

27.1. Praxis geophysikalischer Feldmessung und Auswertung

Hier soll ein Überblick über die derzeit in der Archäologie am häufigsten eingesetzten geophysikalischen Verfahren gegeben werden. Praxisorientierte Informationen stehen dabei im Vordergrund, während die besprochenen vier unterschiedlichen Messverfahren nur kurz beschrieben werden. Es sollen damit zum einen Entscheidungshilfen, zum anderen Hintergrundinformationen gegeben werden, welches Verfahren wo eingesetzt werden kann, wo die Grenzen der Anwendbarkeit liegen, welche die Voraussetzungen für eine Prospektion sind, welche Informationen von Seiten des Grabungstechnikers dem Prospektor nützlich für die Planung sein können und wie er die Messkampagne unterstützend begleiten kann. Alle aufgeführten Anregungen sind Erfahrungswerte aus den knapp 300 Prospektionen des Landesdenkmalamts Baden-Württemberg.

27.1.1 Geophysik – wozu?

Der Einsatz geophysikalischer Verfahren für denkmalpflegerische Maßnahmen bietet sich vor allem dann an, wenn in relativ kurzer Zeit möglichst umfassende Informationen über ein noch nicht ausgegrabenes Objekt zur Verfügung gestellt werden müssen. Die Geophysik wird meist zur Inventarisierung und Dokumentation archäologischer Denkmale eingesetzt. Durch das „Sichtbarmachen“ archäologischer Strukturen, die nicht ausgegraben, sondern geschützt werden sollen, durch die genaue Bestimmung von Lage, Ausdehnung oder auch Tiefenerstreckung sowie die mögliche Erfassung innerer Strukturen von Einzelobjekten liefert die geophysikalische Prospektion dem Archäologen und Denkmalpfleger wichtige Informationen, die eine Eintragung als Denkmal wesentlich erleichtern können. Die Prospektion dient aber auch grabungsvorbereitenden oder -begleitenden Untersuchungen.

27.1.2 Unterschiedliche Messverfahren

Die Bandbreite unterschiedlichster Verfahren ist in der Geophysik groß. Folgende vier zerstörungsfreie Messmethoden werden in der Archäologie erfolgreich eingesetzt: Geomagnetik, Geoelektrik, Bodenradar und die elektromagnetische Induktion. Geomagnetik und Geoelektrik werden am häufigsten angewandt. In neuerer Zeit gewinnt das Bodenradar immer mehr an Bedeutung, während die elektromagnetische Induktion (noch) sehr zaghaft eingesetzt wird.

Einer der Grundsätze bei geophysikalischen Prospektionen für archäologische Belange heißt: flüchtig messen.

Die Interpretation ist umso eindeutiger und leichter durchzuführen, je größer die Messfläche ist (untere Grenze: etwa 30 m x 30 m bei der Geoelektrik, 20 m x 20 m bei der Geomagnetik und der elektromagnetischen Induktion, nur wenige Quadratmeter reichen hingegen bei Radarmessungen aus). Typische Fehlinterpretationen, wie sie unerfahrenen Firmen bei Messung einzelner, unabhängiger Profile immer wieder unterlaufen, lassen sich so weitgehend ausschließen.

Auch macht es wenig Sinn, in allzu großem Messpunktabstand zu prospektieren. Bewährt haben sich beispielsweise geoelektrische Messungen im 0.5 m/0.5 m oder 1 m/1 m Raster, geomagnetische Messungen im 0.25 m/0.25 m oder 0.5 m/0.5 m Raster. Mischraster, wie 0.5 m/1 m sind ebenfalls denkbar und werden häufig angewendet. Die Entscheidung über die Wahl des geeigneten Messrasters hängt nicht zuletzt auch von der Aufgabenstellung ab. Messpunktabstände sollten aber nie größer als 1 m gewählt werden.

27.1.3 Grundprinzip jeder Prospektionsmethode

Jedes Verfahren misst oder bestimmt eine physikalische Eigenschaft des Bodens oder der bodennahen Umgebung. Sind, bezogen auf die Empfindlichkeit des eingesetzten Messgerätes, genügend hohe Kontraste in den physikalischen Eigenschaften des Bodens und des in ihn gebetteten archäologischen Objekts vorhanden, kann der Befund durch die entsprechende Messmethodik und die Auswertung der Messdaten sichtbar gemacht werden. Ist der zu messende Kontrast geringer als das Auflösungsvermögen der verwendeten Apparatur, können keine Strukturen erfasst werden. Eine negativ erfolgte Prospektion ist also keineswegs ein Beweis dafür, dass keine archäologischen Strukturen *vorhanden* sind. Zudem sind externe Einflüsse auf die Messapparaturen möglich, die eine Prospektion stören oder unmöglich machen können (siehe 27.1.5).

27.1.4 Die Planung geophysikalischer Feldarbeiten

27.1.4.1 Wahl des geeigneten Verfahrens

Sie ist von vielen Faktoren abhängig, und es kann keine Faustregel angegeben werden, wann welches Verfahren die besten Ergebnisse liefern wird. Eine geeignete Kombination von zwei oder auch mehreren Verfahren kann hingegen als Garant für eine erfolgreiche Prospektion angesehen werden. Geomagnetik und Geoelektrik, oder Geomagnetik und Elektromagnetik ergänzen sich z. B. meist nahezu ideal. Der Grabungstechniker kann jedoch dem Prospektor die Entscheidung wesentlich erleichtern,

wenn er ihm Informationen über die zu erwartenden Strukturen und die Situation vor Ort vermittelt. Von Interesse sind vor allem:

- Lage des Gebietes (städtischer oder ländlicher Bereich). Liegt die Messfläche innerhalb dichter Bebauung, ist mit vagabundierenden Strömen der Technik (negative Beeinflussung der Geoelektrik) und künstlichen Magnetfeldern zu rechnen, die den Einsatz geomagnetischer Verfahren fast stets verhindern werden;
- zu erwartende archäologische Strukturen (Mauerwerk, Gräben und Gruben, Stein- oder Holz-/Erde-Archäologie, Öfen, Feuerstellen, gebrannte Ziegelsteine);
- Bedingungen vor Ort: Sumpfbereich (oft ungeeignet für das Bodenradar, bedingt geeignet für die Geoelektrik), geteerte Fläche, Metallzäune, stromführende Weidezäune, Hochspannungsleitungen, rezente Feuerstellen;
- derzeitige Flächennutzung: Ackerland, Wiese, Obst- oder Weinanbau, Wald (durchschnittlicher Baumabstand?);
- ehemalige Nutzung des Gebietes: z. B. Schuttabladeplatz;
- zu erwartende Tiefenlage der Strukturen (oberflächennah, tiefer als 1 m, vorhandene Überdeckung möglich?);
- Geologie;
- ungefähre Größe des Messgebietes und die für die Messung zur Verfügung stehende Zeit.

Sollte die Zeit äußerst knapp bemessen sein (z. B. bei Notgrabungen), müssen hinsichtlich der Wahl des effektivsten und schnellsten Verfahrens Kompromisse gemacht werden. Zeit- und Geldmangel dürfen sich jedoch keinesfalls auf Kosten der Messpunktabstände auswirken. In diesem Falle sollten kleinere, ausgewählte Flächen (z. B. parallele Suchschnitte von 20 m Breite) anstatt der Gesamtfläche prospektiert werden.

27.1.4.2 Einverständnis des Eigentümers

Voraussetzung für alle Messungen ist das Einverständnis des Grundeigentümers, bei landwirtschaftlich genutzten Flächen zusätzlich die des Pächters und des Bewirtschafters, da Letztere nicht immer vom Grundeigentümer informiert werden. Bei öffentlichen Flächen muss die Einwilligung des zuständigen Bürgermeisteramtes eingeholt werden. In der Regel wird man solche Zustimmungen auch von kritisch eingestellten Ansprechpartnern erhalten, wenn deutlich gemacht wird, dass bei der geophysikalischen Prospektion kein Eingriff in den Boden vorgenommen wird und die eingesetzten Methoden zerstörungsfrei sind. Zweckmäßig ist es außerdem, mit den Bewirtschaftern den Zeitpunkt der Messkampagne abzusprechen.

27.1.4.3 Das Geophysik-Messnetz

Die Ausrichtung des Netzes wird sich an lokalen Verhältnissen orientieren (Feldgrenze, Straße) oder an einem bereits vorhandenen Grabungsnetz. Es muss nicht unbe-

dingt eingeordnet sein, sollte jedoch in die Landeskoordinaten eingemessen werden. Die Messfläche wird in Quadranten unterteilt: rechteckige Teilflächen, die hinsichtlich Form und Größe identisch sind. Deren Eckpunkte werden mit Holzpfosten markiert (möglichst ohne Nägel, da diese bei geomagnetischen Messungen zu Störungen führen), die bis auf mindestens 3 cm Genauigkeit eingemessen werden müssen.

