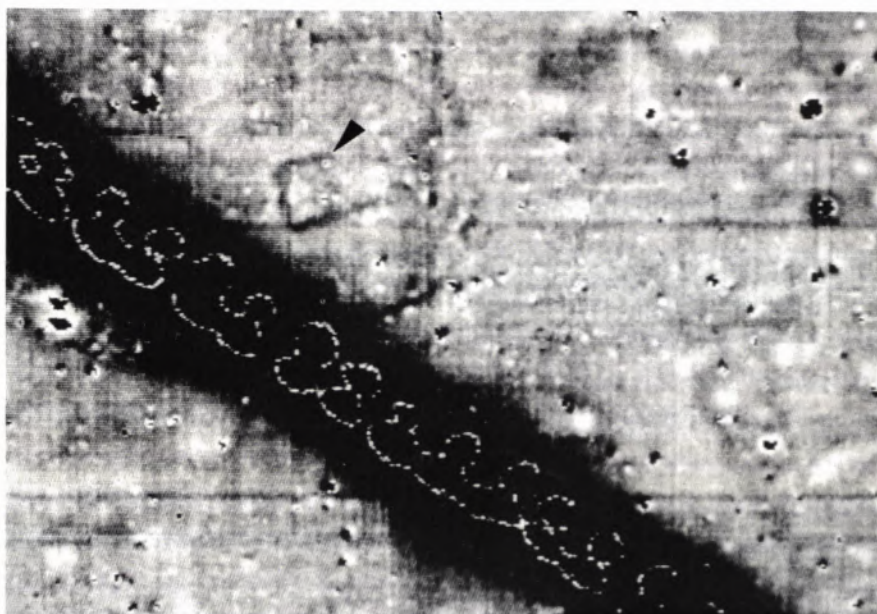


# Naturwissenschaften und Archäologische Denkmalpflege (4)

Die Geophysik am Landesdenkmalamt im Aufbau

Harald von der Osten-Woldenburg

■ 1 Magnetogramm des Bereiches der mittelalterlichen Kirche nahe Schwieberdingen. Quer durch das Magnetogramm zieht sich eine starke magnetische Anomalie, die von Röhren der Bodensee-Wasserversorgung verursacht wird. Oberhalb dieser Anomalie heben sich Strukturen (Pfeil) ab, die der Kirche und der Friedhof-Umfassungsmauer zugeordnet werden können. Meßraster: 25 x 25 cm.



In den drei – 1981, 1984, 1989 – erschienenen Beiträgen der Artikelfolge „Naturwissenschaften und Archäologische Denkmalpflege“ wurde die Bedeutung naturwissenschaftlicher Untersuchungen durch die Anthropologie, die Paläobotanik und Paläozoologie für die Auswertung von Grabungen eindrücklich dargestellt; diese Disziplinen sind heute fest in der Landesarchäologie verankert. Im Aufsatz „Die Geophysik am Landesdenkmalamt im Aufbau“ werden verschiedene geophysikalische Verfahren vorgestellt, deren Einsatz von unmittelbarer Bedeutung für die tägliche Arbeit der Gebietskonservatoren in der Archäologischen Denkmalpflege ist, und die heute – zusammen mit der Luftbildarchäologie – unentbehrlicher Teil moderner Denkmal-Prospektion geworden sind. Mit geophysikalischen Verfahren können etwa Ausdehnung und Strukturen archäologischer Objekte kartiert werden, deren Lage – durch Lesefunde, Begehungen oder durch die Luftbildarchäologie – bekannt ist. Nicht minder wichtig, dienen diese Methoden aber auch der Prospektion größerer, zur Überbauung anstehender Areale, in denen archäologische Befunde und Funde nur vermutet werden können. Dem Archäologen kann so die Geophysik entscheidende Kriterien für seine „Diagnose“ und für denkmalpflegerische Maßnahmen liefern.

Aus diesem Grund besteht seit dem 1. 8. 1991 beim Referat 25, Großgrabungen, eine Arbeitsstelle, die den Einsatz und die Entwicklung geophysikalischer Prospektions-Verfahren für die Archäologische Denkmalpflege durchführt. Solche Verfahren wurden zwar auch schon früher in der Praxis eingesetzt, erst aber die stürmische Entwicklung der Computer-Technologie hat für die Geophysik zukunftsorientierte Perspektiven in der Denkmalpflege eröffnet. Die neuen physikalischen, high-tech-bestimmten Methoden haben ihre eigene Terminologie, an die man sich aber schnell gewöhnen dürfte.

## Beispiel Schwieberdingen – Luftbildarchäologie und Geophysik

Eine Überdeckung durch z. B. dickere Humusschichten kann das Erkennen archäologischer Strukturen durch die Luftbildarchäologie zumindest teilweise erschweren, wenn nicht sogar unmöglich machen. Direkte Messungen der physikalischen Eigenschaften des Bodens

oder Messungen eines Feldes außerhalb des Bodens, das durch dessen physikalische Eigenschaften verändert oder beeinflusst wird, ermöglichen es, Informationen auch über solch überdeckte archäologische Strukturen zu erhalten: Auf einem 1991 in der Nähe von Schwieberdingen (Kr. Ludwigsburg) aufgenommenen Luftbild sind teilweise der Umriss einer mittelalterlichen Kirche sowie Teile der Friedhofs-Umfassungs-

mauer zu erkennen. Dazu ergänzend zeigt Abbildung 1 das vorläufige Ergebnis der geophysikalischen Prospektion: In diesem Magnetogramm hebt sich das Friedhofsareal deutlich von der Umgebung ab. Zudem sind Feinstrukturen sichtbar, die im Luftbild nicht zu erkennen sind. Der breite, sich quer durch das Magnetogramm ziehende dunkle Streifen wird von zwei Röhren der Bodensee-Wasser-Versorgung ver-



ursacht. Die Geophysik stellt somit ergänzend zur Luftbildarchäologie der Archäologie Prospektionsmethoden zur Verfügung, deren Ergebnisse sowohl der Vorbereitung von gezielten Rettungs-Ausgrabungen als auch der Dokumentation von archäologischen Denkmälern dienen, die zunächst nicht ausgegraben, sondern mit Hilfe des Denkmalschutzgesetzes geschützt werden sollen.

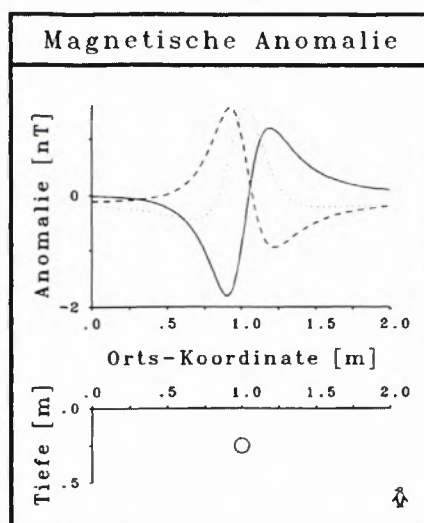
## Geophysikalische Methoden in der Archäologie

Von den vielen geophysikalischen Untersuchungsmethoden läßt sich eine ganze Reihe in der Prospektion archäologischer Objekte und Denkmale einsetzen. Bislang werden in der Archäologie vor allem drei Methoden angewendet: die **Geomagnetik** (Messung lokaler Störungen des Erdmagnetfeldes in Bodennähe), die **Geoelektrik** (Kartierung oberflächennaher Erdwiderstände bzw. Leitfähigkeiten) und – seltener – das **Bodenradar** (Erfassung emittierter elektromagnetischer Impulse, die aufgrund von sich räumlich ändernden magnetischen und elektrischen Eigenschaften an so definierten Schichtgrenzen im Erdboden teilweise reflektiert werden). Geoelektrik und vor allem Geomagnetik werden beispielsweise seit Beginn der 80er Jahre sehr erfolgreich am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege in München eingesetzt.

