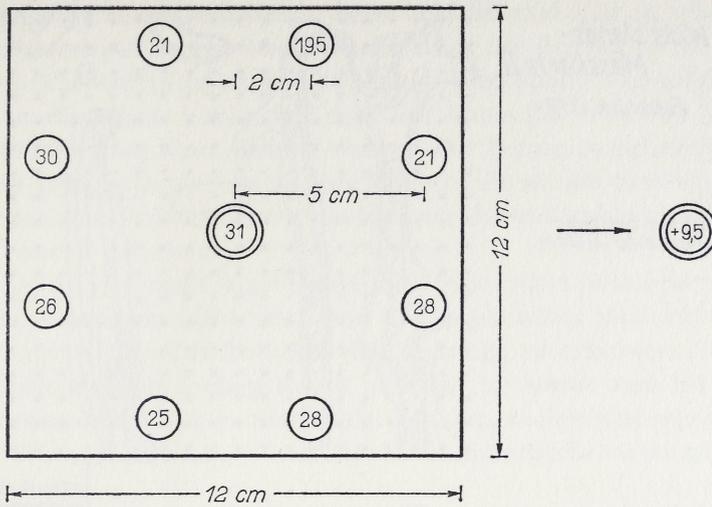


Abb. 4. Umwandlung der Feldergebnisse in die gefilterten Widerstandsergebnisse. Schablone und Beispielswerte.

mit einem Zirkel Kreise eingezeichnet. Zwei konzentrische Kreise zeichnet man in die Mitte. Für andere Elektrodenabstandswerte werden alle Werte proportional verändert. Die Berechnungen werden dann wie folgt ausgeführt: Die Werte, die in allen anderen Kreisen sichtbar sind, werden zusammengezählt (hier 198,5) und durch die Anzahl aller sichtbaren Zahlen (8) dividiert. Dieser Wert (22,5), der Mittelwert der äußeren Kreise, wird von dem Wert in den beiden konzentrischen Kreisen (31) abgezogen.

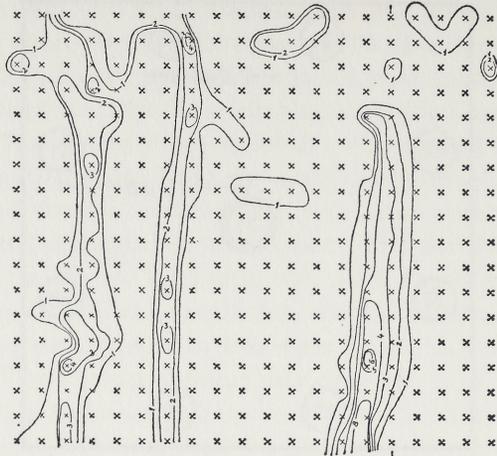
Die Differenz (+ 9,5) wird wieder aufgezeichnet, wie man rechts sieht. Die Berechnung wird für jeden Punkt der Karte wiederholt. Das neue Blatt mit den ausgerechneten Werten versieht man dann mit den Höhenlinien. Nur positive Werte werden gewählt, wenn man hohe, nur negative, wenn man niedrige Widerstandsmerkmale sucht. Der Abstand der Höhenlinien voneinander wird aus der Hälfte der Standardabweichung gewonnen oder intuitiv, wenn man will. Die so entstandene Karte gibt ein viel klareres Bild des Denkmals, weil fast alle Auswirkungen von großen Horizontalveränderungen im Bodenwiderstand, die von der Schräge des Terrains, von verschiedener Bodenbeschaffenheit usw. herrühren, ausgeschaltet sind. Der Anhang bietet die Anleitung für diesen Typ eines rechnerischen Filters. Mathematiker können ihre eigene Filtercharakteristik ableiten, die fast jede gewünschte Merkmalsdämpfung oder -betonung eines bestimmten Durchmessers ergibt. Der in Xanten gebrauchte Filter wurde konstruiert, um Abweichungen, die größer als 10 m in der Breite waren, abzdämpfen und um Werte, die der Dicke der römischen Stadtmauer (1,8–2 m) entsprachen, zu betonen. Die aus dieser Filterung gewonnenen Xanten (ihre Lage zeigt Abb. 3) werden auf *Abbildung 5* und 6 im Detail gegeben.

Abbildung 5 zeigt rechts auf dem Iso-Widerstandslinienplan die Westmauer in beträchtlicher Ausdehnung und davor den Graben. Die Mauer ist an

Widerstands-
Messkarte II

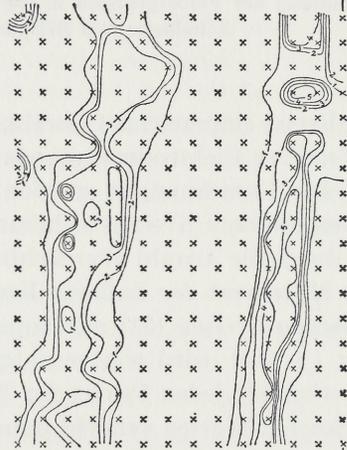
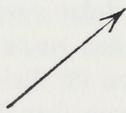
Feldstück 319

Wenner Elektroden
Anordnung $a=1,00\text{ m}$.



Widerstands-Messkarte III

Feldstück 318/19



Widerstands-Messkarte IV Feldstück 318 u. 322

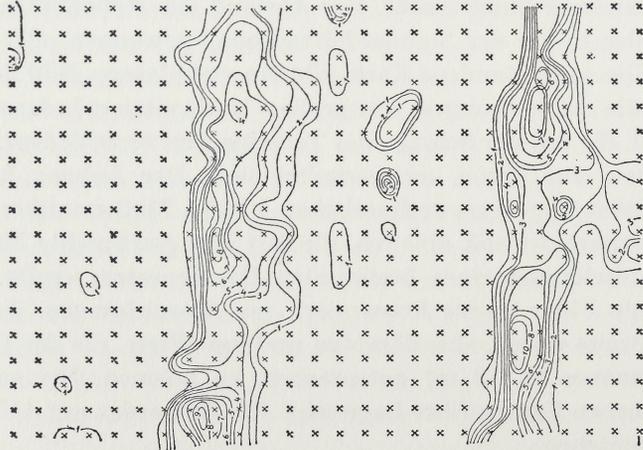


Abb. 5. Details von der Widerstandskarte der West-Mauer in Xanten mit Graben und Berme.

verschiedenen Stellen unterbrochen. Diese Schäden sind klar zu sehen, ebenso wie einige herausgebrochene Mauerstücke. Auch der Graben ist da, wo er als Teich gebraucht wurde, unterbrochen. Durch wiederholte Verbreiterung kam er näher an die Mauer heran, wie man auf Karte III sieht. Die Filterungsmethode erlaubt eine klare Kennzeichnung der Berme zwischen Mauer und Graben, sie zeigt auch eine Reihe von Mauern, die an die Stadtmauer rechtwinklig angrenzen, vielleicht Reste von Häusern. Eine Anzahl einzeln gelegener Gruben ist ebenso zu sehen.

Auf *Abbildung 6* sieht man rechts die abgerundete Westecke mit ihrem viereckigen Innenturm. Überreste von Innengebäuden, vielleicht auch zusammengesetzte Turmbruchstücke, sind ebenfalls zu erkennen. Der Graben verläuft links in einer breiten Kurve parallel zur Mauer und ist von einer Anzahl Gruben unterbrochen. Außerhalb des Grabens liegt eine weitere Anzahl moderner Störungen. Einige waren auf der Erdoberfläche zu sehen.