In der Geophysik ist die Länge dieser Quadranten in Messrichtung festgelegt und beträgt stets 20 m. Die Länge der anderen Seite kann je nach vorhandenen Bandmaßen gewählt werden. Gängig sind hier 30 m. Wird nur Geoelektrik durchgeführt mit einem Messpunktabstand von 0,5 m, sind 20 m zu empfehlen. Aus messtechnischen Gründen sollte jedoch ein ganzzahlig Vielfaches der Sub-Quadranten-Breite (siehe nächsten Abschnitt) gewählt werden.

Je nach gewähltem Messpunktabstand werden während der Arbeit innerhalb dieser Quadranten weitere, kleinere Messquadranten mit Maßbändern (aus nicht leitendem und unmagnetischem Material, z. B. aus Glasfasern) und Wäscheleinen aufgebaut (ohne Stahldraht, da dieser auf elektromagnetische und geomagnetische Messungen sowie Radarmessungen störenden Einfluss hat). Die parallel zueinander aufgespannten Wäscheleinen dienen zur Wahrung der Messrichtung, Markierungen auf ihnen zur Einhaltung des gewählten Messpunktabstandes. So können diese Sub-Quadranten z. B. eine Fläche von 20 m × 5 m (bei Messpunkt-Raster 0,25 m × 0,25 m) oder 20 m × 20 m (bei Messpunkt-Raster 0,5 m × 0,5 m) aufspannen. Der Messpunktabstand sollte aber so gewählt werden, dass er mindestens dem Radius (z. B. bei Gruben) oder der halben Breite (z. B. bei Mauern) der kleinsten zu erwartenden Strukturen entspricht.

27.1.4.4 Einmessen der Prospektionsfläche

Ist kein Grabungsnetz vorhanden, an welches das Prospektions-Messnetz angehängt oder eingebunden werden kann, müssen mindestens zwei möglichst weit voneinander entfernte Messpunkte entlang einer Hauptlinie (Diagonale nicht empfehlenswert) des Geophysik-Netzes durch einen Vermessungsingenieur oder den Grabungstechniker eingemessen werden. Eine geophysikalische Prospektion, die nicht eingemessen wurde, ist nur von geringem Wert!

27.1.4.5 Zeitkalkulation

Die Dauer einer Prospektion hängt von vielen Faktoren ab. Dazu gehört die Begehbarkeit des Untergrundes. Ebene Flächen, etwa Wiesen oder planierte Äcker, beschleunigen die Arbeit, während frisch gepflügte und mit großen Erdschollen bedeckte Flächen die Messgeschwindigkeit sehr drosseln. Ist der Boden hart, wird man mit der Geoelektrik nur langsam vorankommen.

Weitere Komponenten sind die Art des Verfahrens sowie

der Typus der verwendeten Apparatur. Geomagnetische Messungen können mit einem handlichen Fluxgate-Gradientometer sehr schnell und ohne großen Aufwand durchgeführt werden. Bei Cäsium-Magnetometern ist er ungleich größer (Messwagen, zusätzlicher Betrieb eines Notebooks zur Datenerfassung etc.) und der Fortschritt ist bei diesen empfindlicheren Geräten im Vergleich zum Fluxgate nicht so groß, wenn nicht entsprechend zusätzliches Personal zur Verfügung steht. Von den angesprochenen Verfahren ist die Geoelektrik am langsamsten. Wird zudem geoelektrische Tomografie durchgeführt, reduziert sich die Messgeschwindigkeit weiter und dies umso mehr, je mehr Pseudosektionen (siehe 27.1.6.4) durchgemessen werden müssen, d. h. je tiefer prospektiert werden soll.

Interessierte Zaungäste üben auf die Prospektion einen erheblich bremsenden Einfluss aus. Es hat sich bei stark frequentierten Lokalitäten (Parks, Ausflugsziele und dergleichen) bewährt, einen auskunftsbereiten und geduldrigen Mitarbeiter für die Spaziergänger bereitzustellen.

Nicht zuletzt ist die Arbeitsdauer von der Fitness des Prospektors abhängig. Für die Messung eines Hektars Gelände im Messpunktraster von 0,5 m × 0,5 m müssen beispielsweise bei Geomagnetik etwa 0,7 Tage, für die Geoelektrik (mit der Dipol-Dipol-Anordnung, siehe 27.1.6.5) ca. drei Tage angesetzt werden.

27.1.4.6 Vorbereitung der Messungen

Die Messfläche muss möglichst frei von Gegenständen sein. Metallgegenstände an der Erdoberfläche stören geomagnetische Untersuchungen, beeinflussen auch die Arbeit mit dem Bodenradar sowie elektromagnetische Induktionsmessungen negativ. So verändern auch überwachsene Drahtgittergeflechte alle Messungen und erhöhen z. B. bei geoelektrischen Untersuchungen künstlich die Leitfähigkeit des Bodens. Massive Metall-Gegenstände (Bau-Container, Bauzäune, Autos, Baustellenfahrzeuge etc.) haben bis auf mehrere Meter Abstand negativen Einfluss auf geomagnetische Prospektionen.

Zudem sollte die Fläche frei von höherem Bewuchs sein. Je höher dieser ist, umso schwieriger wird bei Radarmessungen und elektromagnetischer Induktion ein guter Bodenkontakt des Messgerätes, was sich negativ auf die Daten-Qualität bzw. auf die Empfindlichkeit der Induktionsapparatur auswirkt. Außerdem lassen sich während der Messung keine konstanten Messpunktabstände einhalten – entsprechend undeutlich werden daher die archäologischen Strukturen erfasst. Gleiches gilt für einen frisch gepflügten Acker. Befindet sich das Areal im Wald, muss zuvor das Unterholz beseitigt werden. Schließlich sollte bei Weideflächen dafür gesorgt werden, dass das Vieh die Arbeit nicht stören kann.

Soll eine geoelektrische Tomografie (siehe 27.1.6.4) durchgeführt und/oder das Bodenradar eingesetzt werden, ist bei unebenem Gelände eine topografische

Geländeaufnahme notwendig, um notwendige Korrekturen anbringen zu können.

27.1.5 Verfahren der Geomagnetik

Geomagnetik ist wohl das häufigste Verfahren in der Palette geophysikalischer Prospektionen in der Archäologie: Die meisten Aufgaben werden mit ihr zumindest befriedigend gelöst. Zudem kann sie schnell und einfach durchgeführt werden. Bei ungünstigen Bedingungen (z. B. geringen magnetischen Kontrasten, wie sie bei einem Kalksteinmauerwerk in stark kalkhaltigem Boden vorkommen können) kann sie immerhin noch als Methode zur schnellen und groben Lokalisierung von Strukturen unbekannter Lage verwendet werden, die dann mit anderen, zeitintensiveren Verfahren (z. B. Geoelektrik) prospektiert werden.

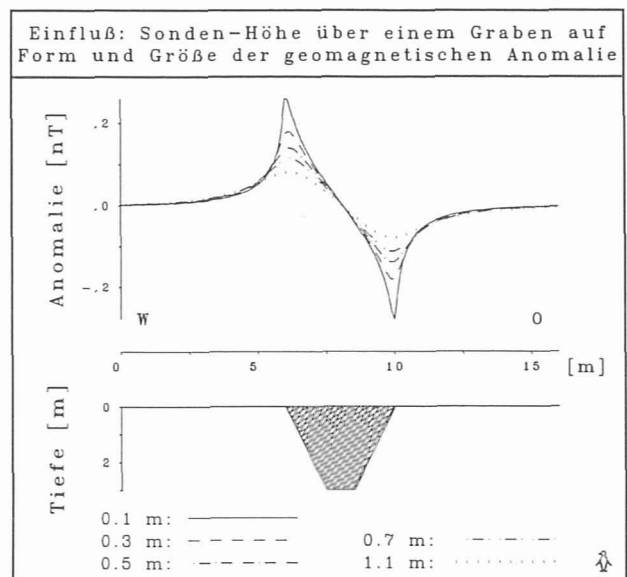
27.1.5.1 Prinzip

Mit der geomagnetischen Prospektion wird das bodennahe Erdmagnetfeld gemessen. Es besteht im Wesentlichen aus vier Anteilen: dem Magnetfeld der Erde (äußerer und innerer Anteil), dem Einfluss der Geologie (z. B. Erzlagerstätten, vulkanisches Gestein), lokalen Inhomogenitäten innerhalb der obersten Erdschichten (z. B. Archäologie, Deponien) und künstlichen Magnetfeldern (vor allem im Stadtbereich).

