

Einleitung

Die Archäologie versucht, Spuren menschlichen Wirkens in der Vergangenheit nachzuweisen und diese zu interpretieren. In der Angewandten Geophysik versucht die Geoelektrik, aus Messungen auf die räumliche Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes zu schließen. Da ein spezifischer elektrischer Widerstand jedem Material innewohnt, ist das Wirken des Menschen immer auch verbunden mit einer Veränderung der räumlichen Verteilung des Widerstandes und über deren Nachweis nachvollziehbar.

In der Archäometrie, der Untersuchung archäologischer Objekte mittels naturwissenschaftlicher Methoden, finden geophysikalische Methoden seit über einem halben Jahrhundert Anwendung. Dabei kann die Geoelektrik als Wegbereiter angesehen werden¹. Geoelektrische Messungen, Abbildung 1,

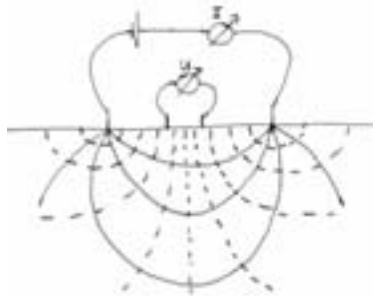


Abbildung 1: Für eine geoelektrische Messung wird über zwei Elektroden dem Boden ein Stromsystem (durchgezogene Linien) aufgeprägt. Orthogonal zu diesem bildet sich ein Potentialfeld (gestrichelte Linien) aus, das über weitere zwei Elektroden (stromlos) vermessen wird. Aus gemessener Stromstärke I und Potential-Differenz (Spannung U) kann zusammen mit dem Konfigurationsfaktor der Elektroden-Anordnung, Abschnitt 1.1.3, der Widerstand berechnet werden, den der Boden (scheinbar) besitzt.

¹ Nach Wynn (1986) wurde die Geoelektrik in der Archäometrie in England bereits 1946 angewendet, in Deutschland wurde sie forciert von Scollar (siehe Scollar et al., 1990).

dienten bisher meist zur Kartierung. Eine Kartierung erfaßt Variationen des Bodenwiderstandes in der Fläche; im resultierenden ‘Widerstands-Grundriß’ werden im Boden verborgene Strukturen (Mauern, Gräben ...) sichtbar. Auf dem Gebiet der Kartierung hat die Magnetik nach der Entwicklung schnell messender Magnetometer hoher Auflösung in den letzten beiden Jahrzehnten der Elektrik den Rang abgelaufen, derzeit reüssiert Georadar als Methode hohen Meßfortschritts. Zwar sind ‘Magnetik-Grundrisse’ in aller Regel schwerer zu lesen² als ‘Widerstands-Grundrisse’, die Meßzeit-Ersparnis wiegt jedoch schwerer. Daher werden elektrische Kartierungen meist nur noch dort vorgenommen, wo magnetische Kartierungen nicht zum Erfolg führen und die Beschaffenheit des Geländes den Einsatz des Georadars nicht zuläßt.

Auf einem anderen Gebiet kann die Magnetik systemimmanent³ nicht mit der Elektrik mithalten: beim Erstellen vertikaler Boden-Schnittbilder (vergleichbar den bekannten Computer-Tomogrammen in der medizinischen Diagnostik). Dies Verfahren wurde zunächst bei der Erkundung von Bodenschätzen eingesetzt, fand aber auch in der Archäometrie schon in den 1960er Jahren vereinzelt Anwendung. Als gegen Ende der 1980er Jahre computergesteuerter Multi-Elektroden-Geoelektrik-Apparaturen aufkamen, die eine Vielzahl von Messungen in kurzer Zeit vorzunehmen gestatten, entwickelten sich die ‘Widerstands-Schnittbilder’ zu einer aussagekräftigen Untersuchungsmethode in der Archäometrie: In den Schnittbildern lassen sich neben den aus Kartierungen bekannten Positionen und Längen von Mauerzügen auch deren Breiten und Tiefen zuverlässig abschätzen und Aussagen über mögliche Fundamentierungen treffen – und dies verglichen mit archäologischen Grabungen in verhältnismäßig kurzer Zeit und ohne zerstörerische Eingriffe. Damit bekommt die Archäologie ein weiteres, wichtiges Werkzeug in die Hand, großflächige Grabungen zu verhindern, die weder aus Kostengründen noch aus denkmalschützerischen Erwägungen akzeptabel sind, da sie zukünftige Forschungen mit neuen, verbesserten Untersuchungsmethoden erschweren oder unmöglich machen.