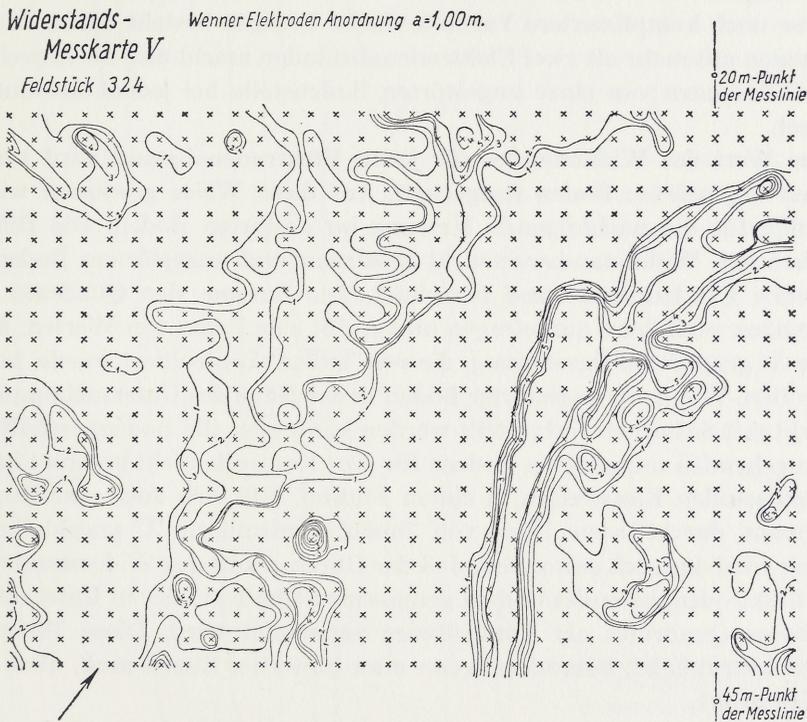


Abb. 6. Widerstandskarte der West-Ecke und des West-Turmes
in Xanten mit dem Graben.

Eine Ausweichmöglichkeit für den gefilterten Iso-Widerstandslinienplan, die manchmal in einem Terrain von sehr unregelmäßigem Charakter notwendig wird, ist die vom Verfasser so bezeichnete 2-Wert-Sondage-Methode. Bei diesem System werden die Messungen mit zwei Elektrodenabstandswerten gemacht, wobei die Meßbänder so angebracht werden, daß die Werte über den

gleichen Punkten liegen. Die Werte werden dann mit einem geeigneten Faktor so multipliziert, daß man sie miteinander vergleichen kann. Der Wert für den größeren Elektronenabstand wird durch den kleineren dividiert und die Verhältniszahl der beiden wird aufgezeichnet. Das kommt auf dasselbe heraus, wie wenn man mit nur zwei Werten eine Sondage an jedem Punkt macht. Wo der Boden sehr unterschiedlich ist, kann das eine Hilfe zum Ausgleich dieser Verschiedenheiten sein. Die Verhältniszahlen können dann durch Höhenlinien ausgedrückt und gefiltert werden wie vorher. Wenn der Boden vollkommen einheitlich wäre, würde das Verhältnis gleich sein. Die Anwesenheit einer Mauer von hohem Widerstandswert unter einer Oberflächenschicht von geringerem Widerstand vergrößert die Verhältniszahl entsprechend, und umgekehrt wird sie durch eine Grube oder einen Graben mit geringerem Widerstand verringert. In einem Boden mit einer gleichbleibenden zweiten Schicht, wie man das oft an einer Flußböschung mit einer Kiesterrasse unter der Oberfläche antrifft, wird das Verhältnis um einen gewissen Faktor höher sein als bei ungestörtem Boden. Variationen werden um diesen Wert herum liegen.

Eine noch kompliziertere Variante dieser Technik besteht darin, daß man Messungen mit mehr als zwei Elektrodenabständen macht und die Abweichung ihrer Differenzen von einer ungestörten Bodenstelle bei jedem Abstand aufzeichnet.

Der Wert des Widerstandes für jeden Elektrodenabstand wird zunächst für den ungestörten Boden festgestellt. Auf diese Weise gewinnen wir eine Kontrolle für die nachfolgende Messung im gestörten Boden. Die Differenz zwischen den Widerstandswerten in gestörtem und ungestörtem Boden wird für jeden Elektrodenabstand berechnet. Die Summe der Quadrate dieser Differenzen wird dann aufgetragen und ergibt eine Reihe von Werten, die wir als die X^2 graphische Darstellung, die von 'außen' kontrolliert wurde, bezeichnen wollen. Wenn ein ungestörter Boden in der Nähe des Untersuchungsobjektes nicht mit Sicherheit festgestellt werden kann oder die Bodenbeschaffenheit des umgebenden ungestörten Bodens für eine Kontrolle nicht geeignet ist, z. B. bei wechselnden Kiesstreifen in einem Flußtal, läßt sich auch eine Kontrolle von 'innen' durchführen. Diese von 'innen' kontrollierte X^2 graphische Darstellung wird dadurch gewonnen, daß der Durchschnitt des Widerstandswertes jedes Elektrodenabstandes in dem gemessenen Quadrat oder in Unterabteilungen dieses Quadrates als Kontrollwert verwendet wird. Diese Technik ist äußerst zeitraubend, besonders wenn man hinterher filtern muß, aber sie ist gänzlich exakt.

Grenzen und Fehlerquellen der Widerstandsmessungsmethode.

Eine Flächenkartierung vorzunehmen dauert länger, als eine geringe Zahl von Profilen aufzunehmen. In Ladenburg am Neckar wurde die örtliche Bestimmung der römischen Südmauer gewünscht. Eine Anzahl von Profilaufnahmen mit einem Elektrodenabstand von 2 m, den wir wie beschrieben bestimmten, wurde in 25 m-Zwischenräumen durchgeführt. Die Meßreihe, die auf *Abbildung 7* dargestellt ist, wurde oben in der Nähe der Häuserreihe be-