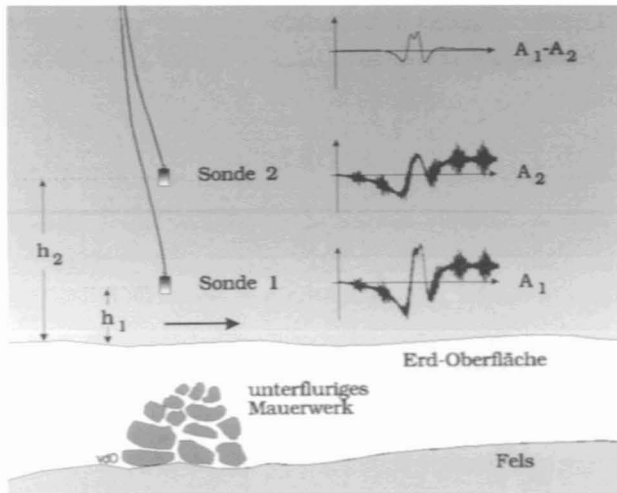
Bei der Prospektion archäologischer Denkmale werden die Messungen in der Variometer- oder vor allem in der Gradientenanordnung durchgeführt.

27.1.5.2 Gradientenanordnung

Die Stärke eines Magnetfeldes nimmt mit zunehmendem Abstand von seiner Quelle mit der dritten Potenz ab (Abb. 1). Diese Gesetzmäßigkeit nützt man bei der Gra-

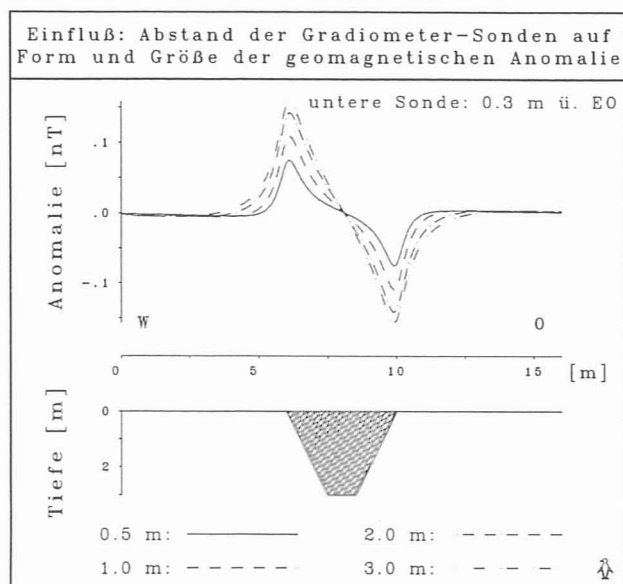


1 Einfluss der Form und Größe einer gemessenen magnetischen Anomalie vom Abstand der Sonde zur Erdoberfläche.

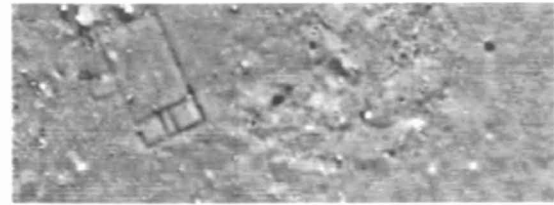


2 Prinzip der geomagnetischen Gradientenmessung: Störungen können durch einfache Differenzbildung aus gleichzeitig gemessenen Datenreihen der Sonden 1 und 2 herausgefiltert werden.

dientenanordnung aus, um viele Störungen durch eine einfache Differenzbildung eliminieren zu können (Abb. 2): Das Magnetfeld wird zeitgleich mit zwei senkrecht übereinander angeordneten Sonden erfasst. Störungen, die – bezogen auf den Abstand dieser beiden Sonden – von weit entfernten Quellen erzeugt werden, üben einen nahezu gleichen Einfluss auf beide Sonden aus und können so durch einfache Differenzbildung der einzelnen Signale nahezu vollständig eliminiert werden. Je größer der Abstand dieser beiden Sonden voneinander ist, umso größer ist das „Auflösungsvermögen“ der Messanordnung (Abb. 3). Wie die Abbildung 3 zeigt, macht eine immer größere Gradientenanordnung wenig Sinn.



3 Einfluss des Sondenabstandes bei der geomagnetischen Gradientenmessung auf Form und Größe der gemessenen Anomalie.



0 20 40 60m

4 Ausschnitt aus der Cäsium-Magnetometer-Prospektion des Grabhügels der Keltenfürstin von Vix (Frankreich) und eines römischen Gebäudes. (Publikationsgenehmigung von Bruno Chaume, Frankreich und Walter Reinhard, Saarland)

Die Steigerung der Empfindlichkeit nimmt ab einem bestimmtem Sondenabstand immer langsamer zu, sodass der sinnvollste Abstand bei der Gradientenanordnung zwischen 1,5 m und 2 m liegen dürfte.

27.1.5.3 Variometeranordnung

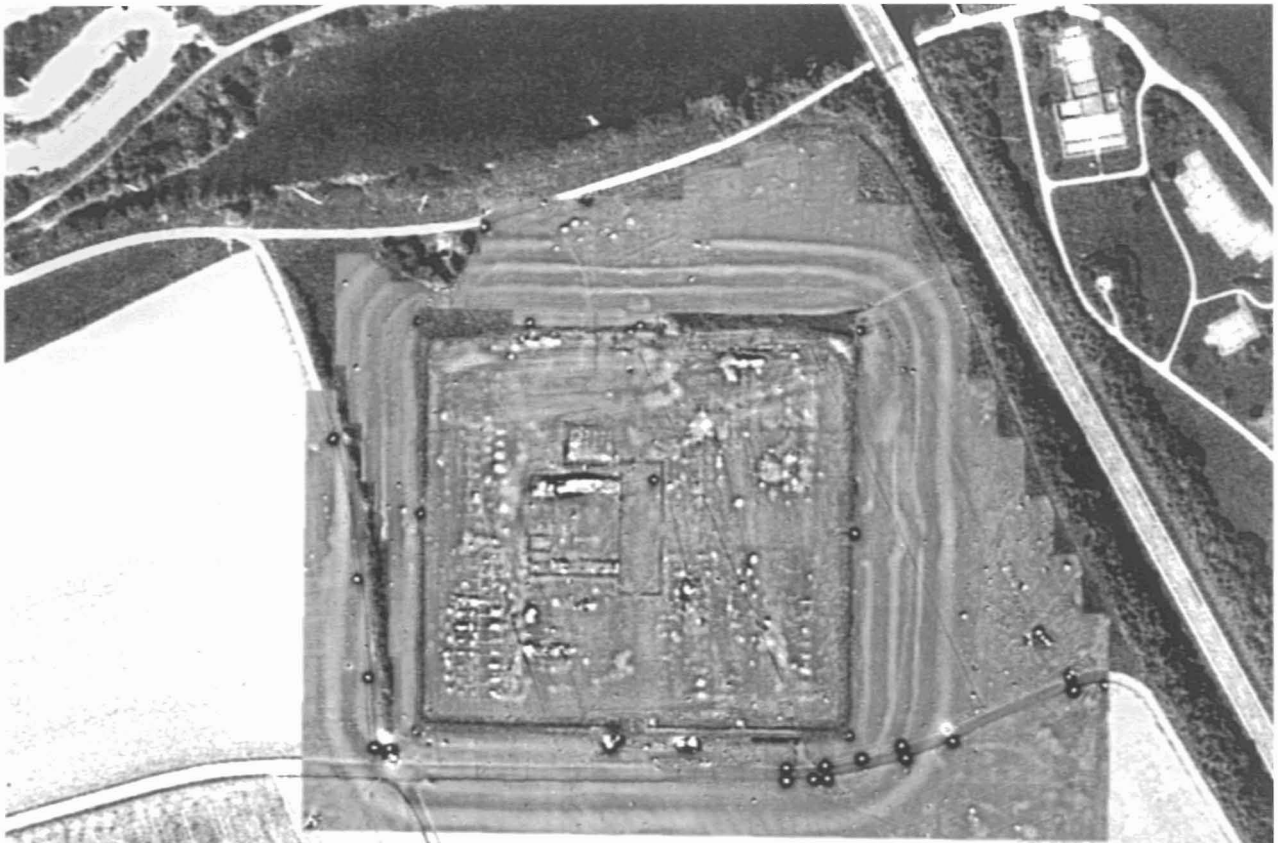
Bei der selten benutzten Variometeranordnung ist eine Sonde ortsfest installiert, während mit der anderen, mobilen Sonde die Messungen durchgeführt werden. Wie bei der Gradientenanordnung werden die Daten des Erdmagnetfeldes mit beiden Sonden zeitgleich erfasst. Damit lassen sich Störungen, wie etwa auch der Tagesgang des Erdmagnetfeldes aus den Daten der mitgeführten Messsonde korrigieren. Zuweilen erzielt man mit dieser Anordnung etwas bessere Ergebnisse als mit der Gradientenanordnung. Während den Messungen in der Variometeranordnung muss sichergestellt sein, dass künstliche Störungen der ortsfest installierten Basissonde – durch Grabungsarbeiten, Verkehr etc. – ausgeschlossen sind.