² aufgrund der Dipol-Charakteristik des durch die Anomalie erzeugten Störfeldes, z.B. Kuhnke & Weidelt (1989), Fieberg et al. (1995) und Hainz, V., 1997: Interpretation magnetischer Anomalien in der Archäometrie. Diplomarbeit am Institut für Geophysik und Meteorologie. Braunschweig.

³ Die Magnetik ist eine *passive Methode*: eine ‘magnetische Anomalie’ stört geringfügig das lokale Erdmagnetfeld, es kann nur diese *konstante* Änderung gemessen werden. Hingegen ist die Elektrik eine *aktive Methode*: *vergrößert* man den Abstand zwischen den stromeinspeisenden Elektroden, so *dringt* das Stromsystem *tiefer* in den Boden *ein* und ermöglicht auch die vertikale Auflösung der Widerstands-Anomalie. Das in der Geologie sehr erfolgreiche, aktive Verfahren der seismischen Tomographie wird in der Archäometrie nur vereinzelt angewendet, z.B. Karastathis & Papamarinopoulos (1997).

Bisher konnten die ‘Widerstands-Schnittbilder’ bei einer wichtigen Klasse archäologischer Objekte nicht in dem gewünschten Maße überzeugen: bei dem Nachweis von Grabenwerken bzw. Erdwerken. Unter den Erdwerken erfreuen sich einiger Bekanntheit insbesondere die kreisförmigen Erdwerke der Steinzeit, die in den letzten Jahren zunehmend auch in Nord- und Mittelddeutschland entdeckt wurden. Bei diesen handelt es sich um Gräben, die durch Erdaushub entstanden und entweder über lange Zeit erosiv verfüllt oder nach ihrer Errichtung innerhalb kurzer Zeit intentionell mit dem benachbart abgelagerten Aushub wieder eingeebnet wurden. Bei deren Nachweis besteht das Problem in dem nur geringen Kontrast zwischen ungestörtem Boden und mit dem gleichen Bodentyp praktisch gleichen Widerstandes wiederverfülltem Graben. Hoffnung auf Nachweis dieser Objektklasse besteht durch Messungen der Induzierten Polarisation (IP): Der Effekt der Induzierten Polarisation wurde schon in der Anfangszeit der Geoelektrik beobachtet, als nach dem Ausschalten des Stromes die Meßspannung nicht sofort zusammenbrach, sondern eine Restspannung erst mit der Zeit abnahm. Während der IP-Effekt bei der Erzerkundung sehr stark ausgeprägt sein kann – die Ursachen liegen dann in elektrochemischen Prozessen –, ist er bei (Locker-) Sedimenten zumeist klein und wurde lange Zeit übersehen. Er wird hier, vereinfacht ausgedrückt, durch die ‘Lockerheit’ des Materials beeinflusst. Mit der Entwicklung der Meßtechnik in den letzten Jahrzehnten wurde auch dieser IP-Effekt zugänglich und kann u.a. durch Wechselstrommessungen über die (mess-) frequenzabhängige Phasenverschiebung von (typisch) nur einem halben Grad als komplexe Wechselstrom-Impedanz zuverlässig und preiswert bestimmt werden. In den 1960er Jahren wurden im Rheinland *Bodenkundliche Untersuchungen an archäologischen Objekten, die durch Luftbild-Aufnahmen entdeckt wurden* (Strunk-Lichtenberg, 1965) angestellt. Die Entdeckung von archäologischen Objekten durch Luftbilder beruht meist auf Bewuchs-Anomalien, siehe Abb. 2. Bei den archäologischen Objekten im Rahmen der bodenkundlichen Untersuchungen handelte es sich um Gräben verschiedener historischer Epochen (bronzezeitlich, römisch) in unterschiedlichen Bodentypen (von Sand bis Lößlehm). Vergleichende Untersuchungen zur Bodenbeschaffenheit ergaben Unterschiede zwischen dem Grabenmaterial und dem ungestörten Umgebungsmaterial z.B. hinsichtlich Korngrößenverteilung und Porosität. Damit lassen diese Untersuchungen den Nachweis von Erdwerken mittels niederfrequenter Wechselstromgeoelektrik erhoffen und inspirierten dessen Versuch im Rahmen der vorliegenden Arbeit – vergleichbare Bodentypen und Erdwerke von der Steinzeit bis ins Mittelalter, weniger aus römischer Epoche, lassen sich auch im Braunschweiger Land finden.