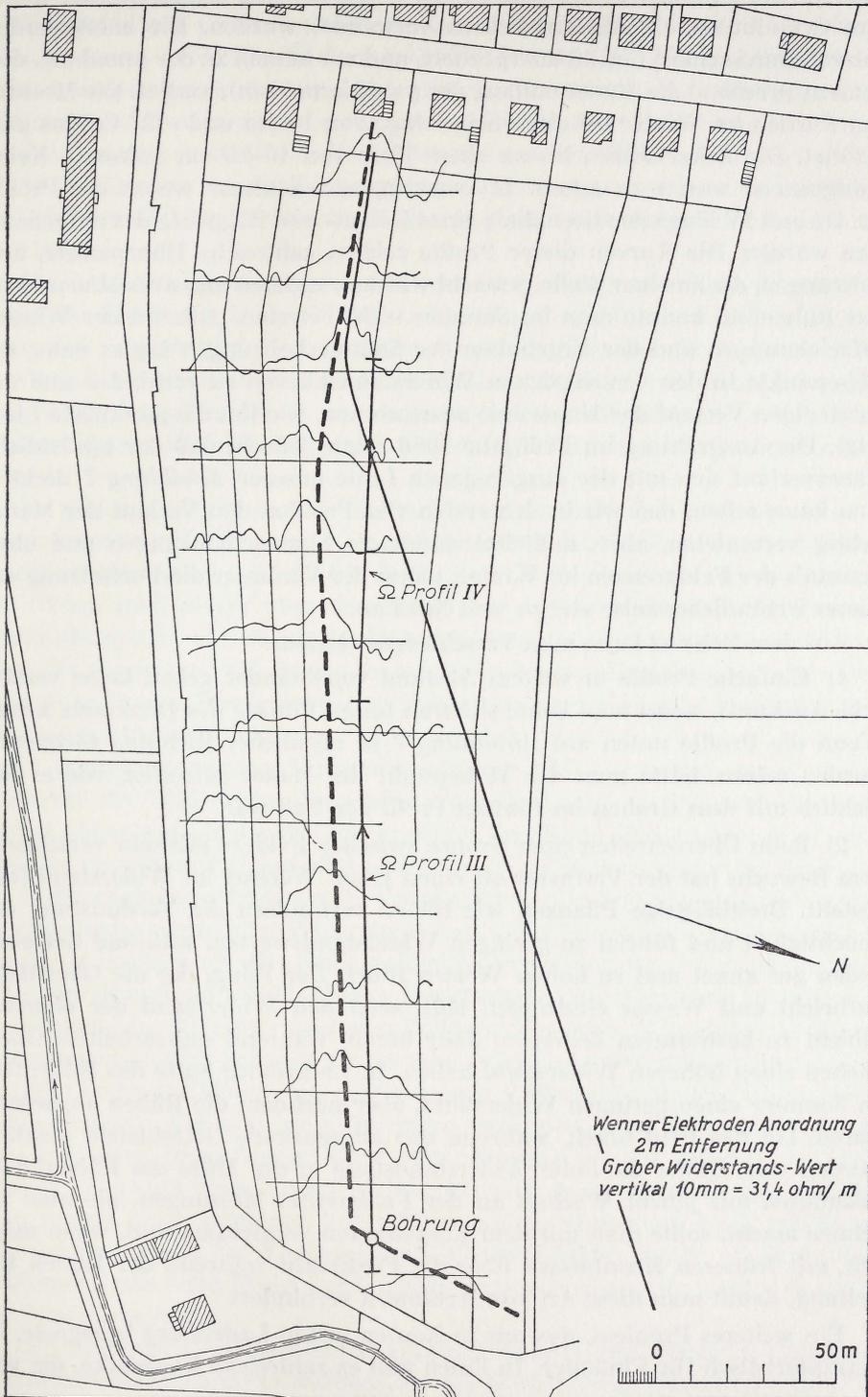


Abb. 7. Widerstandsprofile in Ladenburg, Südmauer.

gonnen. Die Profile wurden ohne weitere Umrechnung aufgezeichnet, wobei ihre Grundlinien als Abstandsachsen verwendet wurden. Die entstehenden Kurven wurden nach Gefühl interpretiert, und wir kamen zu der Annahme, daß dementsprechend die Mauer entlang der punktierten Linie verlief. Die Messungen wurden im Winter bei einer Schneelage von 15 cm und -13° Celsius ausgeführt. Die Äcker waren bis zu einer Tiefe von 10–20 cm gefroren. Keine Feldgrenzen waren zu sehen. Im vergangenen Sommer waren die Profile Nr. III und IV längs der Grenzlinie eines Rüben- und Roggenfeldes aufgenommen worden. Die Kurven dieser Profile zeigten zahlreiche Höhepunkte, und Bohrungen, die an einer Stelle gemacht wurden, ergaben massives Mauerwerk. Das Rübenfeld konnte man im Sommer nicht betreten. Anhand der Winteraufzeichnungen und der Ergebnisse der Sommerbohrungen lag es nahe, die Höhepunkte in den verschiedenen Widerstandskurven zu verbinden und dadurch einen Verlauf der Mauerlinie anzunehmen, wie ihn die punktierte Linie zeigt. Die Ausgrabung im Frühjahr 1960 zeigte jedoch, daß der tatsächliche Mauerverlauf sich mit der ausgezogenen Linie unserer *Abbildung 7* deckt⁷⁾. Man kann sehen, daß wir in den ersten vier Profilen den Verlauf der Mauer richtig vermuteten, aber, mißleitet durch die Sommerbohrungen und ohne Kenntnis der Feldgrenzen im Winter, nahm der Verfasser die Fortsetzung der Mauer irrtümlicherweise viel zu weit links an.

Aus dem Beispiel kann man Verschiedenes lernen:

1) Einfache Profile in weitem Abstand voneinander geben keine verlässliche Auskunft, wenn man keine sicheren festen Punkte des Denkmals kennt. Wenn die Profile unten auf *Abbildung 7* in nördlicher Richtung fortgesetzt worden wären, hätte man den Höhepunkt der Mauer getroffen, wie es tatsächlich mit dem Graben im fünften Profil der Fall war.

2) Beim Überschreiten einer Grenze zwischen Feldern mit sehr verschiedenem Bewuchs hat der Verfasser oft einen jähen Wechsel im Widerstand festgestellt. Breitblättrige Pflanzen wie Rüben verhindern die Verdunstung der Feuchtigkeit und führen zu geringen Widerstandswerten, während Getreideboden gut atmet und zu hohen Werten führt. Der Pflug, der die Oberfläche aufbricht und Wasser eindringen läßt, setzt den Widerstand der obersten Schicht zu bestimmten Zeiten im Jahr herab, während unbearbeitete Oberflächen einen höheren Widerstand haben. In Ladenburg hatte das Rübenfeld im Sommer einen geringen Widerstand, aber nachdem die Rüben abgeerntet waren, lag das Feld brach, während das angrenzende Getreidefeld gepflügt worden war. Daher die hohe Widerstandslinie in der Mitte des Rübenfeldes zusammen mit jähem Wechsel an der Feldgrenze. Messungen, die man im Schnee macht, sollte man mit dem Katasterplan vergleichen und, wenn möglich, mit früheren Kenntnissen über die Feldfrucht während der letzten Bestellung, damit man diese Art von Irrtümern verhindert.

Ein weiteres Problem, das uns in Xanten wie in Ladenburg begegnete, ist charakteristisch für Flußtäler. In ihnen gibt es zahlreiche Kiesbänke, die von

7) Ich möchte an dieser Stelle Herrn Dr. D. Baatz danken, daß er mir gestattete, in Vorwegnahme seines Grabungsberichtes die Mauerlinie auf *Abbildung 7* zu reproduzieren.

früheren Flußbetten stammen und oft über eine beträchtliche Entfernung hinweg geradlinig verlaufen. In Ladenburg sieht man einen kleinen Fluß links auf der Karte (*Abb. 7*). Es ist möglich, daß einige der Höhepunkte in den Widerstandskurven auf solche Kiesbänke zurückzuführen sind, die man natürlich nicht von Ausbruchsruben unterscheiden kann. In Ladenburg war keine intakte Mauer erhalten, nur Vermutungen aus den Widerstandswerten und deren Bestätigung durch eine Ausgrabung. Bohrungen an den verschiedenen Höhepunkten der Profile würden die Frage geklärt haben, aber der Bodenfrost verhinderte sie.

Ein ähnliches Problem taucht bei der Aufdeckung von Gräben auf oder wenn alte Flußbetten in der Nachbarschaft liegen, ebenso dann, wenn ein tief liegendes Geländestück eine größere Konzentration von Bodenfeuchtigkeit hervorruft. Das Terrain muß vorher sorgfältig untersucht werden, und solche Unterschiedlichkeiten im Niveau müssen auf der Widerstandskarte notiert werden, damit Veränderungen an diesen Punkten nicht falsch eingeschätzt werden.

Es gibt auch eine saisonbedingte Verschiedenheit des Widerstandes bei einem gegebenen Denkmal, die es zu gewissen Zeiten im Jahr fast unmöglich macht, das Denkmal aufzufinden. In Xanten ist die Mauer stellenweise erhalten. Wenn man direkt über der Mauer mit einem rechtwinklig stehenden Elektrodensystem abliest, ergibt das normalerweise einen Widerstandsablesewert, der doppelt so hoch ist wie bei dem umgebenden Geländestück und einen dreimal so hohen Wert, wenn das Elektrodensystem parallel verläuft (über diesen Effekt später mehr).