27.1.5.4 Beispiele

In der Variometeranordnung wurden mit einem Cäsium-Magnetometer zur genauen Ortung des Grabhügels der Keltenfürstin von Vix (Burgund) geomagnetische Messungen durchgeführt. In Abb. 4 (Ausschnitt aus der Gesamtmessung) sind der Hügel und innerhalb von ihm kleine, rechteckige Strukturen sowie ein römisches Gebäude zu erkennen, das nahebei errichtet worden war. Das Kohorten-Kastell Rainau-Buch (Ostalbkreis) wurde mit der Gradientenanordnung prospektiert. Das Magnetogramm (Abb. 5) zeigt eine Fülle von Details (Raumaufteilungen und Feuerstellen in den Mannschaftsbaracken, Lagerhauptgebäude, Speichergebäude mit parallel angeordneten Pfostenreihen, vier Verteidigungsgräben etc.) und wurde in ein digital entzerrtes Luftbild eingebunden (siehe 27.1.9.2). Das zum Kastell gehörige Bad ist am oberen rechten Bildrand erkennbar.

27.1.5.5 Grenzen der Anwendbarkeit

Oberflächennahe Strukturen werden sehr gut erfasst. Liegen sie jedoch tiefer, werden beispielsweise alte Siedlungsreste von einer mehr als 50 cm starken Deckschicht



5 Magnetogramm des römischen Kohortenkastells Rainau-Buch (Ostalbkreis), digital in ein Orthofoto eingebunden.

überlagert, kann dies das „Aus“ für die Geomagnetik bedeuten. Nahezu unmöglich wird eine Interpretation gemessener Strukturen auch dann, wenn die Prospektionsfläche mit Eisenteilen (z. B. Geschossplintern) oder erzhaltigen Teilen übersät ist. Drahtzäune, vor allem die auf Grabungen verwendeten Bauzäune, stören geomagnetische Messungen auf mehrere Meter.

Bestehen das archäologische Objekt und der Boden, in den es gebettet ist, aus magnetisch gleichem oder ähnlichem Material (z. B. Kalksteinmauern in kalkhaltigem Boden), ist der magnetische Kontrast – so vorhanden – meist zu gering, um deutlich genug registriert werden zu können. Vulkanisches Gestein oder Erzlagerstätten *unterhalb* archäologischer Schichten machen eine geomagnetische Prospektion archäologischer Denkmale oft unmöglich.

Veränderungen der Witterungsverhältnisse während der Messkampagne haben keinen Einfluss auf die Ergebnisse der Geomagnetik. Im Prinzip kann dieses Verfahren zu jeder Jahreszeit durchgeführt werden, sofern nicht zu hohe oder zu niedere Temperaturen der Elektronik zu schaffen machen.

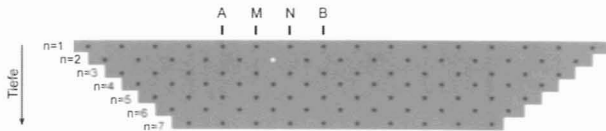
Es macht wenig Sinn, im Stadtgebiet geomagnetisch zu arbeiten: Die durch Kraftfahrzeuge, unterirdische Leitungen, Eisenbewehrungen in Häusern etc. verursachten Störungen sind größer als die durch Archäologie bedingten Anomalien und überlagern diese vollständig.

27.1.6 Verfahren der Gleichstrom-Geoelektrik

27.1.6.1 Prinzip

Dem Untergrund wird über zwei Sonden ein Gleichstrom bekannter Größe zugeführt. Dadurch entsteht – entsprechend der vorhandenen Widerstandsverteilung – ein künstliches elektrisches Feld bzw. das damit verbundene Potenzial. Mit zwei weiteren Sonden wird die Potentialdifferenz (Spannung) an der Erdoberfläche gemessen. Mit den beiden Größen Strom und gemessene Spannung sowie einem Geometriefaktor, der sich aus der gewählten Anordnung der vier Sonden untereinander berechnen lässt, kann der scheinbare spezifische Widerstand des Untergrundes berechnet werden. Er setzt sich integral aus den Widerstandswerten der einzelnen Schichten oder Körper zusammen, die innerhalb der Wirkungstiefe (maximale Tiefe, bis zu der sich noch archäologische Strukturen eindeutig nachweisen lassen) der Messanordnung liegen und entspricht somit nur einem mittleren Widerstandswert (deshalb „scheinbar“). Die Wirkungstiefe ist durch die Anordnung der Sonden an der Oberfläche gegeben, also bestimmbar und einstellbar.

Je nach Lage und Kombination der Messprofile und -anordnung unterscheidet man zwischen Sondierung, Kartierung und geoelektrischer Tomografie.



6 Zur Erklärung der Pseudosektionen (siehe Text).

27.1.6.2 Kartierung

Bleibt die Anordnung der vier Sonden unverändert, wird aber jeweils für einzelne Messungen parallel und senkrecht zur Messrichtung versetzt, spricht man von der Kartierung des Untergrundes. Dabei entsteht ein Resistogramm, in dem die mittlere Widerstands- bzw. Leitfähigkeitsverteilung des Untergrundes bis zu einer bestimmten Tiefe dargestellt ist.

27.1.6.3 Sondierung

Werden die Abstände der vier Sonden untereinander zwischen den Einzelmessungen sinnvoll verändert, erhöht (bei Vergrößerung der Abstände) bzw. verringert sich die Messtiefe. Im Gegensatz zur Kartierung ist jetzt die Wirkungstiefe variabel. Da mit zunehmender Tiefe der Einfluss höherer Schichten oder Objekte zwar abnimmt aber stets noch vorhanden ist, wird die Auswertung der Sondierung ungleich schwieriger und umfangreicher als die der Kartierung. Sie ist nur sinnvoll, wenn gleichzeitig Modellrechnungen durchgeführt werden. Dabei werden Strukturen im Untergrund in ihrer Lage, Größe, Form und ihren physikalischen Eigenschaften so lange sinnvoll verändert, bis die theoretisch errechneten Daten mit den gemessenen Werten möglichst gut übereinstimmen.

27.1.6.4 Tomografie

Die zuvor besprochenen Konfigurationen dienen eindimensionalen Messungen. Als Tomografie werden zweidimensionale Untersuchungen bezeichnet, die vor allem bei komplexen Verhältnissen der obersten Bodenschichten eingesetzt werden. Die elektrische Tomografie wird am LDA Baden-Württemberg mit einem computergesteuerten Messsystem durchgeführt, an das 100 Elektroden angeschlossen sind, die mit gleichem Abstand in einer Linie aufgebaut werden.

Die Messwerte werden in Form so genannter Pseudosektionen dargestellt (Abb. 6), welche die Variation der spezifischen elektrischen Widerstandsverteilung im Unter-



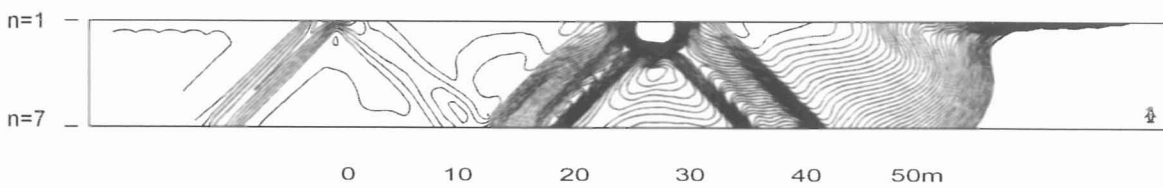
7 100-Sonden-Anlage des Landesdenkmalamtes Baden-Württemberg im Feldeinsatz.

grund bildhaft wiedergeben. Dieses Bild ist aber nicht nur von der gesuchten Widerstandsverteilung im Untergrund, sondern auch von der gewählten Elektrodenanordnung abhängig.

Um ein wahrheitsgetreues Abbild des Untergrundes zu erhalten, müssen die Pseudosektionen durch Modellrechnungen verifiziert werden.

Durch geeigneten Ausbau kann die Tomografie zu einer dreidimensionalen Messanordnung erweitert und ausgebaut werden.