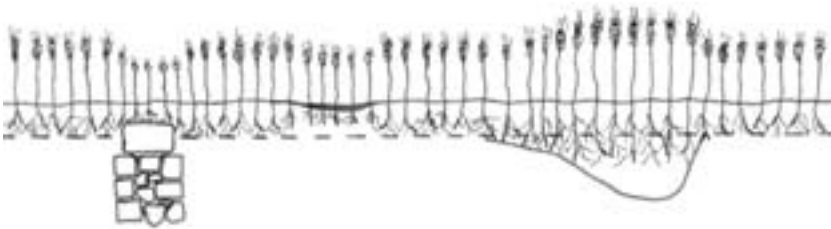


Abbildung 2: Einige Ursachen für das Entstehen von Bewuchs-Anomalien am Beispiel von Getreide: Im Boden können sich die Wurzeln im aufgelockerten Pflughorizont entwickeln, ohne in den darunterliegenden, festeren gewachsenen Boden einzudringen. Die Wurzelbildung wird durch Hindernisse (links, Mauer) oder verfestigten Boden (Mitte, z.B. Fahrspur) beeinträchtigt, hingegen wird sie befördert durch aufgelockerte Bereiche (rechts, lockerere Grabenverfüllung im Vergleich zum gewachsenen Boden). Eine Bewuchs-Anomalie hinsichtlich der Pflanzenhöhe bildet sich dann z.B. aufgrund der unterschiedlichen Nährstoff- und Wasserversorgung aus: Im Bereich des Grabens kann mehr Wasser gespeichert und den Pflanzen zur Verfügung gestellt werden als im normalen Bereich oder gar im Bereich der Mauer. Insbesondere nach längeren Trockenperioden ist zu Beginn der Reifezeit die Bewuchs-Anomalie aufgrund unterschiedlicher Reifegrade zu beobachten: Während die normalwüchsigen Pflanzen reifen, befinden sich Pflanzen in anomalen Bereich weiter im Wachstum (über Gräben: Abb 6.29, Abb 6.35 oder Abb 6.22) bzw. im Zustand der Notreife (über Fundamenten: Abb 6.41).

Die für die Verwirklichung der Projektidee sinnvollen **Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit** lassen sich subsumieren unter den Vorhaben

1. der effizienten Datenaufnahme,
2. der Sicherstellung der Datenqualität und
3. der Erarbeitung eines Inversions⁴-Verfahrens mit dem Ziel,
4. die Aussagemöglichkeiten der Wechselstrom-Impedanz zu evaluieren.

Die Notwendigkeit **der effizienten Datenaufnahme** ist im Prinzip selbstverständlich. Die explizite Artikulierung des Vorhabens hier wird verständlich, betrachtet man eine, auch in der geoelektrischen Literatur weit verbreitete Vorgehensweise: spezielle Inversions-Verfahren werden gekoppelt an Pseudosektionen spezieller Elektroden-Konfigurationen, die bei verschiedenen Modellklassen zu untersuchender Objekte unterschiedlich erfolgreich sind. Während einige Pseudosektionen die im Boden verborgenen

⁴ Unter einer 'Inversion' versteht man in der Geoelektrik, ein Bodenwiderstandmodell zu 'finden', das die gemessenen geoelektrischen Daten befriedigend erklärt.

Strukturen schon in den Meßdaten akzeptabel abbilden, ohne daß dies Ergebnis durch eine Inversion deutlich zu verbessern wäre, erweisen sich andere Pseudosektionen in den Meßdaten als sehr unübersichtlich, führen aber zu hervorragenden Inversionsergebnissen. Folglich müßten für ein zu untersuchendes Objekt viele verschiedene Pseudosektionen gemessen werden. In der vorliegenden Arbeit wird in Kapitel 2 die Meßwertaufnahme nach dem Konzept linear unabhängiger Basismessungen optimiert; sie erlauben es, beliebige Elektroden-Konfigurationen zu berechnen, ohne diese selbst messen zu müssen. Eine Neuerung stellen auch die Überlegungen zu einer ‘Konsistenten Basis’ und einem ‘Konsistenten Datensatz’ dar, Abschnitt 2.7: Wiederholungsmessungen an einer *einzelnen Elektroden-Konfiguration* dienten bisher dazu, um mittels statistischer Methoden – meist durch Mittelwertbildung bzw. Bestimmung der Standardabweichung – den Fehler für ein Meßdatum einer einzelnen Elektroden-Konfiguration zu reduzieren bzw. zu bestimmen; die Einführung von Basismessungen ermöglicht es nun, die lineare Abhängigkeit zusätzlicher Messungen zu einer Verringerung des Datenfehlers und zu einer Bestimmung eines Datenfehlers für den *gesamten Datensatzes* als ein Maß für dessen Konsistenz heranzuziehen.