In dem sehr trockenen Sommer des Jahres 1959 stieg während der ganzen Jahreszeit der Widerstand des umliegenden Erdbodens ständig an, bis er im Herbst höher war als der der Mauer selbst. Zu diesem Zeitpunkt war es nicht möglich, die Mauer auszumachen, selbst nicht an Stellen, wo sie im Frühjahr gut in Erscheinung getreten war. Umgekehrt verlor das Grabenmaterial, das normalerweise geringeren Widerstand hat, mehr Wasser als das umgebende Land und erschien als eine Stelle hohen Widerstandes. Diese Umkehrung der Widerstandswerte mit dem völligen Verschwinden der Merkmale ist während ausnehmend feuchter oder trockener Zeiten zu erwarten. Wenn die Oberfläche ausnehmend naß ist, fungiert sie als sehr guter Leiter. Wenn man nach einer darunter liegenden Mauer von relativ hohem Widerstand Ausschau hält, kann es möglich sein, daß man sie nicht findet, denn der ganze Strom fließt durch die Oberfläche. Diese Gefahr kann man während der einleitenden Vertikalsondage in ungestörtem Boden leicht erkennen, denn Widerstandswerte, die dazu neigen, nach schweren Regenfällen mit zunehmender Tiefe gradweise anzusteigen, zeigen das Vorhandensein dieses Effektes an, es sei denn, daß Bohrungen eine hohe Widerstandsschicht zutage fördern, die nicht weit unter der Oberfläche liegt.

In hügeligem Gelände können zufällige Brüche und Risse im darunter liegenden Gestein entdeckt werden, die wie Gräben in Erscheinung treten. In ähnlicher Weise machen sich Störungen von Menschenhand, wie frische Rohrleitungsgräben oder Abzugskanäle, wie Denkmäler älteren Ursprungs bemerk-

bar. Man muß immer daran denken, daß der Widerstandsapparat den Zeitpunkt einer Störung nicht unterscheiden kann.

Andere Fehlerquellen und Fehlschlüsse bei Widerstandsmessungen, die nicht auf geologische Tatsachen oder auf Erdarbeiten zurückgehen, können dann entstehen, wenn man nicht die physikalischen Empfindlichkeitsgrenzen des Apparates im Verhältnis zu dem Ausmaß des gesuchten Denkmals ins Auge faßt, in bezug auf seine Tiefe oder seine Zusammensetzung. Dieser Faktor verdient besondere Beachtung. Wir geben hier nur summarisch die Folgerungen wieder, die in ausführlicher Form in Teil II dieses Aufsatzes dargelegt werden sollen. Das elektrische Feld, das im Erdboden erzeugt wird, dehnt sich theoretisch bis ins Unendliche aus. In Wirklichkeit schmilzt es schon nach kurzer Entfernung von den Elektroden zu ganz kleinen Werten zusammen. Die Form dieses Feldes ähnelt einer Zitrone, die der Länge nach halbiert ist. Die Länge des tatsächlich wirksamen Feldes ist bei der Wenner-Anordnung ungefähr gleich fünf Elektrodenabständen, die Breite ungefähr drei Abständen entsprechend. Es schließt also ein beschränktes Erdvolumen ein, das ungefähr 30 Kubik-Elektroden-Abständen gleich ist. Eine vernünftige Menge dieses Volumens muß aus Material bestehen, das einen genügend von der Umgebung abweichenden, charakteristischen Widerstand bietet, damit diese Abweichung aufgefunden werden kann. Wenn der charakteristische Widerstand des Denkmals sehr verschieden von dem der Erde ist, oder wenn das Denkmal sehr nahe an die Erdoberfläche herantritt, hat es natürlich eine größere Wirkung auf das elektrische Feld und wird daher leichter aufzufinden sein. Die Zusammenhänge sind sehr kompliziert, da sie die voneinander unabhängigen Widerstands-Variablen von Boden, Denkmal, Tiefe und proportionalem Erdvolumen umfassen. In Teil II hofft der Verfasser, geeignete Kurven vorlegen zu können, die er durch Experimente an Modellen gewonnen hat.

In der Praxis ist das auf die Widerstandsmessungen wirkende Ausmaß des Denkmals nicht das gleiche, wie sein wahres räumliches Ausmaß. Auch seine Tiefenwirksamkeit ist nicht die gleiche. In nassen Jahreszeiten dringt das Grundwasser in das Mauerwerk ein und bewirkt, daß sein Widerstand herabgesetzt wird, obwohl vielleicht der Mauerkern trocken bleibt. So ist das Ausmaß der elektrischen Wirksamkeit des Mauerwerks durch das eingedrungene Wasser herabgesetzt. Bei trockenem Wetter wird der Boden über dem Mauerwerk schneller austrocknen als im umgebenden Gelände, wenn das Mauerwerk porös ist. Das führt zu einer Zone von höherem Widerstand über der Mauer, und das verringert wieder die Wirkungstiefe der Mauer. Ähnlich ist in sehr nassem Boden die Wirkungstiefe vergrößert. Über Gräben sind die Erscheinungsformen ebenso kompliziert. Wenn der Graben mit feinem Oberflächenumus angefüllt ist, enthält dieser normalerweise mehr Wasser als der umgebende Boden, und der Widerstand des Grabens wird geringer sein. Wenn der Graben mit Mauerbruchstücken angefüllt ist, kann sein Widerstand erhöht sein. In Xanten zeigten Messungen, die direkt über ausgegrabenen Ausbruchgruben, die Mauerbruchstücke enthielten, angestellt wurden, einen charakteristischen Widerstand, der im Mittsommer zweimal so hoch war wie der des umgebenden Alluviums. Dieser Abzugsgraben ist ganz porös und gut geführt,

so daß er im Hochsommer den darüberliegenden Boden austrocknet, wie poröses Mauerwerk das tut, und somit die Wirkungstiefe verstärkt. Im Winter dagegen hält der Graben eine ganze Menge Wasser. Sein Widerstand kann jetzt genügend fassen, so daß er als Graben erscheint. Zu bestimmten Zeiten im Jahr wird er den gleichen Widerstand wie der umgebende Erdboden haben und völlig unauffindbar sein. Das weist auf die Notwendigkeit hin, Widerstandsmessungen an derselben Stelle zu verschiedenen Zeiten des Jahres zu machen, bevor man den Schluß ziehen darf, die Messungen brächten keinen Erfolg.

Die wirksame Genauigkeit der Messungen wird auch von der Einheitlichkeit des Bodens bestimmt. Ein Boden wie Löß, der ausnehmend gleichförmig ist, erlaubt die Auffindung von viel kleineren Abweichungen als ein grober Steinboden auf brüchigem, hügeligem Gelände. Der Gossenapparat arbeitet bis auf 2% genau, aber die normalen Bodenveränderungen im Flußalluvium bei Sand oder Kies kommen im Durchschnitt an 10% heran. Somit bestimmt nicht die Empfindlichkeit des Gerätes die Meßgenauigkeit.

Die erreichbare Genauigkeit wird in großem Maße durch die Tiefe des Denkmals bestimmt, durch seinen charakteristischen Widerstand im Verhältnis zum Erdboden, durch sein Volumen und durch das Ausmaß von Zufallsabweichungen im Boden. Das alles spielt für die horizontale Genauigkeit oder für das Auflösungsvermögen der Messungen eine Rolle. Im allgemeinen arbeitet man am wenigsten genau, wenn man Profile macht und die Position eines Denkmals nur nach den Kurvenhöhepunkten beurteilt, denn der Widerstand ändert sich zuerst etwas, bevor das Elektrodensystem über das Merkmal hinweggeht, und es kann anderseits einen Höhepunkt erreichen, der ganz breit und etwas verzerrt ist, wenn die Feuchtigkeit im Denkmal ungleich ist. Die Genauigkeit reicht dann bis zur Hälfte der Gesamtlänge, die das Elektrodensystem einnimmt. Mit der Kartierung der Linien gleichen Widerstandes und mit der gegebenen statistischen Auswahl der Linienzwischenräume nähert sich die Genauigkeit der Schätzungen einem Elektrodenabstand. Nach Kartierung der gefilterten Widerstandsprofile ist die Genauigkeit nicht wirklich höher, aber es können Schätzungen bis zu etwa $\frac{1}{4}$ eines Elektrodenabstandes im Fall von scharf begrenzten Denkmälern gemacht werden.