Welche der geophysikalischen Methoden letztendlich zum Erfolg führt, hängt von den jeweiligen Bodenverhältnissen vor Ort ab: Je größer der Kontrast der zu messenden physikalischen Eigenschaft – je nach gewählter Methode ist das die Leitfähigkeit, die Schallhärte, Dichte etc. – zwischen dem Boden und den in ihm vorhandenen, zu prospektierenden Objekten ist, um so verlässlicher kann eine Aussage über Struktur, Lage und Ausdehnung dieser Objekte getroffen werden.

## Geomagnetische Prospektion

Zur Zeit (Ende 1991) wird am Landesdenkmalamt ausschließlich die geomagnetische Prospektion durchgeführt. Die Ausweitung der geophysikalischen Prospektion auf andere Verfahren ist nicht nur geplant, sondern notwendig: Jede Methode ist abhängig von den vor Ort anzutreffenden Bodenverhältnissen (physikalische Eigenschaften der Böden), die sich zudem in der Fläche auch innerhalb kurzer Distanzen signifikant verändern können.



■ 2 Querprofil eines im Erdreich eingelagerten magnetischen Störkörpers und dessen magnetische Anomalie. Form und Betrag der Anomalie sind abhängig vom Winkel zwischen der Meßrichtung und der Längserstreckung des Störkörpers (durchgezogene und punktierte Linie: Meßrichtung parallel bzw. senkrecht zur Längserstreckung des Störkörpers; gestrichelte Kurve: Störkörper und Meßrichtung schließen miteinander einen Winkel von 30 Grad ein).

## Der Begriff der magnetischen Anomalie

Bei der geomagnetischen Prospektion wird das Erdmagnetfeld in Bodennähe gemessen. Dabei werden lokale Abweichungen oder Störungen des Erdmagnetfeldes erfaßt. Diese Störungen – im folgenden als Anomalien bezeichnet (analog dazu werden die Objekte, die diese Anomalien erzeugen, als Störkörper angesprochen) – werden durch die magnetischen Eigenschaften der in jedem Boden vorhandenen Eisenoxide verursacht. Diese Eisenoxide erhalten eine vom Erdmagnetfeld induzierte Magnetisierung (eine Ausrichtung der einzelnen Molekular-Magnete), deren Betrag abhängig ist von den magnetischen Eigenschaften der Eisenoxide. Die lokalen Unterschiede dieser sich in horizontaler als auch in vertikaler Richtung voneinander unterscheidenden induzierenden Magnetisierungen sind die Ursache für die lokalen Inhomogenitäten des Erdmagnetfeldes vor allem in Bodennähe: Da die Feldstärke einer Anomalie mit der dritten Potenz der Entfernung zu dem dieses Störfeld erzeugenden Störkörper abnimmt, ist der Einfluß vor allem schwach ausgeprägter Anomalien auf das Erdmagnetfeld in Bodennähe am größten.

Da die magnetischen Felder Vektorfelder sind, sind die Form und der

Betrag einer Anomalie abhängig von dem Winkel, den der Störkörper mit der Meßrichtung einschließt. Für die Abbildung 2 wurde die magnetische Anomalie eines runden, unendlich in Nord-Süd-Richtung langgestreckten Störkörpers von 10 cm Durchmesser berechnet.

Lokale Anomalien des Erdmagnetfeldes, die von archäologischen Denkmälern erzeugt werden, sind von ihrem Betrage her meist sehr schwach, verglichen mit den auf geologische Schichten zurückzuführenden magnetischen Anomalien: Die Feldstärke des Erdmagnetfeldes beträgt in unseren Breiten etwa 50 000 nano Tesla (nT), die der von archäologischen Objekten verursachten Anomalien oft nur wenige nT, seltener bis zu einigen 10ern nT, geologische Anomalien weisen hingegen nicht selten Werte von einigen 100 nT auf!

## Meßprinzip

An einem vereinfachten Beispiel sei kurz dargestellt, wie eine magnetisch prospektierbare Struktur entstehen kann, welchen Einfluß sie auf das Erdmagnetfeld hat und welches Ergebnis die magnetische Prospektion dieser Struktur liefern würde. Der Boden bestehe aus zwei Schichten (z. B. Humus auf Löß), deren magnetische Eigenschaften sich signifikant voneinander unterscheiden. Durch das Ausheben nicht allzu flacher Gräben wird nicht nur das stärker magnetische Material der Humusschicht, sondern auch schwach magnetischer Löß entnommen. Nach Aufgabe der Gräben werden diese entweder durch den Menschen wieder zugeschüttet oder im Laufe der Zeit durch Erosionsvorgänge verfüllt. Dabei wird auch Material aus dem magnetisch starken Humusbereich in den Lößhorizont transportiert. Je stärker zudem der Humushorizont in der Folgezeit durch weitere Erosionsprozesse abgetragen wird, um so größer wird der bereits bestehende Kontrast zwischen den Magnetisierungen des Materials innerhalb des Grabenbereiches und seiner Umgebung, um so deutlicher wird somit auch die magnetische Anomalie der Gräben ausgeprägt sein.

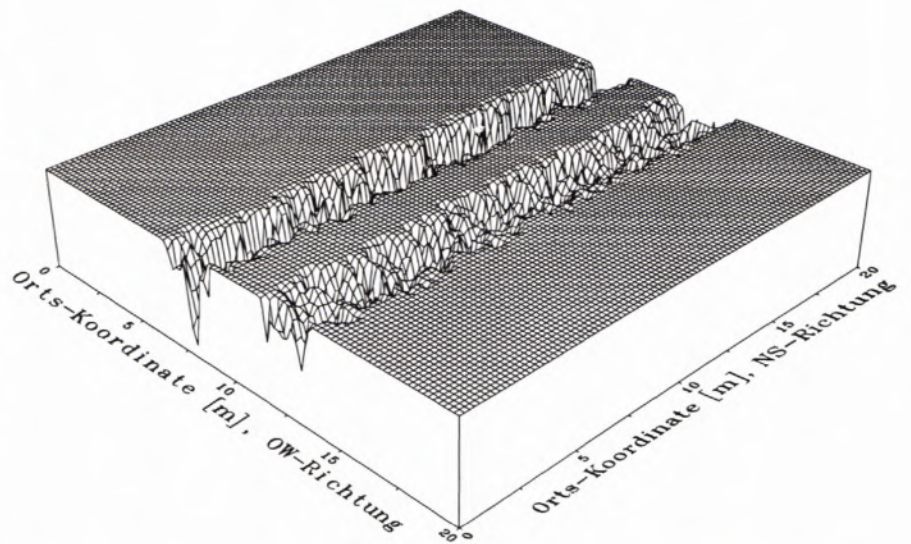
In Abbildung 3 ist ein Ausschnitt eines Doppelgrabens mit nicht konstanter, d. h. ortsabhängiger Tiefen- und Breitenstreckung dargestellt. Der Boden, in dem sich diese beiden Gräben befinden, sei schwach magnetisch. Werden diese beiden Gräben mit stark magnetischem Material verfüllt, entstehen die in der Abbildung 4 gezeigten magnetischen