Je größer die Messtiefe sein soll, umso größer müssen die Auslagen gewählt werden, umso größer ist die „Anlaufzone“ um die gemessene Fläche (siehe Abb. 6). Je tiefer der Messbereich liegt, umso kleiner wird bei gleichbleibendem Aufbau des Messsystems die gemessene Fläche, umso kürzer sind auch die so genannten Pseudosektionen. In Abb. 6 sind sieben solche Pseudosektionen (bezeichnet mit n) angegeben. Bei jeder Sondenanordnung wird ein bestimmter Bereich gemessen, wobei dessen Messergebnis (der spezifische elektrische Widerstand) den jeweils mit einem Stern markierten Stellen zugeordnet wird. Bei der in der Abbildung gezeigten Anordnung der Stromsonden A und B sowie der beiden Potential Elektroden M und N ist die entsprechend zugeordnete Stelle mit einem weißen Stern markiert. Will der Gra-



8 Ergebnis einer geoelektrischen Tomografiemessung über zwei parallele Mauerzüge unterschiedlicher Stärke.

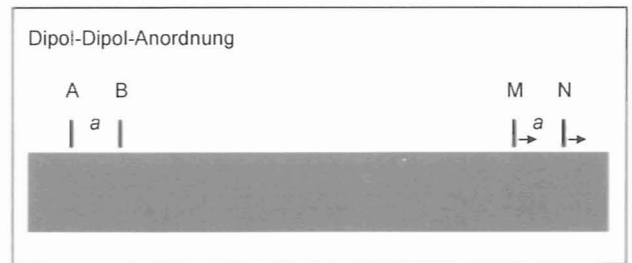
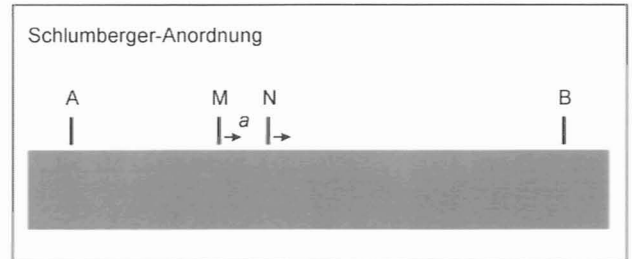
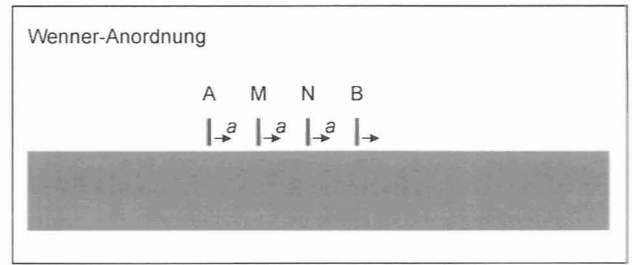
bungstechniker eine Fläche bestimmter Größe in einer bestimmten Tiefe prospektiert haben, muss er mit entsprechend großer Ausdehnung der Mess- bzw. Sondenanordnung rechnen. Ist dies nicht möglich, kann das Verfahren nicht oder nur sehr eingeschränkt eingesetzt werden. Dann wird man besser auf das Bodenradarverfahren zurückgreifen. In Abb. 7 sehen wir die am Landesdenkmalamt Baden-Württemberg gebaute Messeinrichtung im Feldeinsatz. Abb. 8 zeigt eine über zwei parallel zueinander verlaufende Mauerzüge durchgeführte Testmessung mit diesem 100-Sonden-System.

27.1.6.5 Anordnungen der Sonden

Von den vielen Anordnungsmöglichkeiten der vier Sonden (zwei Stromelektroden, zwei Potenzialsonden) sollen hier nur die gängigsten aufgeführt werden. Es sind auch fokussierende und asymmetrische Anordnungen möglich, wie sie derzeit in der Altlasten- und Deponieerkennung im Rahmen von Diplomarbeiten erprobt werden und sicherlich künftig auch zur Lösung archäologischer Fragestellungen eingesetzt werden können.

Wenner-Anordnung: Die Sonden haben untereinander den gleichen Abstand a , die ganze Anordnung wird zweckmäßig um diesen Abstand versetzt. Über die beiden äußersten Sonden A und B wird Strom in den Untergrund gespeist. Die Potentialdifferenz des entstandenen künstlichen elektrischen Feldes im Untergrund wird durch die beiden mittleren Potenzialsonden M und N abgegriffen. Diese Anordnung wird meist bei Sondierungen und bei der geoelektrischen Tomografie eingesetzt. Für tiefenabhängige Messungen werden die Abstände a der Sonden in bestimmten Schritten erweitert (Abb. 9 oben). Gradientenordnung (Schlumberger): Der Abstand zwischen den Stromelektroden ist wesentlich größer als der der Potzialektroden (Abb. 9 Mitte). Bei der Sondierung bleiben die Potenzial-Elektroden ortsfest, der Abstand der beiden Stromelektroden bezogen auf das Zentrum der ganzen Anordnung wird kontinuierlich vergrößert. Da nur zwei, nicht wie bei Wenner vier Elektroden nach jeder Einzelmessung versetzt werden müssen, geht die Arbeit schneller voran. Bei der Kartierung kann – wie bei Wenner – das ganze Messsystem um geeignete Schritte versetzt werden. Es ist auch möglich, bei fest stehenden Stromelektroden nur die Potzialektroden mit konstantem Sondenabstand innerhalb der Anordnung zu versetzen.

Dipol-Dipol-Anordnung (Abb. 9 unten): Beide Stromelektroden bleiben während der Messung ortsfest im „Unendlichen“. Die geoelektrische Unendlichkeit wird allerdings bereits ab etwa dem Dreißigfachen des Abstandes der beiden mobilen Potenzialsonden erreicht. Diese Anordnung wird bei Kartierungen angewandt. Sie kann wesentlich schneller als die Wenner-Anordnung durchgeführt werden. Bei Vergleichsmessungen mit der Wenner-Anordnung waren hier die erfassten Kontraste oft höher.



9 Drei in der geoelektrischen Prospektion am meisten eingesetzte Sondenkonfigurationen. A, B: Stromsonden, M,N: Potenzialsonden.

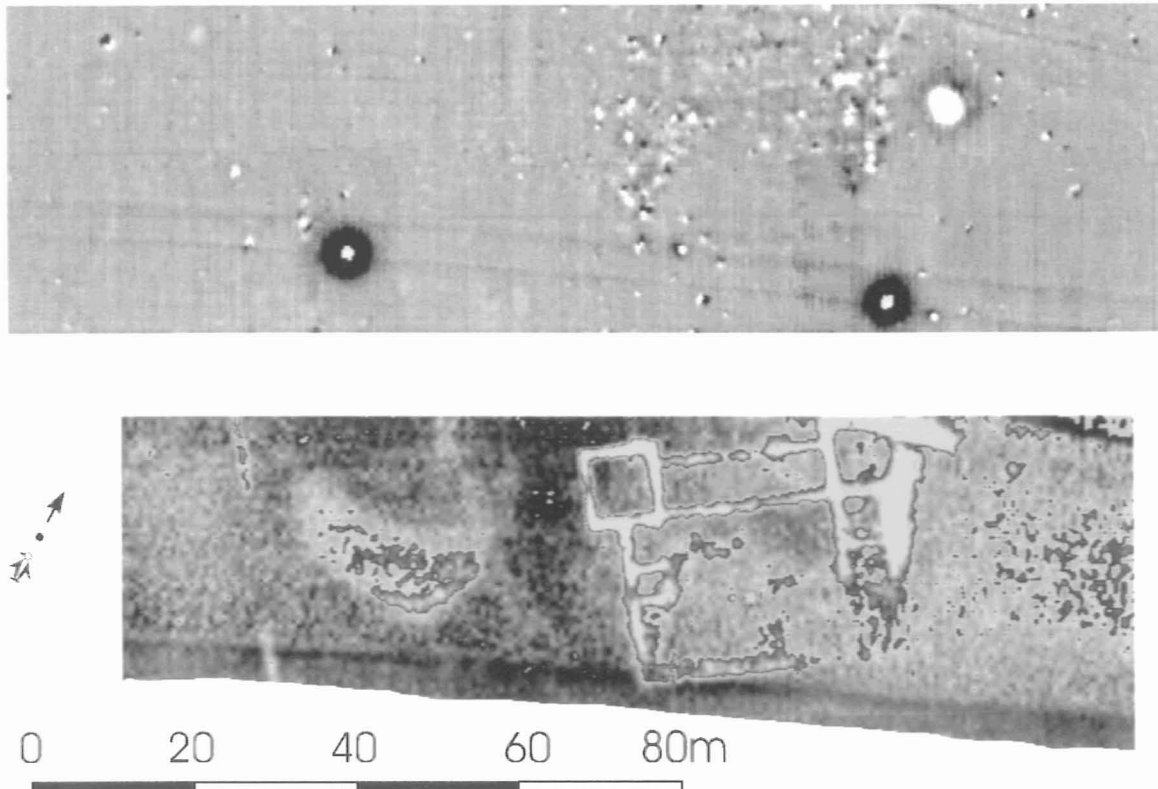
27.1.6.6 Einsetzbarkeit der Geoelektrik

Geoelektrik ist prinzipiell überall dort einsetzbar, wo sich Potenzial- und Stromelektroden in den Boden einbringen lassen. Nofalls müssen entsprechende Bohrungen durchgeführt werden. Schwierigkeiten können bei vagabundierenden Strömen der Technik auftreten (z. B. nahe gelegenen Erdungen elektrischer Anlagen). Sie können die Messungen unbrauchbar machen. Auch Schienenverkehr in unmittelbarer Nachbarschaft der Messfläche kann sich negativ auf die Messungen auswirken.