Mauerwerk läßt sich scharf begrenzen, wenn es erhalten ist, denn die waagerechte Widerstandsveränderung tritt in einiger Entfernung von der Mauerfront jäh hervor. Ein Graben, besonders einer mit geböschten Wänden, ist viel unbestimmter. Die Widerstandsmessungen werden seine Größe gewöhnlich unterbewerten. Diese Wirkung wird z. T. dadurch aufgehoben, daß das elektrische Feld des Apparates auf den Graben schon reagiert, bevor das Elektrodensystem über ihn hinweggeführt wird. In ähnlicher Weise wird die Breite von Mauerwerk unterschätzt, wenn man die Filterung anwendet. Wenn einfache Profile gemacht werden, wird das Ausmaß des Denkmals wahrscheinlich überschätzt.

Weil das von unserem Elektrodensystem verursachte Feld nicht kreisförmig ist, wird ein Merkmal, das parallel zu ihm liegt, das Feld mehr unterbrechen, als eines, das rechtwinklig dazu liegt. Daher ist die Veränderung im scheinbaren Widerstand geringer, wenn sich das Elektroden-

system einem Merkmal im rechten Winkel nähert. Im Falle langer linearer Objekte, wie Stadmauern, ist es ratsam, das Kartierungsnetz so zu legen, daß die Messungen auf parallelen Linien zu dem vermuteten Objekt durchgeführt werden. Im Fall kleinerer Denkmäler kann man diese Situation von vornherein nicht voraussehen. Die größere Empfindlichkeit in paralleler Richtung läßt das Ausmaß des Befundes in dieser Richtung übertrieben erscheinen und verringert sein scheinbares Ausmaß bei der Aufnahme im rechten Winkel. Wenn man aus der Diagonalen an das Objekt herangeht, hat man eine Situation, die zwischen beiden liegt. Die Verhältniszahl der Wirkung, die der Verfasser in Xanten, in Ladenburg und bei Modellexperimenten bestimmen konnte, beträgt ungefähr 1,5 : 1 zu Gunsten der Annäherung aus der Diagonalen. Das wird die Gestalt kleiner Denkmäler verzerren, und diese Verzerrung wird durch die Filterung noch weiter gesteigert. Bei großen Denkmälern wie Stadtmauern oder Umfassungsgräben eines Ringwalls ist dieser Effekt im Vergleich zur Größe des Denkmals zu vernachlässigen. In Fällen, wo das Denkmal nur am Rand auszumachen ist, kann eine Umorientierung des Gitternetzsystems eine beachtenswerte Verbesserung der Ergebnisse bringen.

Andere Elektrodenanordnungen als das Wenner-System, die von einigen Verfassern benutzt worden sind, haben den Nachteil, daß sie ihrer Natur nach bei der Darstellung der Werte unsymmetrisch sind und daß das Zentrum des Merkmales fast nie unter dem Zentrum des größten Wechsels im Widerstand liegt. Weiterhin ist der Grad der Verzerrung sehr schwer vorauszusehen, besonders bei asymmetrischen Elektrodenanordnungen, wie sie Schwarz gebraucht hat, während man bei der Wenner-Anordnung gewöhnlich eine einfache Proportion hat. Die Korrektur der Verzerrung, die durch die Elektrodenanordnung verursacht wird, kann noch verbessert werden, sobald die Grundanordnung des Elektrodensystems im Verhältnis zu dem Denkmal bekannt ist, entweder indem man bei der Notierung der ursprünglichen Werte diese in verschiedene waagerechte und senkrechte Skalen einzeichnet, oder besser, indem man diese Korrektur nach der Filterung macht. Wenn das Gitternetzsystem nicht parallel oder senkrecht zu dem Denkmal liegt, wird die Korrektur etwas komplizierter, aber sie nähert sich dem Nullwert bei einer Gitternetzorientierung von ungefähr 35° . Im allgemeinen ist die Korrektur eine spitzfindige Berechnung, die nur selten notwendig ist. Man tut jedoch immer gut daran, sich bei der Auswertung von Widerstandsmessungen daran zu erinnern, daß Kreise Ellipsen und Quadrate Rechtecke werden und daß scharfe Ecken notwendigerweise abgerundet werden. In Teil II dieses Aufsatzes wird sich der Verfasser ausführlich mit dieser Wirkung an Hand von Werten beschäftigen, die beim Experimentieren an Modellen gewonnen wurden.

Eine Fehlerquelle, die bei ausnehmend trockenem Wetter begegnet, wenn man den auf *Taf. 47* und *Abb. 1* abgebildeten Apparat benutzt, liegt im Gebrauch eines langen 5-Draht-Kabels begründet, das den Apparat mit den Elektroden verbindet. Dieses Kabel hat eine beträchtliche elektrische Kapazität zwischen seinen Drähten, und weil der Gossenapparat mit Wechselstrom arbeitet, der von einem Zehacker erzeugt wird, findet eine gewisse Übertragung zwischen den Kabeldrähten statt. Diese Wirkung ist minimal, wenn der Kon-

taktwiderstand der Elektroden zum Erdboden unter 2500 Ohm bleibt (wie das gewöhnlich der Fall ist). Aber er kann sich bei sehr trockenem Wetter störend auswirken. Am Ende des Sommers 1959 stieg der Kontaktwiderstand in vielen Feldern bei Xanten über 2500 Ohm und in Weiden, wo der Widerstand immer sehr hoch ist, stieg er sogar über 7000 Ohm. Messungen, die mit dem langen Kabel unter solchen Umständen gemacht wurden, waren nicht zu wiederholen, weil der Kontaktwiderstand bei zweimaligem Einschalten niemals der gleiche war. Es wurde dann nötig, ohne das lange Kabel zu arbeiten. Die Kapazität zwischen einfachen Drähten allein ist gewöhnlich zu klein, um zu Beginn der Messungen viel Wirkung zu zeigen. Aber da im Verlauf der Schaltungen die Drähte miteinander verflochten wurden, fing die Kapazität an, sich bemerkbar zu machen, so daß die Messungen am Ende einer Aufnahme wieder unzuverlässig wurden. In extremen Fällen ist es nötig, zu einer einfachen Vierelektrodenanordnung ohne Schalter zurückzukehren. Die meiste Zeit des Jahres, vor allem dann, wenn etwa eine Woche vorher Regen gefallen ist, machte sich diese Wirkung nicht bemerkbar, auch in den trockensten Böden nicht. In sehr trockenen Böden überschreitet jedoch bei weiten Elektrodenabständen der Kontaktwiderstand die Kompensationsfähigkeit des Apparates und das offenbart sich in der Schwierigkeit, auf der Zeigerskala Null zu finden. Die Vorschrift der Hersteller, der Zeiger möge von Null aus wenigstens 8 Teilstriche nach jeder Seite ausschlagen, wenn das Potentiometer durch seinen Gesamtbereich läuft, muß unbedingt befolgt werden.

Das Problem scheint nur in niedrigsten Widerstandsbereichen mit weiten Elektrodenabständen aufzutauchen. Eine Schaltung auf höherem Bereich (womit die Spannung erhöht wird, die für das Elektrodensystem verwendet wird) beseitigt nur bei vier Elektroden gewöhnlich die Störung, allerdings auf Kosten der Ablesegenauigkeit. Messungen über derselben Stelle am selben Tag oder an darauffolgenden Tagen (vorausgesetzt, daß es inzwischen nicht geregnet hat) sollten normalerweise bis zu 5% oder weniger einen gleichen Widerstandswert bringen. Wenn eine größere Abweichung vorliegt, handelt es sich vermutlich um Kontaktwiderstands-Störungen.