Anomalien, die um so ausgeprägter sind, je größer die induzierte Magnetisierung des Füllmaterials und der Querschnitt der Gräben sind. Sowohl der Querschnitt der Gräben als auch die induzierte Magnetisierung des Füllmaterials gingen in die Berechnung als ortsabhängige Variablen ein (deshalb sind der Betrag und die Form der Anomalien in der Abbildung 4 entlang der Grabenstruktur nicht konstant). Würden in einem quadratischen Meßraster von 25 cm Seitenlänge diese beiden Anomalien gemessen und für die Darstellung der Meßergebnisse die Meß- in Grauwerte umgerechnet, ergäbe sich das in der Abbildung 6 gezeigte Bild. Dabei wurde eine Darstellung gewählt, bei der größer werdende Meßwerte zunehmend helleren Grautönen entsprechen.

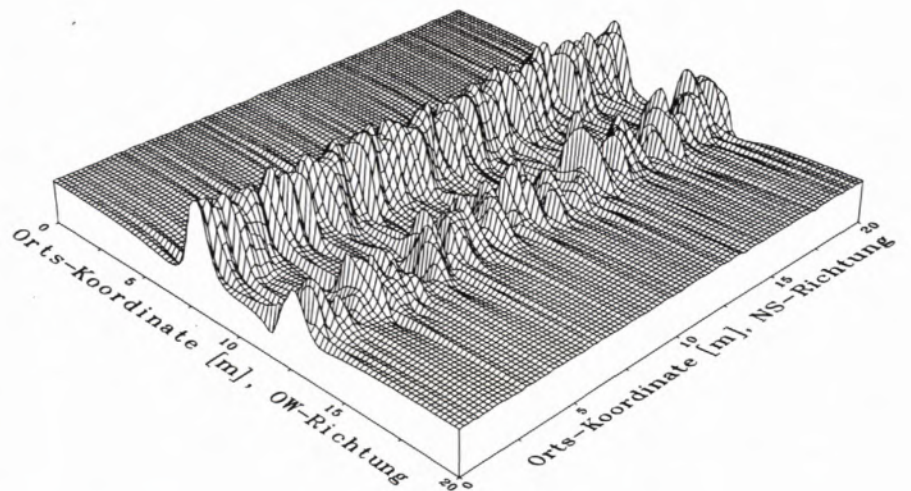
Die Erfassung dieser schwachen magnetischen Anomalien, die von archäologischen Objekten hervorgerufen werden, erfolgt am Landesdenkmalamt noch ausschließlich mit einem **Fluxgate-Gradiometer** mit einer Auflösung von bis zu 0.1 nT. Mit den beiden Sonden dieses Gradiometers wird das Erdmagnetfeld gleichzeitig in einem vertikalen Abstand von etwa 40 cm und 90 cm von der Erdoberfläche gemessen. Die Differenz-Beträge dieser Messungen werden zunächst im Speicher des Gradiometers abgelegt. Diese Differenz-Messung ist notwendig, um technisch, kosmisch und geologisch bedingte Störungen größtenteils beseitigen zu können, deren Extremwert die der gesuchten archäologischen Störungen bei weitem übertreffen können und so die Prospektion von schwachen magnetischen Anomalien nahezu unmöglich machen würden.

Das bedeutet jedoch nicht, daß aufgrund dieser Gradiometer-Anordnung die Messungen frei von jeglichen Störungen sind. Nahezu in jeder magnetischen Messung ist ein „Noise“ (Hintergrund-Rauschen) vorhanden. Dieses kann beispielsweise von den unterschiedlichen Magnetisierungsgraden der Substanzen verursacht werden, die sich entweder nahe der Erdoberfläche befinden oder das archäologische Objekt unterlagern. Auch ist es möglich, daß an der Erdoberfläche statistisch verteilte Keramikscherben, deren Magnetisierung größer ist als die des Bodens, das ansonsten ruhige Bild störend beeinflussen. Eine solche Situation ist in Kochendorf bei Bad Friedrichshall (Kr. Heilbronn) innerhalb eines 1990 entdeckten römischen Kastell-Bereiches anzutreffen. Die Häufigkeit magnetischer Anomaliewerte inner-



halb des für diese Messung interessierenden Wertebereiches zwischen  $-3.5$  nT und  $+5.0$  nT ist in der Abbildung 7 dargestellt. Das ansonsten ruhige Bild wird von einer Vielzahl verteilter Tonscherben beeinflusst (die Oberfläche des Meßgebietes war vollkommen eben, d. h. Störungen durch Ackerfurchen o. ä. traten

■ 3 Modell eines Doppelgrabens zur Berechnung magnetischer Anomalien. Die in einem schwachen magnetischen Horizont ausgehobenen Gräben werden nach deren Aufgabe durch den Menschen oder durch Erosionsprozesse verfüllt. So gelangt auch magnetisch stärkeres Material aus dem Humus-Bereich in diese Gräben.

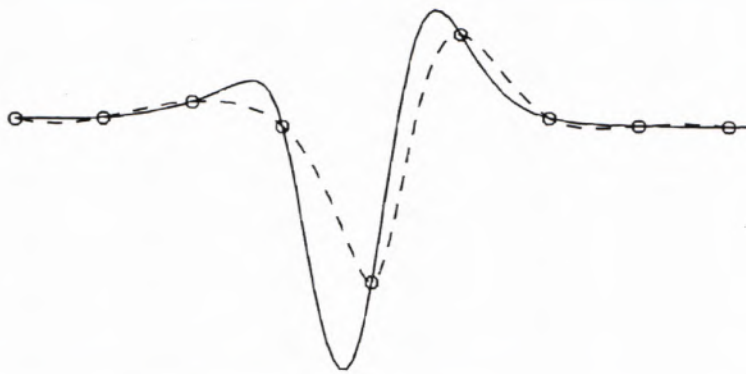


hier nicht auf). Die im folgenden zu besprechende Umsetzung der Meß- in Grauwerte ergibt ein magnetisch unruhiges Bild, in dem feine Strukturen, die auf eine Innenbebauung dieses Kastells zurückgeführt werden können, zu erkennen sind. Die Häufigkeits-Balken am unteren und oberen Rand des dargestellten Wertebereiches entstanden durch Aufsummierung aller Meßwerte, die unter- bzw. oberhalb des dargestellten Meßintervalls liegen und vornehmlich auf Messung von auf dem Acker vorhandenen Metallteilen zurückzuführen sind. Allgemein gilt: Je größer das (Nutz-) Signal/Noise-Verhältnis ist, um so größer sind die Chancen, sehr schwache, archäologisch bedingte Anomalien erkennen zu können.

■ 4 Berechnete magnetische Anomalien des in der Abbildung 3 dargestellten, mit stark magnetischem Material verfüllten Doppel-Grabens.