Im Gegensatz zur Geomagnetik ist dieses Verfahren stark witterungsabhängig. Veränderungen des Feuchtigkeitsgehalts im Boden während der Messungen können alles bewirken: Erhöhung, Erniedrigung, seltener auch Umkehr des Kontrastes der Leitfähigkeiten bis hin zu seinem vollkommenen Verschwinden.

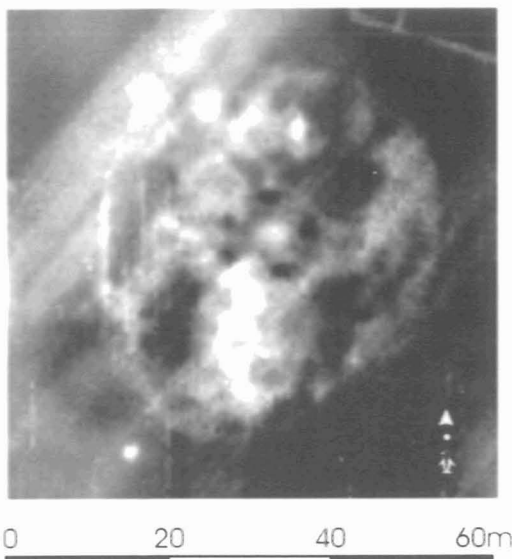
27.1.6.7 Beispiele

Die aus Kalksteinen errichtete römische Villa in Ohrnberg bei Öhringen wird auf Grund des schwachen magnetischen Kontrastes zur Umgebung (kalkhaltiger Boden) per



10 Geomagnetische (oberes Teilbild) und geoelektrische Prospektion eines römischen Gutshofes (Ausschnitt). Auf Grund geringer magnetischer Kontraste kann das Gebäude mit der Magnetik nur grob lokalisiert, hingegen mit der Geoelektrik zufrieden stellend erfasst werden.

Geomagnetik kaum sichtbar (Abb. 10 oben). Geoelektrische Kartierung mit einer Wirkungstiefe von etwa 50 cm liefert hingegen verwertbare Informationen über Erhaltungszustand und inneren Aufbau des Gebäudes. Auf Grund intensiver landwirtschaftlicher Nutzung fehlt



11 Geoelektrische Kartierung des Grabhügels der Keltenfürstin von Vix, Burgund.
(Publikationsgenehmigung von Bruno Chaume, Frankreich und Walter Reinhard, Saarland)

ein Teil der Umfassungsmauer sowie die südöstliche Ecke des Gebäudes.

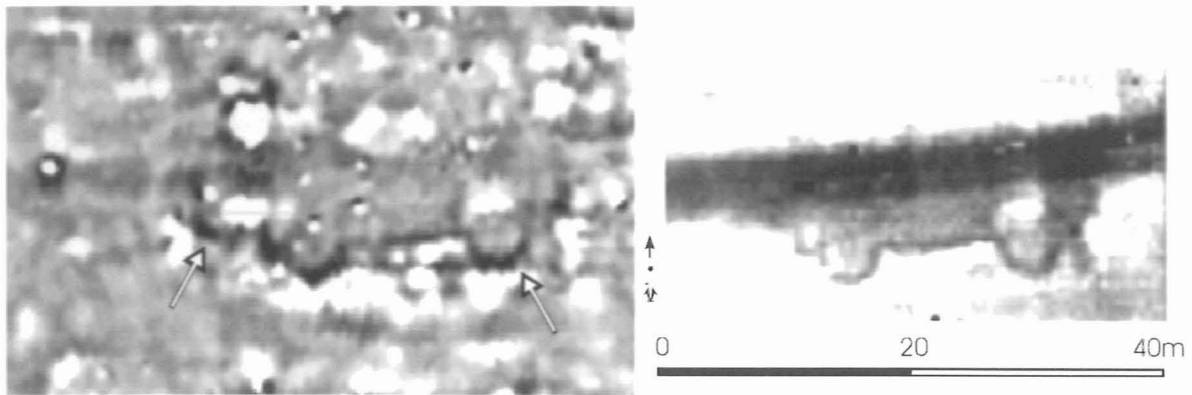
In Abb. 11 ist eine Grabkammer (die zentral gelegene, etwa 3 m x 3 m große, helle Anomalie) sowie ein Anfang der fünfziger Jahre angelegter, 20 m langer Suchschnitt deutlich zu erkennen. Zusätzlich liefert die geoelektrische Prospektion Informationen über interne, hinsichtlich der Ost-West-Richtung symmetrische Strukturen um die Grabkammer der Keltenfürstin von Vix, Burgund. Eine signifikante singuläre Anomalie nahe des südwestlichen Hügelrandes lässt auf einen massiven Stein schließen.

27.1.7 Die elektromagnetische Induktion (EMI)

Mit der elektromagnetischen Induktion können Leitfähigkeit wie auch Suszeptibilität des Untergrundes bestimmt werden. Letztere gibt an, wie stark ein Körper im Magnetfeld der Erde dieses beeinflussen kann, d. h. wie groß die von ihm verursachte Anomalie des Magnetfeldes ist.

27.1.7.1 Prinzip

Über eine Sendespule wird ein elektromagnetisches Feld erzeugt. Dieses Primärfeld wirkt in den Untergrund hinein und erzeugt in leitfähigen Schichten Sekundärfelder, die sich vom Primärfeld je nach Leitfähigkeit der entspre-



12 Magnetogramm (linke Teilabbildung) und elektromagnetische Induktionsmessungen des Badegebäudes im Kastell Welzheim-Ost.

chenden Schicht in ihrer Phase mehr oder weniger unterscheiden, aber gleiche Frequenz haben. Eine Empfangsspule (Detektor) erfasst das Primärfeld und die induzierten Sekundärfelder. Durch die Änderungen der Amplitude und der Phase zwischen Primär- und Sekundärfeldern sind nun Aussagen über die Leitfähigkeiten und Suszeptibilitäten im Untergrund (z. B. bis zu einer Tiefe von etwa 70 cm oder 150 cm, abhängig von Gerät und Messmodus) möglich.

27.1.7.2 Beispiel

Elektromagnetische Induktion und beispielsweise die Geomagnetik können sich recht gut ergänzen. Das gewählte Beispiel (Abb. 12) zeigt einen Ausschnitt aus geomagnetischen und elektromagnetischen Induktionsmessungen im Kastell Welzheim-Ost. Im Magnetogramm (linke Teilabbildung) ist unvollständig das bereits von der Reichs-Limeskommission ergrabene Badgebäude zu erkennen (markiert mit weißen Pfeilen). Deutlicher heben sich Außenmauer und Innenbereich des Kastellbades von der Umgebung in den Messdaten der elektromagnetischen Induktion ab (rechte Teilabbildung). Eine breitere Störung, die sich durch die Teilabbildung zieht, kann auf einen Weg zurückgeführt werden, der noch zu Beginn des 20. Jh. bestand.