Im allgemeinen kann man Widerstandsmessungen auf stark bebauten Flächen mit vielen modernen Bodenstörungen nicht anwenden, auch da nicht, wo das Terrain in seiner Ausdehnung so begrenzt ist, daß nicht genug ungestörter Boden vermessen werden kann. Ungeeignet sind die Messungen ebenfalls für die Auffindung von Denkmälern, die nur als Bodenverfärbungen sichtbar sind, denn normalerweise ist die Widerstandsabweichung zu klein, um festgestellt zu werden. Z. B. zeigten Messungen, die direkt über handkeramischen Gruben in Müddersheim angestellt wurden, daß die Grube 10% weniger Widerstand als der umgebende Löß hatte. Aber diese Gruben lagen unter fast 1 m Schwemmlern und waren daher trotz der großen Einheitlichkeit des Lößlehm Bodens kaum von oben festzustellen. In sumpfigem Terrain sind die Widerstandsmessungen grundsätzlich erfolglos, außer wenn man nach sehr kompaktem Mauerwerk in sehr gutem Erhaltungszustand sucht. Unpraktisch ist es, Messungen in dichtem Wald oder da, wo viel Gestrüpp ist, durchzuführen. Man braucht zu viel Zeit, um die Kabel zu entwirren. Die

Wurzeln von weit voneinander entfernt stehenden Bäumen scheinen allerdings eine geringe Wirkung hervorzubringen. Dem Verfasser gelang es, den Verlauf einer römischen Wasserleitung zu einer Villa in dem hügeligen Gelände des Ahrtales zu verfolgen, obwohl es dort zahlreiche Bäume gab. Die Widerstandsmessungen bringen ferner dürftige Ergebnisse bei windverwehtem Sand. Das beruht auf dem hohen Kontaktwiderstand, der zu ungleichen Ergebnissen führt, und auch auf den Feuchtigkeitsmulden, die sich höchst verwirrend auswirken. Am befriedigendsten ist für die Widerstandsmessung ein feinkörniger tiefer, gleichförmiger Boden von mäßiger Feuchtigkeit, der weder stark bearbeitet noch Weideland ist, der von modernen Störungen frei und hauptsächlich in große Felder aufgeteilt ist, so daß nur eine einzige Feldfrucht und möglichst keine Feldgrenze begegnet. Ein ebener Verlauf des Landes ist nicht unbedingt notwendig, obwohl ein scharf unterbrochenes Terrain schwierige Interpretationsprobleme aufwirft, wenn Gebiete mit ausnehmend feuchtem oder trockenem Inhalt in kurzen Abständen auftreten. Die Filterung ist alldem aber gewöhnlich gewachsen, extremste Fälle ausgenommen.

Die Wirtschaftlichkeit der Widerstandsaufnahme.

Widerstandsaufnahmen durchzuführen, ist eine ausnehmend wirtschaftliche Methode, wenn man sich über einen Befund vor oder anstelle einer Grabung vergewissern will. Die Gesamtkosten der Ausrüstung, die das Rheinische Landesmuseum verwendet, betragen – abgesehen von der Tatsache, daß das Zubehör vom Verfasser hergestellt wurde – weniger als 500,- DM. Ihre Lebensdauer kann man auf mehr als 10 Jahre ansetzen. Der Apparat kann von zwei ungelerten Arbeitern bedient werden. Ungefähr 1200 Meßpunkte können an einem einzigen Tag bestimmt werden und je nach ihrer Anordnung kann damit eine recht große Fläche oder eine große Anzahl von Profilen aufgenommen werden. Die Messungen können unter Anwendung geeigneter Vorsichtsmaßnahmen in allen Jahreszeiten gemacht werden. Allerdings sind wohl die besten und am leichtesten erhältlichen Ergebnisse diejenigen, die direkt nach der Ernte bis zu Anfang des Winters gemacht werden, und dann wieder die im Frühjahr, bevor die Feldfrucht kräftig zu wachsen beginnt. Für kleinere Denkmäler genügt oft ein Tag, wenn die Arbeiter vorher geschult worden sind. Für große Denkmäler ist verhältnismäßig mehr Zeit nötig. Die Messungen bringen natürlich keine Funde ein, und darin stehen sie, obwohl sie viel billiger sind, einem Suchschnitt nach. Aber wo die Erlaubnis, den Bagger zu gebrauchen, schwer zu bekommen ist, bietet die Widerstandsmethode einen praktischen Ausweg. Dem Verfasser ist es nie verwehrt worden, seine Messungen zu machen, und wenn man vorsichtig ist und nicht auf bestelltes Land geht, so daß etwa Feldfrüchte beschädigt werden, dann wird auch nie Schadenersatz gefordert. Wenn die Messungen auf bestelltem Land durchgeführt werden müssen, können einzelne Profile, die man an den Feldgrenzen entlang zieht, wobei man mehrere verschiedene Elektrodenabstände gebraucht, alle Ernteschäden vermeiden. Diese Messungen bieten oft schon die genügende Information. In Gebieten, wo große Felder nicht überwiegen, ist diese Methode oft die einzig

praktische. Die Geldausgaben für die Ausrüstung sind viel niedriger als für ein Protonen-Resonanz-Magnetometer, das allerdings viele Arten von Denkmälern aufnehmen kann und auch bei Wetterbedingungen zu benutzen ist, die für die Widerstandsmethode ungeeignet sind. Die beiden Instrumente ergänzen sich. Wenn man mit der Widerstandsmethode anfängt, hat man schon eine nützliche Schulung für das elegantere und teurere Magnetometer.

A n h a n g

Arbeitsweise des Meßapparates.

Der Gossen-Erdungsmesser, den der Verfasser als höchst befriedigend erprobt hat, arbeitet wie folgt:

Von einer $4\frac{1}{2}$ -Volt-Trockenbatterie speist ein Zerhacker einen Transformator, der Spannung hervorbringt, die grob gesprochen, die Form einer Rechteckwelle hat, und die durch Abgriffe auf der Sekundärwicklung von 6 bis 300 Volt (ohne Belastung) ausgewählt werden kann (gerechnet von Spitze zu Spitze). Diese rechteckige Welle geht von einer Seite der Sekundärwicklung des ersten Transformators aus durch die Primärwicklung eines zweiten Transformators zu einer äußeren Elektrode, und von der anderen Seite der ersten Sekundärwicklung direkt zu der anderen Außenelektrode. So wird eine rechteckige Welle von ungefähr 100 Hz. (6–300 Volt) auf den Erdboden als Lastwiderstand übertragen und damit ein Strom verursacht, der durch den Erdboden fließt. An den beiden inneren Elektroden tritt deshalb eine Spannung auf, die dem Produkt aus durchfließendem Strom und Bodenwiderstand zwischen diesen Elektroden gleich ist. Die Spannung, deren Phase um 180° verschoben ist, wird auf ein Potentiometer gegeben. Der Schleifer des Potentiometers wird zu einem Pol eines $4\mu\text{A}$ -Galvanometers geführt. Die Spannung, die von den inneren Elektroden abgegriffen wird, liegt am anderen Anschluß des Galvanometers. Ein Kontakt auf dem Zerhacker richtet den verwendeten Strom für den Zeiger, so daß der Zeiger nur Ströme registriert, die mit dem Zerhacker synchronisiert sind. Ein Sperrkondensator hindert schleichende Direktströme daran, den Zeiger zu erreichen. Wenn das Potentiometer so eingestellt wird, daß der Zeiger auf Null steht, ist die Spannung am Ausgang des Potentiometers derjenigen gleich, die in den inneren Elektroden induziert wird, und in diesem Stromkreis fließt kein Strom. Daher kann sich innerhalb gewisser Grenzen der Kontaktwiderstand der inneren Elektroden nicht auswirken. Da die Spannung, die im Boden induziert wird, eine Funktion des erzeugten Stromes und des Bodenwiderstandes ist, und da die Spannung, die auf das Potentiometer gelangt, vom Fließen dieses selben Stromes durch die Primärwicklung des Transformators abhängt, heben sich die beiden Ströme gegenseitig auf, und der vom Potentiometer geleistete Widerstand ist gleich dem Widerstand zwischen den inneren Elektroden, ohne Nebenwirkung von Kontaktwiderständen irgendeiner Elektrode. Auf Grund der rechteckigen Wellenform und dem Funken an den Zerhackerkontakten kommen die alternierenden Komponenten zu recht hoher Frequenz. Deshalb treten Reaktanzen