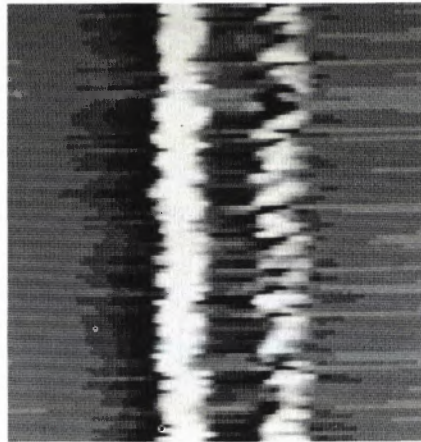
## Wirkung des Aliasing-Effektes



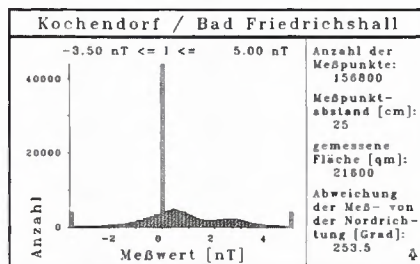
————— magnetische Anomalie  
 ○ ○ ○ gemessene Anomalie-Werte  
 - - - - - ermittelte Anomalie



■ 5 Aliasing-Effekt: Informationsverlust durch eine Messung einer magnetischen Anomalie mit zu großem Meßpunkt-Abstand. Die aufgrund der gemessenen Werte (durch Kreise markiert) bestimmte Anomalie unterscheidet sich in Form und Betrag wesentlich von der tatsächlich vorhandenen Anomalie (durchgezogene Kurve). Eine mit diesen erhaltenen Meßwerten durchgeführte Modellrechnung würde zu anderen Ergebnissen führen als eine Berechnung, die auf der kontinuierlich erfaßten Meßreihe basiert.



■ 6 Ergebnis geomagnetischer Kartierung des in der Abbildung 3 gezeigten, mit stark magnetischem Material verfüllten Doppelgrabens, falls die Prospektion in einem Meßraster von 25 cm durchgeführt würde.



■ 7 Häufigkeitsverteilung gemessener magnetischer Anomaliewerte innerhalb eines magnetisch gestörten Areal.

Mit den im Gradiometer eingebauten Fluxgate-Sonden, die zueinander einen Abstand von 50 cm haben, wird das Erdmagnetfeld am Ort dieser beiden Sonden gemessen, einschließlich der durch geologische Schichten, archäologische Objekte etc. verursachten lokalen Abweichungen vom „Normalwert“ dieses Feldes. Die Sonden nutzen die Nichtlinearität der Magnetisierungskurve von Spulenkernen aus. Zwei zueinander parallel angeordnete Eisenkerne sind von je einer Spule umgeben, die zueinander gegensinnig gewickelt sind. Durch diese beiden Spulen werden die beiden Spulenkern einander gegensinnig bis zur Sättigung magnetisiert und in einer beide umschließenden Induktions-Spule eine Spannung induziert. Diese ist der parallel zu den Spulenachsen verlaufenden Magnetfeld-Komponente des Gleichfeldes (z. B. des Erdmagnetfeldes), in dem sich dieses Spulensystem befindet, proportional.

### Ablauf der Messungen und Datenerfassung vor Ort

Das zu messende Gebiet wird zunächst in sog. Meßquadranten eingeteilt. Die Größe eines jeden Meßquadranten richtet sich nach dem gewählten Meßpunkt-Abstand und liegt im allgemeinen zwischen 400 m<sup>2</sup> (bei einem Meßpunkt-Abstand von 1 m) und 25 m<sup>2</sup> (Meßpunkt-Abstand: 12,5 cm). Auch eine Messung mit einem Punkt-Abstand von 6 cm (Fläche des Meßquadranten: 6,25 m<sup>2</sup>) wurde in der Zwischenzeit erfolgreich durchgeführt. Ausgelegte Handleinen, die in einem konstanten Abstand markiert sind, ermöglichen eine genaue Einhaltung des gewählten Meßpunkt-Abstandes.

Die Wahl des Meßpunkt-Abstandes ist vor allem von der Größe der vermuteten und zu kartierenden Strukturen abhängig. So ist es wenig sinnvoll, Messungen in einem Abstand von 1 m durchzuführen, wenn von der Archäologie her Strukturen erwartet werden, deren Durchmesser oder größte Längserstreckung bedeutend kleiner als dieser gewählte Abstand sind. Wir streben eine nahezu kontinuierliche Aufzeichnung an, auch wenn die Datenmenge mit der Verkleinerung des Meßpunkt-Abstandes für ein Areal konstanter Fläche sehr schnell recht groß wird. Eine nahezu kontinuierliche Aufzeichnung bedeutet in der Praxis, daß der Abstand zweier Meßpunkte zueinander möglichst gering gehalten werden muß. Eine Messung des Erdmagnetfeldes mit seinen lokal



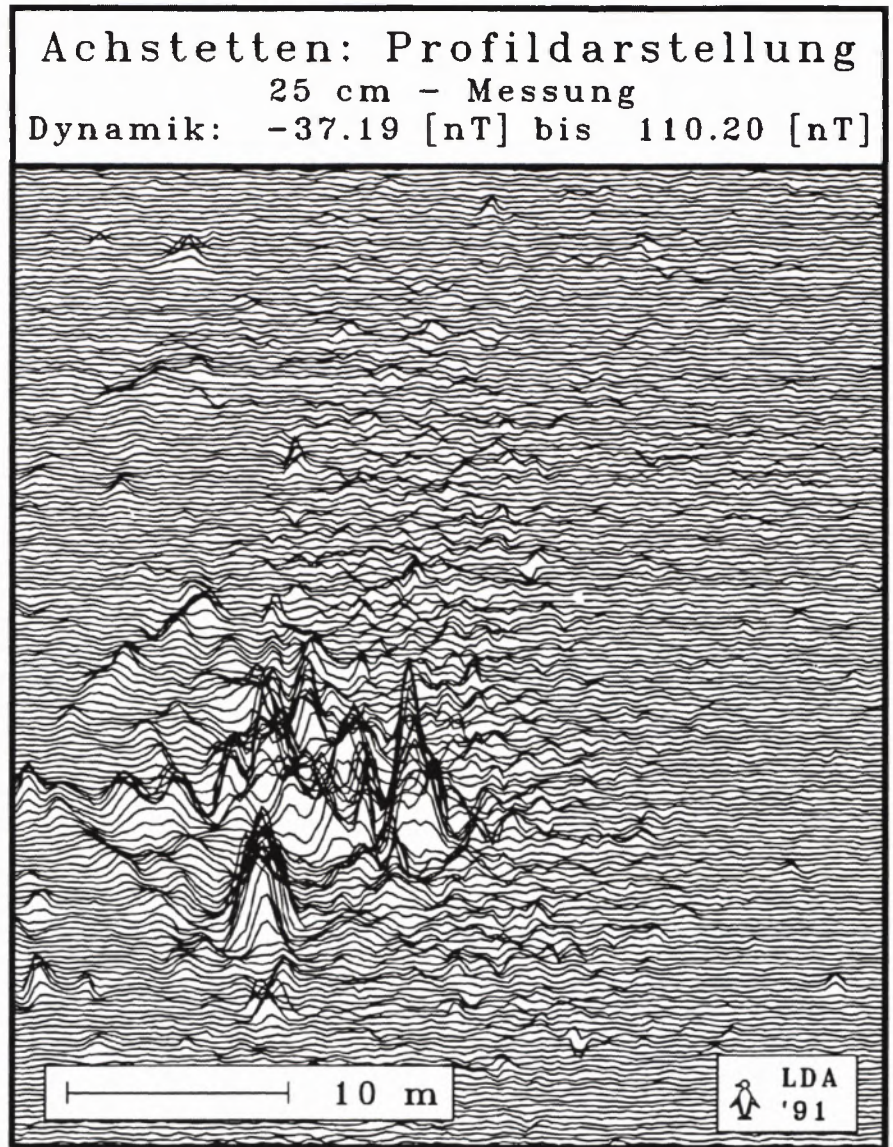
begrenzten Störfeldern bei möglichst geringem Meßpunktabstand hat vor allem zwei Vorteile: Zum einen werden dabei Feinstrukturen mit erfaßt, die sonst nicht oder nur teilweise erfaßt werden würden; zum anderen ist eine möglichst vollständige Erfassung einer Anomalie für die erfolgreiche Durchführung von Modellrechnungen notwendig. Eine Erfassung einer Anomalie mit großem Meßpunktabstand läßt auf eine andere Form der Anomalie und damit auf einen anderen Störkörper schließen (eine Art Aliasing-Effekt, Abb. 5). Da zudem die Berechnung von Anomalien bekannter Störkörper eindeutig ist, umgekehrt die Ermittlung von Störkörpern aus gemessenen Anomalie-Kurven hingegen mehrdeutig sein kann – Störkörper mit unterschiedlichen Magnetisierungs-Graden, Tiefenlagen und Formen können einander sehr ähnliche, mitunter auch gleiche Anomalien erzeugen, ist der geplagte Modellierer für jede Zusatzinformation, die er den Anomalien entnehmen kann, recht dankbar.