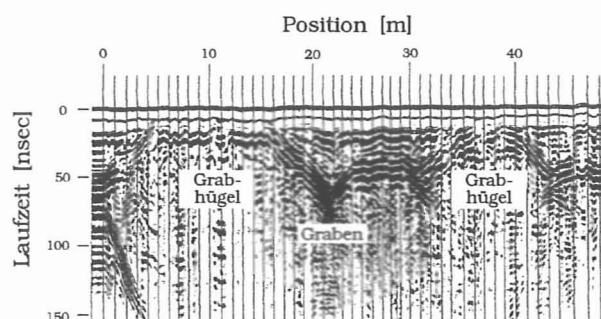
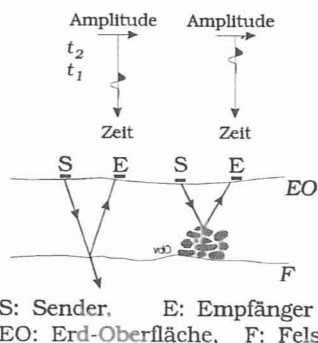
27.1.7.3 Einsatzmöglichkeiten

Die Methode eignet sich, um in geringen Tiefen Schichten und Strukturen zu detektieren, die elektrischen Strom gut leiten (Messung der Leitfähigkeit) oder auch unterschiedliche magnetische Eigenschaften haben (Messung der Suszeptibilität). Sie kann – im Gegensatz zur Geomagnetik – durchaus auch in Städten eingesetzt werden.

27.1.8 Bodenradar (GPR)

27.1.8.1 Funktionsprinzip

Das Bodenradar (Ground Penetrating Radar) arbeitet nach dem Impuls-Echo-Prinzip: Über eine Sendeantenne werden kurzzeitige elektromagnetische Impulse in den Untergrund abgestrahlt. An Grenzflächen oder Objekten mit unterschiedlichen elektrischen Materialeigenschaften werden diese elektromagnetischen Wellen, analog den Gesetzen der Wellen-Optik, teils reflektiert, teils refraktiert, d. h. sie dringen mit veränderter Geschwindigkeitsausbreitung und Richtung in die darunter liegende Schicht oder Körper ein. Eine entlang der Erdoberfläche gezogene Empfangsantenne registriert die dort ankommenden Wellen, die, je nach Aufbau des Untergrunds aus Materialien unterschiedlicher Wellenausbreitungsgeschwin-



13 Funktionsprinzip des Bodenradars (siehe Text).

digkeiten, zeitlich verzögert ankommen. Durch permanente Aufzeichnung erhält man das Radargramm: einen kontinuierlichen Profilschnitt des Untergrunds (Abb. 13). Der Erfolg einer Radarmessung hängt vor allem von zwei physikalischen Eigenschaften des Untergrundes ab: von der elektrischen Leitfähigkeit und der Dielektrizitäts-Konstante. Letztere misst die Fähigkeit eines Materials, elektrische Ladungen zu speichern, wenn ein elektrisches Feld angelegt wird. Sie bestimmt die Qualität der Reflexion des Signals. Verschiedene Materialien haben unterschiedliche Dielektrizitäts-Konstanten, die Werte reichen von 1 für Luft bis 81 für Wasser.

Berechnet man aus parallel gemessenen Radarprofilen Zeitscheiben, sogenannte Time-Slices (horizontale Flächen, die senkrecht zu den Profilebenen stehen), erhält man – analog zu den Abbildungen der Magneto- oder Resistogramme – Informationen über die Verteilung be-

stimmter elektrischer Parameter (und damit ein indirektes Bild der Strukturen) im Untergrund (in Ebenen parallel zur Erdoberfläche für jede gewünschte Tiefe).

Die Eindringtiefe dieser elektromagnetischen Wellen hängt einerseits von der verwendeten Antenne ab (hohe Frequenz: geringe Eindringtiefe, hohe Auflösung; niedrige Frequenz: große Eindringtiefe, geringe Auflösung), andererseits vom elektromagnetische Wellen absorbierenden Wassergehalt des Untergrunds, dem Gehalt an Lehm und Ton sowie seiner elektrischen Leitfähigkeit. Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Verfahren stellt das Bodenradar kein integrales Messverfahren dar: An einem Messpunkt an der Bodenoberfläche wird eine Messreihe mit diskreten Informationen über einen ganzen Tiefenbereich aufgezeichnet.

27.1.8.2 Beispiel

Ausschnitte aus Radarmessungen und aus einer Palette berechneter Time-Slices sind in Abb. 14 dargestellt. Prospektiert wurde ein keltischer Grabhügel in Altheim (Saarland). Die Messungen wurden durch die Hohlräume mehrerer Fuchsbauten erheblich beeinflusst.

27.1.8.3 Einsatzmöglichkeiten des Bodenradars

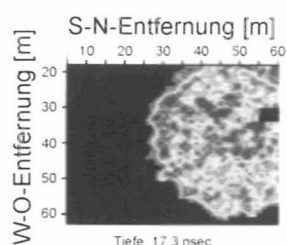
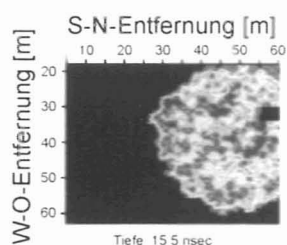
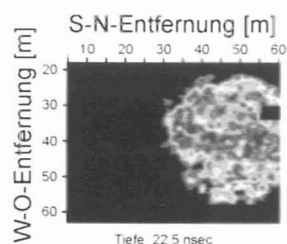
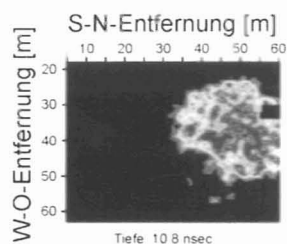
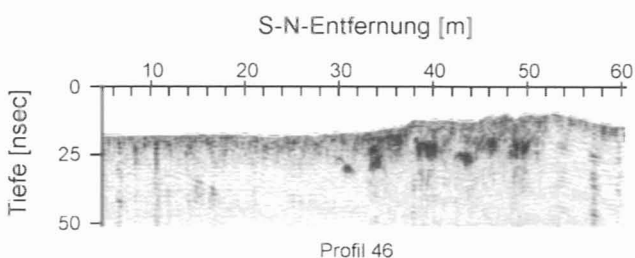
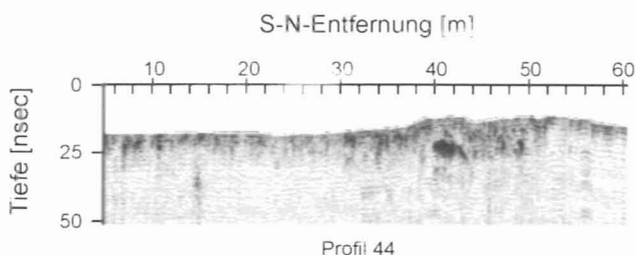
Dieses Verfahren ist prinzipiell überall einsetzbar, auch im städtischen Bereich. Die einzige derzeit bekannte Einschränkung hängt vom Feuchtigkeitsgehalt des Bodens ab. Liegt der mittlere Bodenwiderstand bei Werten von etwa 200 bis 250 Ohm-Metern und darunter, ist die Absorption der von der Antenne ausgesandten elektromagnetischen Wellen derart groß, dass eine Messung wegen mangelnder Eindringtiefe der Wellen nicht mehr sinnvoll ist. Beste Resultate bekommen wir bei durchgefrorenem Boden.

Die Detektionsschwelle eines Objektes ist tiefenabhängig, seine minimale Größe muss also umso größer sein, je tiefer es im Untergrund liegt. Bei metallischen Objekten beispielsweise ist für die Detektierbarkeit pro Tiefenmeter eine Zunahme des Durchmessers von etwa 8 cm nötig.

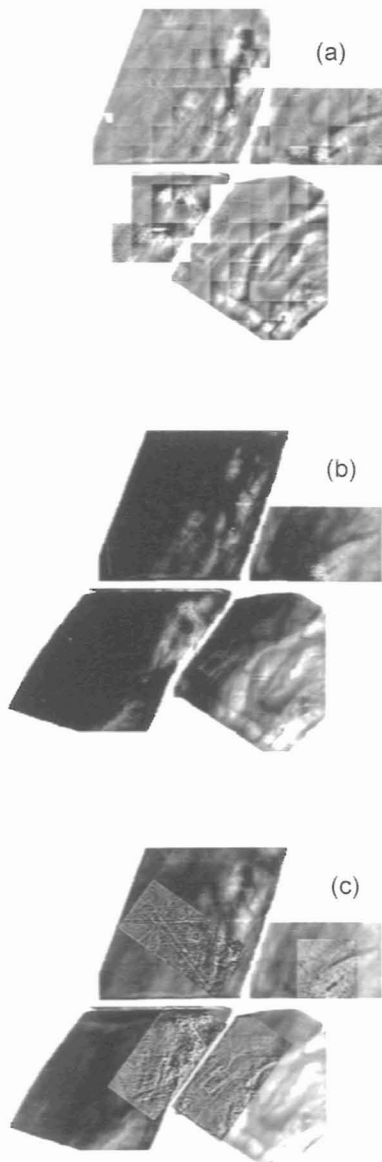
27.1.9 Auswertung und Darstellung der Messwerte: Digitale Bildverarbeitung

27.1.9.1 Datenverarbeitung

Die im Gelände aufgezeichneten Messwerte müssen zunächst verschiedene Korrekturen (Berücksichtigung der Gerätedrift, bei geomagnetischen Messungen zusätzlich des Tagesganges und der zeitlichen Variationen des Erdmagnetfeldes, bei geoelektrischen Sondierungen und Tomografieuntersuchungen sowie bei den Radaruntersuchungen topografische Geländekorrekturen etc.) erfahren, bevor sie weiterverarbeitet werden können. Dabei hat sich die digitale Bildverarbeitung bestens bewährt.