im Boden auf, und daher ist der Apparat für Messungen in solchen Tiefen nicht mehr geeignet, wo diese bedeutend werden. Die praktische Grenze liegt bei ungefähr 10 m Tiefe, was für die meisten archäologischen Zwecke mehr als genug ist. Davon abgesehen, ist die Genauigkeit nur durch die Potentiometergenauigkeit begrenzt, und durch die Präzision, mit der Null eingestellt wird, da davon die Kompensation der Kontaktwiderstände abhängt. Wenn der Zeiger in voller Skalenbreite in Nicht-Null-Stellung ausschwingt, sind die Kontaktwiderstandsfehler geringer als die Herstellungsfehler im Potentiometer und der Skala, und diese werden geringer als 2% des Gesamtskalenwertes. Um möglichst genau zu sein, muß man immer den niedrigsten Skalenbereich wählen, der den gemessenen Wert noch anzeigen kann.

Die Widerstandsformel.

Wir leiten die benutzte Widerstandsformel, die Wenner-Formel, nach C. A. Heiland ab. Die Ableitung ist allgemein und kann für jede Elektrodenanordnung verwendet werden.

Der Widerstand dR einer Halbkugelschale vom Radius r , von der Dicke dr und vom spezifischen Widerstand ρ ist nach elementargeometrischen Betrachtungen:

$$dR = \frac{\rho dr}{2\pi r^2}$$

Von der Innen- zur Außenfläche dieser Schale fällt das Potential um einen Betrag

$$-dV = IdR$$

Die Integration dieses Ausdrucks zwischen zwei Elektroden – Halbkugelflächen der Radien r und r' – ergibt

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r'} \right)$$

Das Potentialgefälle zwischen zwei Punkten, die die Abstände r_1 und r_2 bzw. R_1 und R_2 von den Elektroden haben, ist dann

$$V_P - V_R = V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Daher ist der spezifische Widerstand

$$\rho = 2\pi \frac{V}{I} \frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}$$

Das ist ganz allgemein und gilt für jede Anordnung der Elektroden. Bei der Wenner-Anordnung ist $r_1 = R_2 = a$ und $r_2 = R_1 = 2a$, also ist dann

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I}$$

Auswahl der Gruppenbreite.

Fisher⁸⁾ hat festgestellt, daß der Einfluß der Gruppierungen bei einer Breite von $\frac{1}{4}$ der Standardabweichung ausreicht, um insgesamt eine mittlere Genauigkeit von 1% aufrechtzuerhalten. Da unsere Werte im Mittel nicht genauer als 2% sind, sind die Schwankungen bei einer Gruppenbreite unter $\frac{1}{3}$ der Standardabweichung bedeutungslos für die Genauigkeit der Meßwerte und können daher bei der Wahl der Gruppenbreite – also der Schrittweite für die Umrißkurven – vernachlässigt werden. Für schnelle Verfahren zur Berechnung der Standardabweichung und des Mittelwertes einer großen Menge von Zahlen wird der Leser auf irgendein Standardwerk über Statistik verwiesen. Fisher gibt ein besonders einfaches Verfahren an; diesem ist der Autor gefolgt. Die Berechnung der beiden Werte für 500 Messungen kann mit Hilfe einer gewöhnlichen elektrischen Tischrechenmaschine in weniger als 10 Minuten erledigt werden, wenn die Meßwerte einmal tabelliert sind.

Ableitung eines numerischen Filters.

Wir folgen Dean in der Ableitung eines numerischen Filters zur Analyse unserer Widerstandsmessungen⁹⁾.

Der Eingang $\epsilon_i(t)$ und der Ausgang $\epsilon_o(t)$ eines linearen Filters sind durch die folgende Faltung verknüpft:

$$(1) \quad \epsilon_o(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \epsilon_i(t-\tau) W(\tau) d\tau$$

wobei die Gewichtsfunktion $W(t)$ die Reaktion des Filters auf einen Impuls darstellt.

Der allgemeine Ausdruck, der eine Zeitfunktion in eine Frequenzfunktion überführt, ist die Fourier-Transformation

$$(2) \quad \text{und} \quad E(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \epsilon(t) e^{-i\omega t} dt$$

$$\epsilon(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E(\omega) e^{+i\omega t} d\omega$$

wobei $\frac{\omega}{2\pi}$ die Frequenz in Zyklen pro Zeiteinheit angibt. Die Fourier-Transformation des Faltungsintegrals liefert eine vereinfachte Beziehung zwischen Eingang und Ausgang, ausgedrückt in Funktionen von ω :

$$(3) \quad E_o(\omega) = E_i(\omega) Y(\omega)$$

$E_o(\omega)$, $E_i(\omega)$, $Y(\omega)$ sind die Fourier-Transformierten von $\epsilon_o(t)$, $\epsilon_i(t)$, $W(t)$ in dieser Reihenfolge.

⁸⁾ R. A. Fisher, *Statistical Methods for Research Workers* (13th ed. Edinburgh 1958) 50.

⁹⁾ W. C. Dean, *Frequency Analysis for Gravity and Magnetic Interpretation*. Geophysics 23, 1958, 97 ff.

Ein Zeitbereichsfilter simuliert die Wirkungsweise eines Filters durch Approximation des Faltungsintegrals. Ein Typ ist

$$(4) \quad \epsilon_0(t) \cong \sum_n W(n\Delta t) \epsilon_i(t - n\Delta T) \Delta T$$

wobei τ durch die diskreten Werte $n\Delta T$ ersetzt worden ist. – Das entspricht der Anwendung eines Koeffizienten-Schemas auf ein Widerstandsprofil. Daher ist ein solcher Vorgang eine Faltung. Da jede Faltung durch Fouriertransformation auf (3) zurückgeführt wird, kann die Frequenzanalyse durch Anwendung von Koeffizientenschemata ausgeführt werden.

Der Fall von 2 Variablen stellt eine Erweiterung dar. Die Fouriertransformation für 2 Variable lautet:

$$(5) \quad E(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \epsilon(x, y) e^{-i(ux + vy)} dx dy$$

$$\epsilon(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E(u, v) e^{+i(ux + vy)} du dv$$

Das Faltungsintegral für 2 Variable ist:

$$(9) \quad \epsilon_0(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \epsilon_i(x - \alpha, y - \beta) W(\alpha, \beta) d\alpha d\beta$$

und die Frequenzbeziehung zwischen Ein- und Ausgang lautet für 2 Variable:

$$(7) \quad E_0(u, v) = E_i(u, v) Y(u, v)$$

wobei $\frac{u}{2\pi}$ und $\frac{v}{2\pi}$ die Frequenzen in x- bzw. y-Richtung sind, gemessen in Zyklen pro Einheitslänge.