Da sich im Gradiometer nur 16000 Daten speichern lassen, muß die Datenerfassung vor Ort auch mit einem transportablen Rechner durchgeführt werden. Mit Hilfe eines mit dem Gradiometer gelieferten Programms ist es möglich, bereits im Gelände die Qualität der erfaßten Daten zu überprüfen und gegebenenfalls die Messungen daraufhin abzustimmen. Eine Darstellung der Daten vor Ort in Punktdichte-Schrift ist mit diesem Programm nur bedingt möglich: Da wir am Landesdenkmalamt auch in Meßpunktabständen messen, die hard- und softwaremäßig vom Gerätehersteller nicht vorgesehen sind, können die Meßergebnisse erst im Labor nach rechnerischer Berücksichtigung der gewählten und den Messungen zugrunde liegenden Quadrantenstrukturen dargestellt werden.

### Datenverarbeitung und Darstellung der Meßergebnisse

Je nach Größe des zu messenden Gebietes und je nach gewähltem Meßpunktabstand fallen Datenmengen an, deren Ver- und Bearbeitung den Einsatz eines leistungsfähigen Rechners erfordern. Bei der Messung einer Fläche von beispielsweise 1 ha werden bei einem Meßpunktabstand von 50 cm 40000 Daten, bei einem Meßpunktabstand von nur 12,5 cm 160000 Werte, also das Vierfache, erfaßt.

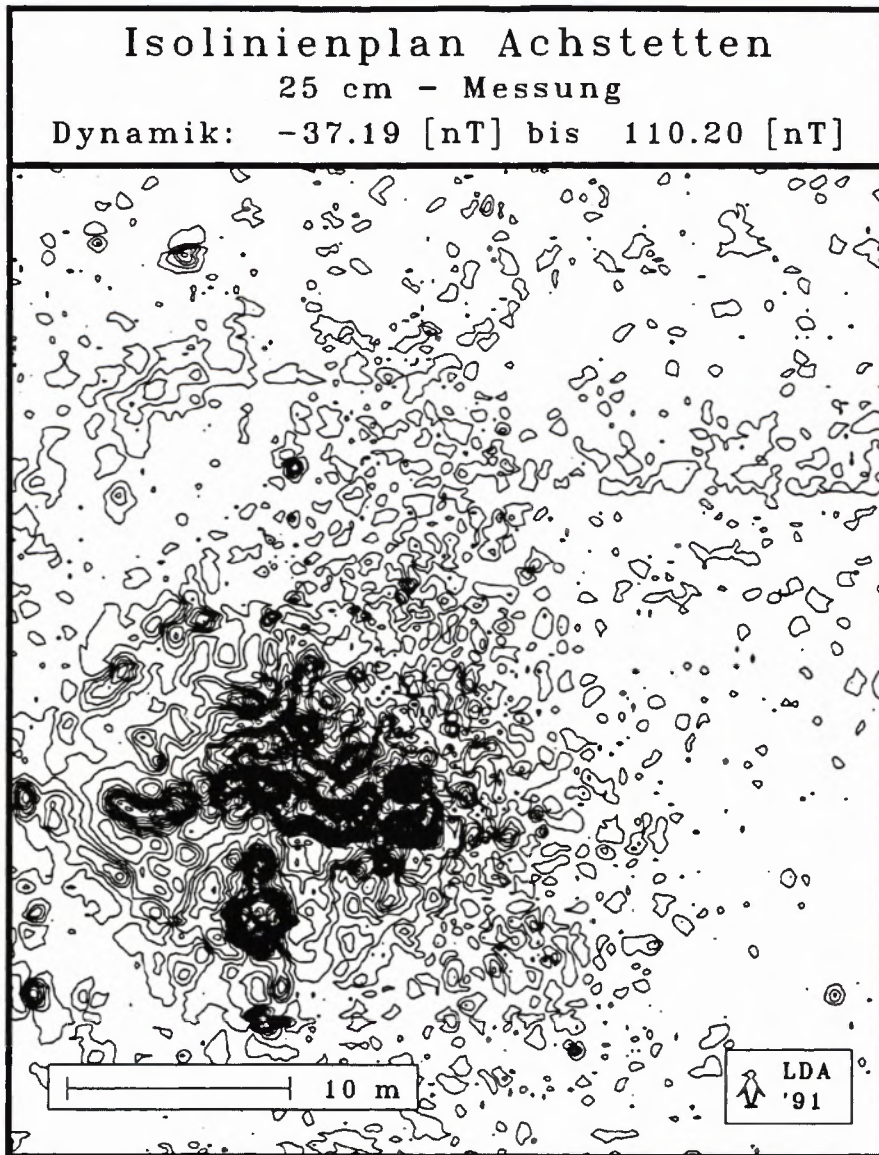
Die jedem Meßquadranten zugehörigen Daten müssen zunächst von



der Geräte-Drift befreit werden. Geräte-Drift bedeutet, daß sich der Nullpunkt des Meßgerätes zeitlich verändert. Diese Veränderung ist vor allem von der Lufttemperatur abhängig und ist erfahrungsgemäß bei wenigen Graden oberhalb des Gefrierpunktes minimal. Bisherige Beobachtungen lassen ferner darauf schließen, daß die Drift auch von dem sich z. T. zeitlich stark verändernden Erdmagnetfeld beeinflusst wird. Diese Geräte-Drift wird korrigiert, indem angenommen wird, daß die Veränderung des Nullpunktes linear erfolgt. Eine Annahme, die wohl nur eine recht grobe Annäherung an die Realität darstellt, da es sehr wahrscheinlich ist, daß diese Veränderung Schwankungen unterworfen ist. Diese Annäherung ist jedoch um so besser erfüllt, je schneller die Messung eines Quadranten durchgeführt wird, und je kürzer somit der zeitliche Abstand zweier solcher Nullpunkt-Messungen ist. Da durch

■ 8 Magnetogramm (Ausschnitt: Risalit und Hypokaust-Anlage) eines römischen Gutshauses nahe Achstetten, Kreis Biberach. Profildarstellung.