Der Aspekt **der Sicherstellung der Datenqualität** wird zunächst motiviert durch die zu erwartenden, nur geringen Unterschiede zwischen Anomalie und Substrat und ist an mehreren Stellen zu berücksichtigen: Die Basismessungen werden derart gewählt, daß sie die Leistungsfähigkeit der verwendeten Meßtechnik optimal ausnutzen. In der Archäometrie sind kleine, oberflächennahe Objekte zu untersuchen – verglichen mit Aufgaben in der Erzerkundung oder der Ingenieur- und Umweltgeophysik. Aufgrund der dafür notwendigen geringen Elektrodenabstände sind die Elektroden nicht mehr als punktförmig anzusehen. Daher wird in Abschnitt 1.1.2 und Abschnitt 6.1.5 das Verhalten realer Elektroden berechnet. Nachdem in ihrer Größe bekannte, systematische Fehler korrigiert sind, siehe Abschnitt 6.1.2, und mit der Bestimmung einer ‘Konsistenten Basis’ das normalverteilte Rauschen reduziert wurde, Abschnitt 2.7, werden auch noch die Einflüsse der bei einigen Elektroden-Konfigurationen benötigten ‘Entfernten Elektroden’ herausgerechnet, ein horizontal geschichtetes Substrat zugrundegelegt, Kapitel 3.

Als ‘Wasser im Wein’ erweisen sich in Kapitel 4 ‘elektrodennahe Anomalien’, da sie als Einflußgrößen erkannt werden, die trotz bester Datenqualität die Aussagemöglichkeiten geoelektrischer Messungen begrenzen.

Bei der **Erarbeitung eines Inversions-Verfahrens** in Kapitel 5 wird insbesondere Wert auf die spezifischen Anforderungen in der Archäometrie gelegt: Bei archäologischen Objekten handelt es sich zumeist um scharf begrenzte, in sich homogene Anomalien, die in ein homogenes oder geschichtetes Substrat eingebettet sind. Bisherige Inversionsverfahren, so auch die im Rahmen dieser Arbeit zunächst benutzten Verfahren⁵, genügen diesen Anforderungen nicht, da sie eine homogene, scharf vom Substrat abgegrenzte Anomalie nur verschwommen, mit einem nicht-sprunghaften Übergang, abbilden. Das in Abschnitt 5.4 vorgeschlagene Inversionsverfahren der Struktur-Parameter-Inversion berücksichtigt die in der Archäometrie zu erfüllenden Anforderungen.

Um die **Aussagemöglichkeiten der Wechselstrom-Impedanz zu evaluieren**, wurden Messungen an archäologischen Objekten verschiedener Modellklassen vorgenommen. Während die Messungen im Braunschweiger Land auf den Nachweis von Erdwerken zielten, sollte mit den Messungen an archäologischen Stätten in der Türkei versucht werden, verschiedene Baumaterialien anhand ihrer ‘Fingerabdrücke’ in der elektrischen Impedanz zu unterscheiden. Damit zielen die Untersuchungen erstmals darauf ab, nicht-metallische archäologische Artefakte⁶ mittels IP bzw. niederfrequenter Wechselstromgeoelektrik zu erkunden.

⁵ die Simultane Iterative Rekonstruktionstechnik und das Verfahren nach Marquardt. Für die Simultane Iterative Rekonstruktionstechnik wurde auf das Programm von Kampke (Kampke, A., 1997. Modellierung und Inversion von Daten der induzierten Polarisierung für zweidimensionale Verteilungen der elektrischen Leitfähigkeit. Diplomarbeit am Institut für Geophysik und Meteorologie. Braunschweig.) zurückgegriffen. Dies Programm wurde für das Marquardt-Verfahren und die ‘Struktur-Parameter-Inversion’ entsprechend angepaßt.

⁶ vgl. Wynn (1986)