14 Beispiel-Radargramme und Time-Slices eines keltischen Grabhügels im Saarland.
(Publikationsgenehmigung von Walter Reinhard, Saarland)



15 Anwendung der digitalen Bildverarbeitung am Beispiel der geoelektrischen Kartierung der römischen Villa in Staufen (Breisgau).

Zunächst werden die Werte in die entsprechenden Grautöne umgerechnet. Die Zuweisung eines (durch den Grauwert beschriebenen) Grautones zu einem Messwert erfolgt meist an Hand der Linearität: Die untere Grenze des zu bearbeitenden Messwertebereichs wird dem Grauwert 0 (schwarz), die obere Grenze dem Grauwert 255 (weiß) zugeordnet, die zwischen diesen Extremen liegenden Werte weist man den restlichen Grauwerten zu. Mit verschiedenen Filteroperationen (vor allem sind dies Meridian-, Gradienten-, Hochpass-, Tiefpass- und Bandpassfilter) können einerseits Störungen in den Messungen beseitigt, andererseits der Kontrast verstärkt und das Signal/Noise-Verhältnis vergrößert werden.

Durch diese Filteroperationen werden die Messdaten gezielt und konstruktiv verändert. Die Möglichkeiten, mit diesen Operationen archäologische Strukturen sichtbar zu

machen, belegt das Beispiel einer römischen Villa in Staufen (Breisgau) in Abb. 15. Die durch geoelektrische Kartierung gewonnenen Daten sind bereits drift-korrigiert (Abb. 15a). Da sich in dem nahezu sumpfigen Messgebiet und bei sehr wechselnden Witterungsverhältnissen die Leitfähigkeiten der oberen Bodenschichten permanent veränderten, mussten die Daten auch von diesen Einflüssen bereinigt werden (Abb. 15b). In weiteren Datenverarbeitungsschritten wurden schließlich die entsprechenden archäologischen Strukturen hervorgehoben (Abb. 15c). Diese Teilabbildung kann nun als Grundlage für die Erstellung einer interpretierenden Strichzeichnung dienen.

27.1.9.2 Luftbildentzerrung und Kombination von Messergebnis und Luftbild

Zum Zwecke der Dokumentation und Inventarisierung kann es von großem Nutzen sein, Magnetogramme, Resistogramme oder Time Slices digital in Luftbilder einzuarbeiten.

Voraussetzung hierfür ist die Vorlage eines entzerrten Luftbildes (Orthofoto). Mit einer entsprechend ausgestatteten Einrichtung (digital aufzeichnende Videokamera, ein 2-Bildschirm-Computer-System, entsprechende Software und genügend großer Speicherplatz) kann ein Luftbild ohne großen Aufwand entzerrt werden. Notwendig ist dazu ferner eine topografische Karte mit möglichst großem Maßstab. Auf ihr müssen mehrere Orte eindeutig identifiziert werden können, die ihre Entsprechung im Luftbild haben. Diese Zuordnung muss eindeutig sein. Theoretisch sind nur drei oder vier solcher Passpunkte notwendig, erfahrungsgemäß reicht jedoch diese Zahl für eine exakte Entzerrung bei weitem nicht aus. Abb. 16 zeigt das originale, Abb. 17 das entzerrte Luftbild, in das schließlich (Abb. 18) das Ergebnis einer geophysikalischen Prospektion (frühmittelalterliche Burganlage Schwabsberg, Ostalbkreis) digital eingebunden ist. Abb. 19 demonstriert ein weiteres Beispiel der Kombination Luftbild mit Geophysik (römische Villa in Staufen im Breisgau).

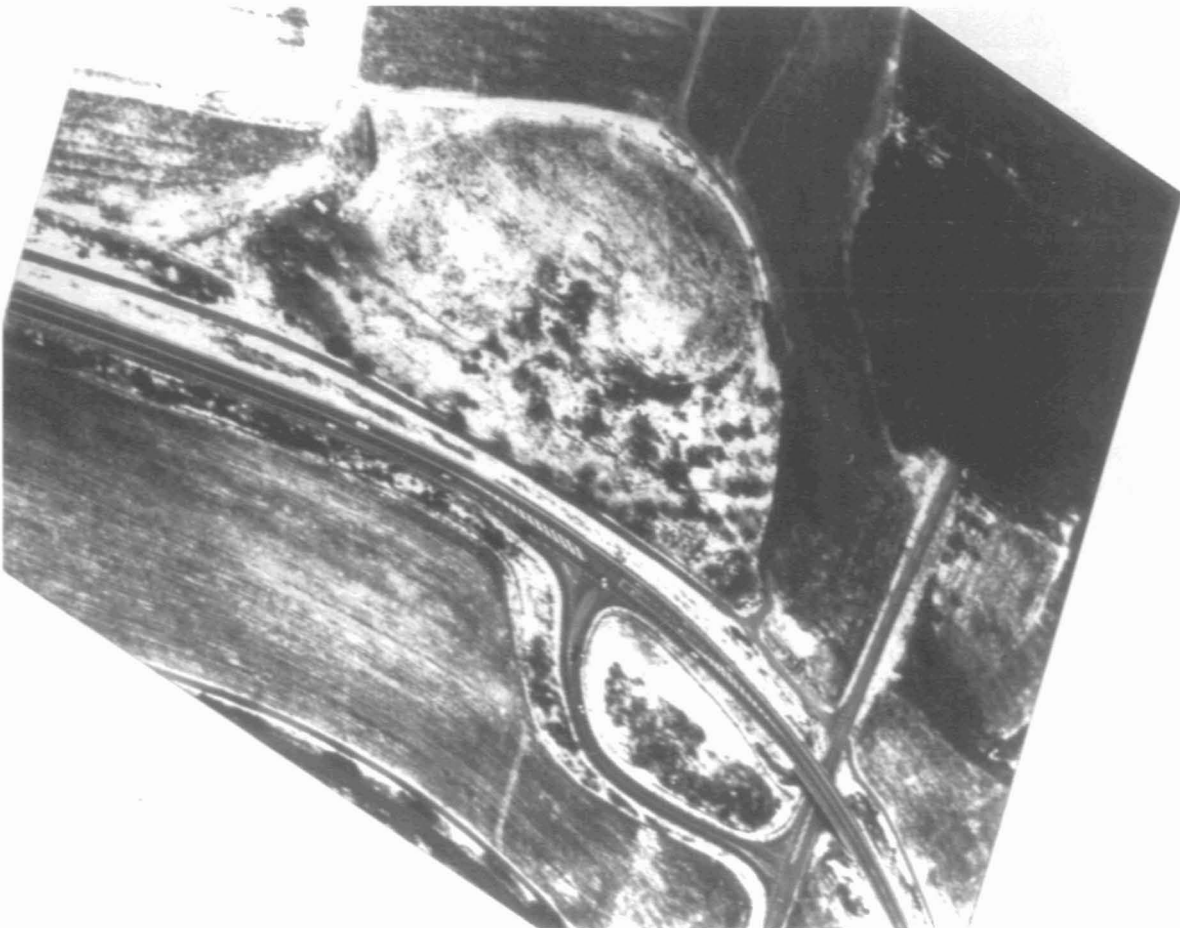
Dipl.-Geophys. Harald von der Osten-Woldenburg
Landesdenkmalamt Baden-Württemberg
Silberburgstraße 193
70178 Stuttgart

Literatur

- Aitken, M. J.: *Physics and Archaeology*. Clarendon Press, Oxford 2. Auflage 1974.
Scollar I., Tabbagh A., Hesse A., Herzog I.: *Archaeological prospecting and remote sensing*. Cambridge University Press 1990.



16 Original-Luftbild vor der digitalen Entzerrung.



17 Luftbild der Abb. 16, jedoch digital entzerrt.



18 Kombination aus entzerrtem Luftbild und dem Ergebnis geoelektrischer Prospektion am Beispiel der Schwabsburg im Ostalbkreis.



19 Resistogramm der römischen Villa in Staufen (Breisgau).