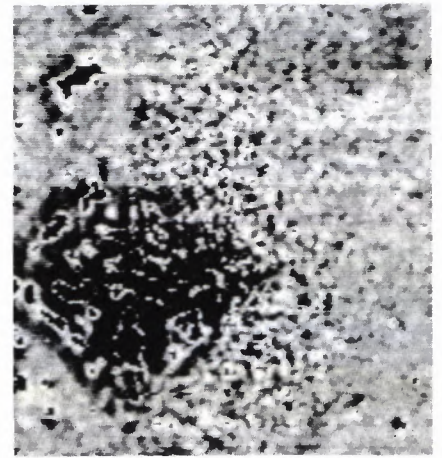




■ 9 Magnetogramm (Ausschnitt wie Abb. 8) eines römischen Gutshauses nahe Achstetten. Darstellung als Isolinien-Karte.

die Vorbereitung der Messung für den nächsten Quadranten (Umsetzen der Meßleinen etc.) eine mehr oder weniger lange Meßpause entsteht, müssen in einem zweiten Verarbeitungsschritt die zwischen den einzelnen Messungen entstandenen Driften beseitigt werden. Dadurch werden die einzelnen Meßquadranten einander „angeglich“.

Grundsätzlich lassen sich die korrigierten Meßwerte mit unterschiedlichen Methoden darstellen, bevor die Daten weiterverarbeitet und schließlich interpretiert werden können. Solche Darstellungsarten sind z. B. die Isolinienkarte, die Darstellung in Punktdichte- oder in Symbolschrift, die Profildarstellung und die digitale Bilddarstellung (Meßwertdarstellung durch Grauwerte). Bei der **Isolinien-Darstellung** werden durch geeignete Interpolationsverfahren die Lage derjenigen Orte ermittelt oder berechnet, bei



■ 10 Magnetogramm (Ausschnitt wie Abb. 8) eines römischen Gutshauses nahe Achstetten. Darstellung in 16 Graustufen. Neben einem Risalit und der Hypokaust-Anlage sind Feinstrukturen (Lineamente) zu erkennen.

denen ein bestimmter Wert der magnetischen Anomalie gemessen wurde. Die Verbindung all der Punkte gleichen Wertes ergibt die Isolinie. Bei den nächsten beiden genannten Darstellungen erfolgt eine Zuordnung des einzelnen Meßwertes zu einem bestimmten, vordefinierten Symbol: Bei der **Punktdichteschrift** wird jedem Meßwert eine bestimmte Fläche in der Darstellung zugewiesen, die für jeden Meßwert gleich groß ist. Je nach Betrag dieses Meßwertes wird diese ihm zugewiesene Fläche mit einer bestimmten Anzahl von Punkten (z. B. steigende Punktzahl mit größer werdendem Meßwert) ausgefüllt. Die Punkte sollten dabei möglichst gleiche Abstände zueinander haben, da sonst Verdichtungen innerhalb dieser Flächen ein lokales Extremum in den Meßdaten vortäuschen würden. Bei der **Darstellung in Graustufen** erfolgt eine Umwandlung des Meßwertes nach einer vorgegebenen Zuordnungs-Vorschrift in einen Grauton. Dadurch entsteht eine schwarz-weiße, fotografische Darstellung der lokal begrenzten magnetischen Anomalien des Meßgebietes. Im günstigsten Fall stehen dafür 256 verschiedene Graustufen zur Verfügung und es können 1280×1024 Bildpunkte (Meßwerte) gleichzeitig dargestellt und bearbeitet werden. Dies erlaubt eine sekundenschnelle Darstellung ohne Informationsverlust auch von sehr großen und hochauflösenden Messungen. Nicht zuletzt ist diese Darstellung nicht nur in schwarz-weiß, sondern – durch geeignete Addition der drei Farb-Komponenten Grün, Blau und Rot – auch in Farbe möglich (Falschfarben-Darstellung). Diese digitale Bildverarbeitung ist für die Auswertung von Prospektions-Er-

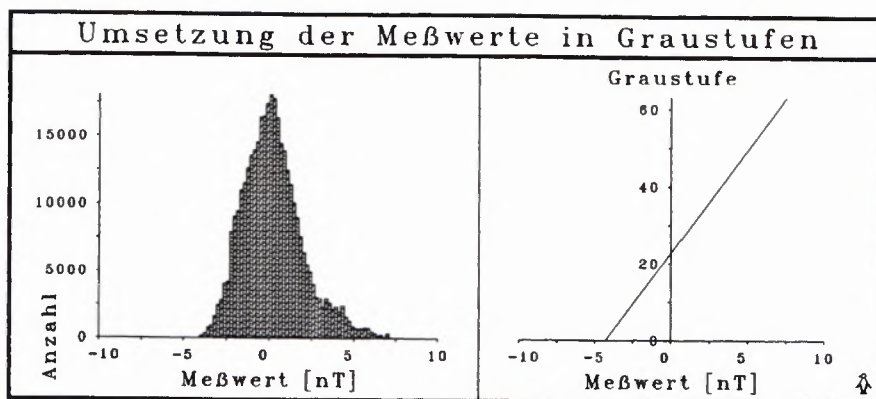


gebnissen wohl am besten geeignet und wird daher hier am Landesdenkmalamt vornehmlich durchgeführt. Anhand eines Ausschnittes einer Messung eines römischen Gutshofes nahe Achstetten (Kr. Biberach) werden in den Abbildungen 8–10 drei der erwähnten Darstellungsarten einander gegenüber gestellt. (Der Ausschnitt beinhaltet vor allem einen Risalit und die Hypokaust-Anlage dieses Gutshofes).

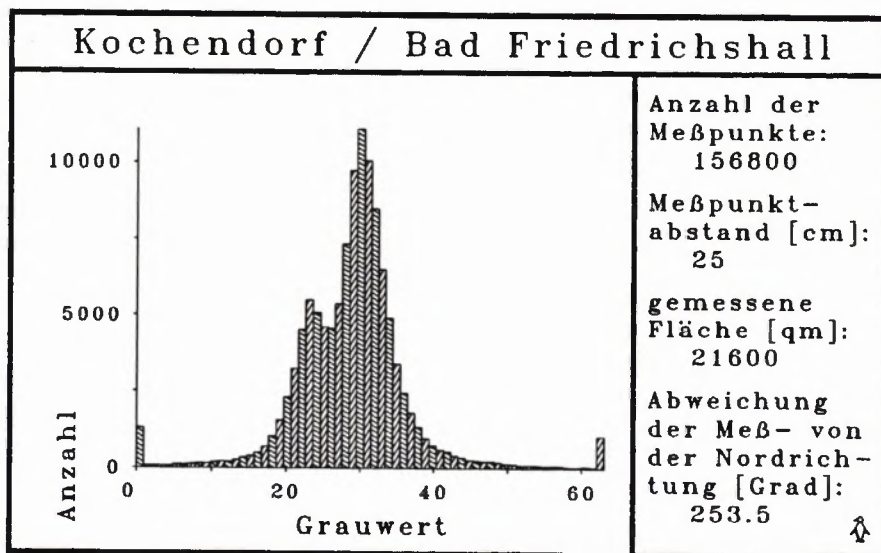
Vor der eingehenden Verarbeitung der Daten (Filterung, Kontrastverstärkung etc.), erfolgt eine Umrechnung der einzelnen Meßwerte in Grauwerte. Das am Landesdenkmalamt entstehende Bildverarbeitungsprogramm stellt einen gewählten Dynamik-Bereich aufgrund der Beschränkung durch die derzeit vorhandene Hardware nur mittels maximal 64 verschiedener Graustufen dar. (Eine Darstellung in 256 verschiedenen Graustufen wird angestrebt).