Die Grenzfrequenz ist durch die Dichte der Messungen bestimmt und trägt einen halben Zyklus pro kleinste Einheit. Keine höheren Frequenzen werden benötigt, um die Meßergebnisse vollständig zu erfassen.

Um die Frequenzreaktion eines Koeffizientenschemas darzustellen, beginnen wir mit dem einfachsten Fall, in dem der Koeffizient am Ursprung einen konstanten Wert hat und sonst Null ist. Dieses Schema ist trivial, da die Ausgangsfunktion bis auf einen konstanten Faktor gleich der Eingangsfunktion ist. Die Faltung mit einem solchen Schema ist einem Filter äquivalent, das keine Frequenz bezüglich einer anderen abdämpft, da Ein- und Ausgang gleich sind. Daher muß die Frequenzreaktion konstant sein, und zwar gleich dem konstanten Verstärkungsfaktor (Dean S. 119).

Wenn wir dieses Koeffizientenschema (die Gewichtsfunktion) $W_0(x, y)$ nennen, wobei

$$(8) \quad W_0(x, y) \begin{cases} \neq 0 & \text{falls } x = y = 0 \\ = 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

dann ist also seine Frequenzreaktion durch seine Fouriertransformierte gegeben und ist gleich der Konstanten K .

$$(9) \quad Y_0(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_0(x, y) e^{-i(ux + vy)} dx dy = K$$

Angenommen es sei eine Funktion $f(x, y)$ vorgelegt, mit der Fouriertransformierten $g(u, v)$:

$$(10) \quad g(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) e^{-i(ux + vy)} dx dy$$

Wir suchen nun die Wirkung einer Verschiebung der Funktion $f(x, y)$ nach $f(x-x_0, y-y_0)$ auf die Frequenzreaktion. Wir multiplizieren mit $e^{+i(ux_0 + vy_0)}$ $e^{-i(ux_0 + vy_0)} = 1$ und erhalten

$$(11) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x-x_0, y-y_0) e^{-i(ux + vy)} dx dy = \\ e^{-i(u x_0 + v y_0)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x-x_0, y-y_0) e^{-[u(x-x_0) + v(y-y_0)]} dx dy = \\ e^{-(u x_0 + v y_0)} g(u, v)$$

Daher ist die Frequenzreaktion eines einzelnen Koeffizienten an der Stelle (x_0, y_0) :

$$(12) \quad K e^{-i(u x_0 + v y_0)}$$

Stellen wir diese Betrachtung für mehrere Punkte an, so ergibt sich die Frequenzreaktion eines allgemeinen Koeffizientenschemas c_{mn} :

$$(13) \quad Y_c(u, v) = \sum_m \sum_n c_{mn} e^{-i(u m \Delta x + v n \Delta y)}$$

worin $\Delta x, \Delta y$ die Schrittweiten in x - und y -Richtung sind. Im Falle einer einzigen Variablen haben wir:

$$(14) \quad Y_c(u) = \sum_m c_m e^{-i u m \Delta x}$$

Die Koeffizientenschemata, die wir in unserer Widerstandsanalyse verwenden wollen, sind symmetrisch. Daher wird $W_m = W_n$ und die Frequenzreaktion wird eine gerade Funktion:

$$(15) \quad Y_c(u) = W_0 + 2 \sum_{n=1}^N W_n \cos(un \Delta x)$$

Diese Cosinusreihe ist im wesentlichen eine Fourierreihe. Wie die Fourierreihe ist sie periodisch; die Periode ist gleich der der Cosinus-Grundkomponente $\cos(u \Delta x)$, nämlich

$$-\frac{\pi}{\Delta x} \leq u \leq +\frac{\pi}{\Delta x}$$

Daher ist die höchste Frequenz, bei der man noch die Frequenzreaktion des Koeffizientenschemas bestimmen kann:

$$u_{\max} = 2\pi f_{\max} = \frac{\pi}{\Delta x}$$

Im Falle des Filters, dessen Schablone auf Seite 295 gegeben ist, liegen die Filterpunkte bei den folgenden Koordinaten:

$$\begin{aligned} x &= \pm 2, \pm 5 \\ x &= \pm 2, \pm 5 \end{aligned}$$

Die Gewichte sind für alle Punkte gleich und zu deren Anzahl reziprok. Daher ist $W_n = 1/8$.

Auf den Hauptachsen und den Diagonalen ist die Frequenzreaktion, wie wir mit Hilfe von Gleichung 15 zeigen können:

$$(16) \quad Y_c(u, v) = 1 - \frac{1}{2} \cos(5u) - \frac{1}{2} \cos(2v)$$

Da wir mit Objekten von endlicher Größe im Erdboden zu tun haben, wird die Abszisse auf die halbe Periode anstatt auf die Frequenz bezogen, nämlich: $u = 2\pi f \cdot \frac{1}{f} = 2L$ daher $n = \frac{\pi}{L}$ wobei L die Halbperiode ist.

$$(16) \text{ wird} \quad Y_c(L) = 1 - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{5\pi}{L}\right) - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{L}\right)$$

Aus der graphischen Darstellung *Abbildung 8* kann man ersehen, daß die Reaktion für Breiten zwischen 1 und 10 Metern um die Einheit herum schwankt und Werte in der Nähe von 2 Metern leicht verstärkt (die gesuchte römische Stadtmauer). Werte über 10 Meter (von geologischen Einflüssen hervorgerufen) werden stark abgedämpft, um etwa 12 Dezibel pro Oktave. In diesem Teil der Kurve approximiert die Filtercharakteristik die zweite Ableitung der Meßdaten. Störungen mit großer Periode werden auf ein vernachlässigbares Maß herabgedrückt.

Die Reaktion außerhalb der Achsenrichtung wird geringfügig abweichen.

Bei der praktischen Anwendung muß eine gewisse Zahl von Eintragungen an den Rändern der Karte gefiltert werden, ohne daß für einige Stellen der Filterschablone Meßergebnisse vorliegen. Nach Gleichung (15) ist es klar, daß die Reaktion dieselbe bleibt, wenn diese Stellen symmetrisch zum Mittelpunkt verteilt sind, vorausgesetzt, daß die Gewichte entsprechend erhöht werden; so daß, wenn z. B. sechs Positionen besetzt sind, W_n gleich $1/6$ wird. Wenn die Positionen asymmetrisch zur Hauptachse um den Mittelpunkt besetzt sind, so zeigt Gleichung (13), daß die Frequenzreaktion keine gerade Funktion mehr ist, sondern Cosinusglieder mit reellen Koeffizienten und auch Sinusglieder

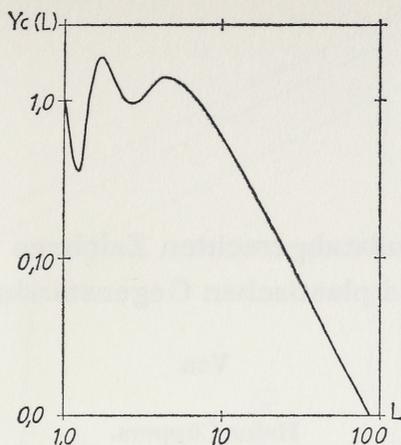


Abb. 8. Eingangs- und Ausgangswerte eines (2,5) Filters für Werte, die bei 1 m-Abständen im Maßstab 1 : 100 in Längs- und Diagonalrichtung gewonnen wurden.

mit imaginären Koeffizienten enthält. In extremen Fällen kann die imaginäre Komponente sehr wohl die reelle übersteigen, und daher sollte man sich stets genügend viele Meßwerte in ausreichender Entfernung von einem Denkmal verschaffen, so daß sich die Filterung nur auf reelle Glieder in der Nähe des Denkmals selbst bezieht. Das bedeutet, daß man mindestens zehn Messungen von allen Seiten auf ungestörtem Boden für ein Filter von den angegebenen Maßen machen muß.