Die Zuweisung eines (durch den Grauwert beschriebenen) Grautonnes zu einem Meßwert erfolgt zunächst anhand folgender Linearität: Schwarz wird dem Grauwert 0 zugeordnet, weiß entspricht dem Grauwert 63 (Abb. 11).

Abweichend von dieser linearen Zuordnung zwischen dem Meßwert und einem Grauton sind weitere Zuordnungen denkbar, die durch „Look-Up-Tables“ (LUT's) beschrieben werden. Die verschiedenen LUT's dienen u. a. der Kontrastverstärkung, -verschiebung, -streckung und -umkehr. Gegenwärtig wird versucht, mit diesen LUT's auch eine optimale Kontrastverstärkung zu erreichen. Als Beispiel gelte hier die Grauwert-Verteilung der Messung in Kochendorf (Abb. 12). Aus diesem Histogramm ist ersichtlich, daß bestimmte Grauwerte sehr häufig, andere fast gar nicht auftreten. Das bedeutet, daß in der Darstellung nur ein Teil des maximalen Informationsgehaltes erreicht wird. Aus der aus den Daten bestimmten Grauwert-Verteilung (Grauwert-Histogramm) läßt sich eine Verteilungsfunktion berechnen (Abb. 13). Definieren wir diese Grauwert-Verteilung als LUT, wird die ursprüngliche Grauwert-Verteilung so verändert, daß aus zuvor kaum sichtbaren Kontrasten scharfe Konturen entstehen. Weitere Methoden die verschiedene Filter (Meridian-, Gradienten-, Hochpaß-, Tiefpaß- und Bandpaß-Filter) zur Verfügung stellen, werden zur Zeit erarbeitet. Mit diesen Filtern können einerseits Störungen in den Messungen beseitigt, andererseits



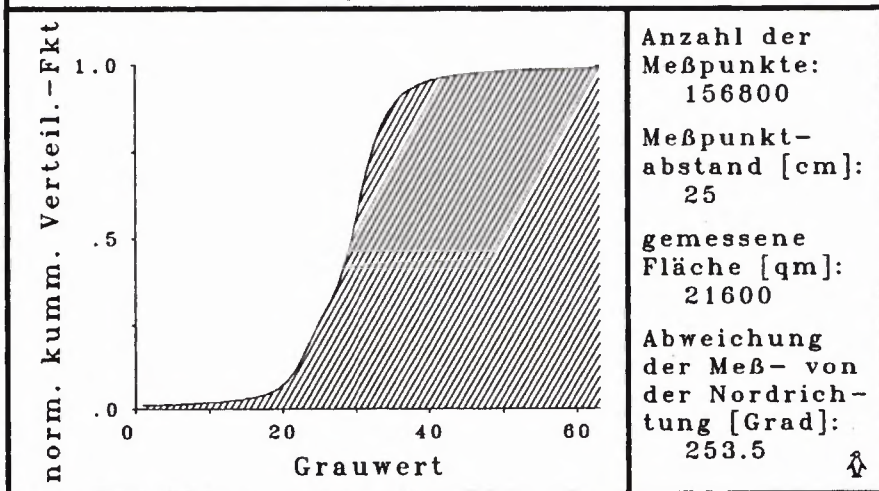
■ 11 Lineare Umrechnung der gemessenen Werte in Grauwerte. Linkes Teilbild: Die Häufigkeitsverteilung der Meßwerte dient der Wahl des darzustellenden Dynamik-Bereiches. Rechtes Teilbild: Lineare Abbildungsvorschrift zur Umsetzung der Meßwerte in 64 Graustufen.



■ 12 Grauwerte-Verteilung des Magnetogrammes des römischen Kastells in Kochendorf. Bestimmte Grauwerte treten sehr häufig, manche fast gar nicht auf. In der Darstellung wird somit nur ein Teil des maximalen Informationsgehaltes erreicht.

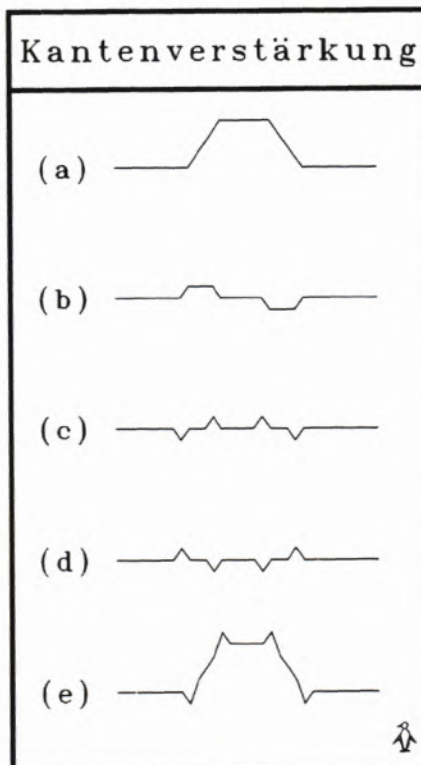
der Kontrast verstärkt werden. Eine Kontrastverstärkung, die mittels eines Gradientenfilters erzielt werden kann, beruht auf der Addition der invertierten zweiten Ableitung eines Digitalbildes und des Originalbildes. Das Grauwertprofil einer schwach erkennbaren Struktur habe in der Abbildung 14a dargestellte (idealisierte) Form. Die Addition der invertierten zweiten räumlichen Ableitung dieses Grauwertprofils (Abb. 14d) und des Original-Profiles verstärkt die Übergänge zwischen dem Plateau des Grauwertprofils und dessen Umgebung (Abb. 14e). Durch eine prozentuale Addition beider Terme läßt sich zudem dieser

## Kochendorf / Bad Friedrichshall



■ 13 Aus der in der Abbildung 12 gezeigten Häufigkeitsverteilung erhaltene normierte Verteilungsfunktion. Wird diese Verteilungsfunktion als LUT übernommen, entstehen aus zuvor kaum sichtbaren Kontrasten scharfe Konturen.

■ 14 Prinzip der verwendeten Kontrastverstärkung (Erhöhung des Dynamik-Umfanges lokal begrenzter Strukturen). a: Idealisiertes Grauwerte-Profil einer schwach erkennbaren Struktur. b: Erste Ableitung des Grauwerte-Profiles. c: Zweite Ableitung des Grauwerte-Profiles. d: Negierte zweite Ableitung. e: Die Addition der negierten zweiten Ableitung (d) und des Grauwerte-Profiles (a) erhöht den Kontrast innerhalb des Übergangs zwischen dem Plateau des Grauwerte-Profiles und dessen Umgebung.



Effekt verstärken. Im Beispiel der Abbildung 15 wurde unter anderem die Kontrastverstärkung durch Gradientenfilter anhand des Magnetogrammes des Friedhofareales nahe Schwieberdingen durchgeführt.

### Weitere Planungen

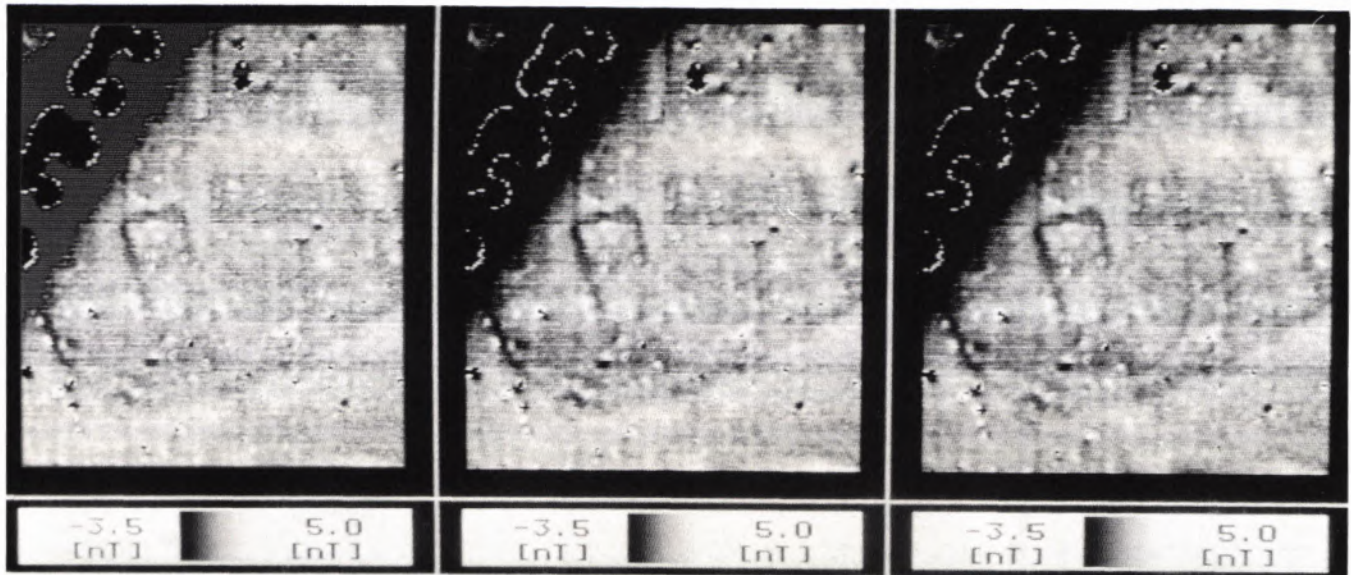
Wünschenswert ist die Anschaffung eines Cs-Magnetometer-Systems, mit dem künftig ebenfalls die geomagnetische Prospektion durchgeführt wird. Bei diesem Cs-Magnetometer-System handelt es sich um einen Prototyp. Es besitzt – verglichen mit dem Fluxgate-Gradiometer – u.a. folgende wichtige Vorteile:

- Auflösung: 0.001 nT (Fluxgate-Gradiometer: 0.1 nT);
- der Sondenabstand ist variabel und kann somit bestimmten Fragestellungen angepaßt werden (der Sondenabstand ist beim Fluxgate-Gradiometer auf 50 cm fest eingestellt);
- ein Zuschalten 50 Hz, 16 $\frac{2}{3}$  Hz und von weiteren definierbaren Filtern ermöglicht die Unterdrückung der durch Hochspannungsleitungen, Eisenbahn etc. bedingten modernen Störungen.

Die Meßwerte werden dann auch nicht mehr in einem geräteeigenen „Memory“ abgespeichert, sondern permanent und direkt von einem transportablen Rechner im Gelände aufgezeichnet. Das neue System wird jedoch die Messungen mit dem Fluxgate-Gradiometer nicht ersetzen, sondern ergänzen. Denn Messungen mit dem Fluxgate-Gradiometer können schneller, einfacher und auch bei nicht allzu günstigen Boden – (z. B. frisch geackter Boden) und Wetterverhältnissen unproblematischer durchgeführt werden. Können die Messungen mit dem Fluxgate im Ein-Mann-Einsatz durchgeführt werden, so sind für den Einsatz des Cs-Magnetometers zwei Personen notwendig.

Dafür lassen sich mit dem neuen System, aufgrund nicht hardwaremäßig fest voreingestellter Meßpunkt-Abstand-Muster Messungen in verschiedenen Meßquadranten-Strukturen variabler durchführen. Nicht zuletzt können aufgrund des frei wählbaren Sondenabstandes und somit des zu messenden Vertikal-Gradienten und der um den Faktor 100 größeren Empfindlichkeit wesentlich genauere Messungen durchgeführt werden. Messungen, die vor allem in hinsichtlich des Hintergrundrauschens ruhigen Meßgebieten wohl erst mit diesem Gerät ermöglicht werden. Die endgültige Entscheidung, mit welchem der bei-





den Geräte gemessen werden soll, kann letztendlich nur vor Ort, im Gelände getroffen werden.

Wenn ein geringer Magnetisierungs-  
kontrast, jedoch großer Kontrast in  
der Leitfähigkeit oder im Erdwider-  
stand zwischen dem Boden und den  
in ihm eingelagerten archäologi-  
schen Objekten vorhanden sind, ist  
es wenig sinnvoll, eine geomagneti-  
sche Prospektion durchzuführen.  
Zur Durchführung der geophysikali-  
schen Prospektion unter solchen  
Bedingungen ist die Anschaffung einer  
**Geoelektrik-Anlage** notwendig.

Beiden Verfahren – Geomagnetik  
und Geoelektrik – sind vor allem,  
was die Geomagnetik betrifft, sehr  
schnell Grenzen gesetzt, wenn in  
Stadtgebieten prospektiert werden  
soll. Hier eignen sich andere Verfah-  
ren der Geophysik wie z.B. die  
Hammerschlag-Seismik und des Bo-  
denradars. Um auch in Stadtgebie-  
ten erfolgreich prospektieren zu  
können, ist eine Anwendung eines

dieser oder anderer, hier nicht auf-  
geführter Verfahren in der Zukunft  
unumgänglich.

Vor einiger Zeit wurde mit der Pro-  
spektion von Altlasten und Depo-  
nien am Institut für Geophysik in  
München begonnen und dabei er-  
folgreich ein VLF (Very Low Frequen-  
cy)-Verfahren auch in Stadtgebieten  
eingesetzt. Ein Verfahren, dessen  
Anwendung auch in der Archäologie  
denkbar wäre und im nächsten Jahr  
in Zusammenarbeit mit dem Münch-  
ner Institut erstmals in der geophysik-  
alischen Prospektion archäologi-  
scher Denkmale testweise durchge-  
führt werden soll.

**Dipl. Geophys. Harald von der  
Osten-Woldenburg**  
LDA · Archäologische  
Denkmalpflege  
Silberburgstraße 193  
7000 Stuttgart 1

■ 15 Mit Hilfe von LUT's und Gradien-  
tenfiltern erreichte Kontrastverstärkun-  
gen am Beispiel der mittelalterlichen Kir-  
che nahe Schwieberdingen. Der jeweils  
dargestellte (und durch diese Operation  
veränderte) Dynamik-Umfang ist bei den  
jeweiligen Teilbildern angegeben.