

**Luftbild, Magnetik und digitale Bildverarbeitung zur  
Prospektion archäologischer Fundstätten**

Die Lage der archäologischen Denkmalpflege ist in allen Industrieländern ähnlich: Die Probleme ergeben sich nicht nur durch den enorm gestiegenen Landverbrauch für Industrieanlagen, Straßenbauten und Expansion von Siedlungen und Städten, sondern noch schwerwiegender durch die intensive landwirtschaftliche Nutzung des Bodens und die mit den Monokulturen einhergehende verstärkte Erosion.

In hügeligem Gelände kann dies die Abschwemmung von über 20 Tonnen Erdreich pro Hektar nach einem einzigen Regenguß, bei einer jährlichen Humusneubildung auf der gleichen Fläche von weniger als 1,5 Tonnen, bedeuten. Die archäologischen Fundstätten schwimmen im Hangbereich davon und werden in den Senken und Tallagen soweit überdeckt, daß sie für eine Erforschung außer Reichweite geraten.

Diesem Problem der großflächigen Zerstörung archäologischer Denkmäler kann nicht mit konventioneller archäologischer Ausgrabung begegnet werden. Überhaupt müssen die unterirdischen Fundstellen zur Erforschung und zum Schutz erst einmal erkannt werden. Hier sind also Prospektionsmethoden gefordert, die auch auf großen Flächen mit hoher Genauigkeit und Detailauflösung greifen.

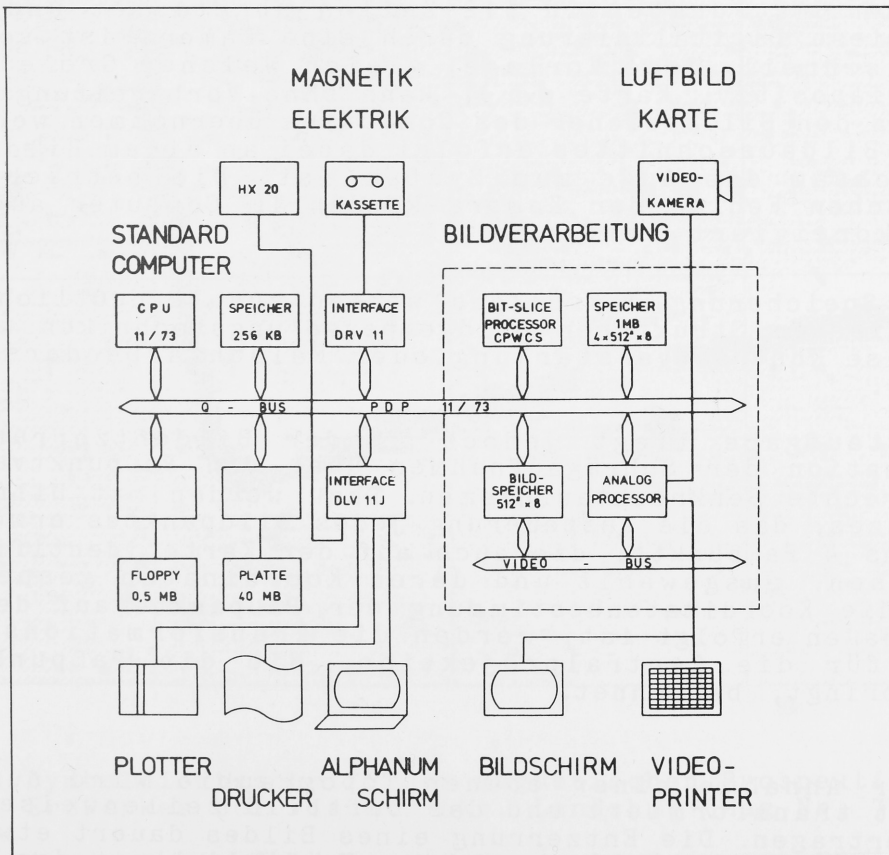


Abb. 1: Blockbild der Anlage zur digitalen Verarbeitung von Luftbild und Magnetik (Bild-Computer) am Bayer. Landesamt für Denkmalpflege

---

Die Prospektion dient daher einerseits der Vorbereitung und Ergänzung von ganz gezielten Ausgrabungen als ultima ratio, andererseits aber vor allem der Inventarisierung und Dokumentation der archäologischen Denkmäler.

Die Einführung moderner Prospektionsverfahren in die deutsche Landesarchäologie ist vor allem das Verdienst von I. Scollar am Rheinischen Landesmuseum Bonn. Seit über 30 Jahren werden im Rheinland Luftbild und geophysikalische Verfahren zur archäologischen Prospektion entwickelt und eingesetzt. Die Meilensteine dieser Entwicklung waren insbesondere der Bau eines Differenzial-Protonenmagnetometers, die Automatisierung der Datenaufnahme der magnetischen Prospektion, die elektronische Weiterverarbeitung der Meßdaten und schließlich vor etwa 10 Jahren der Aufbau einer Anlage zur digitalen Bildverarbeitung. Die archäologische Karte als Kombination von Flurkarte, Luftbild und geophysikalischer Prospektion wird nun zusammen mit einer Datenbank aller verfügbaren Archive am Computer geführt.

Seit einigen Jahren bedient sich auch das Bayer. Landesamt für Denkmalpflege dieser Techniken zur archäologischen Denkmalpflege. Die Luftbildarchäologie wurde von O. Braasch wesentlich intensiviert und führte zur Entdeckung von einigen Tausend neuer Fundstellen. Die über mehrere Jahre und aus unterschiedlichen Richtungen aufgenommenen Bilder einer archäologischen Fundstätte können nun an einer eigenen Anlage zur digitalen Bildverarbeitung zu Plänen weiterverarbeitet werden (Abb. 1).

Die Digitalisierung von Luftbild und Karte erfolgt über eine Fernsenkammer in der Videonorm: die Bilder werden in einem Raster von 512 Punkten in 512 Zeilen abgetastet und dargestellt. Diese Digitalisierung durch eine Kamera ist sehr einfach und schnell. Jede Vorlage, gleich welcher Größe und Art (Fotos, Diapositiv, Karte o.ä.), kann ohne Vorbereitung in 1/10 Sekunde in den Bildspeicher des Computers übernommen werden. Die Wahl des Bildausschnittes erfolgt dabei an einem Bildschirm, der gleichsam das Auge zum System ist. Die beträchtlichen geometrischen Fehler der Kamera können im Computer auf  $\pm 0.2$  Prozent korrigiert werden.

Nach der Speicherung des Bildes werden zur Verdeutlichung der archäologischen Strukturen Bildverbesserungstechniken wie beispielsweise Kontrastverstärkung oder Falschfarbendarstellung angewandt.

Die Hauptaufgabe liegt jedoch in der Bildentzerrung: Die Transformation der Schrägaufnahmen über ein Paßpunktverfahren in maßgerechte Senkrechtaufnahmen. Dazu werden mit Hilfe eines Fadenkreuzes, das die Ansteuerung jedes Bildpunktes ermöglicht, mindestens 4 Paßpunkte, die auch auf der Karte identifizierbar sein müssen, ausgewählt und deren Koordinaten gespeichert. Nachdem die Koordinatenbestimmung der Paßpunkte auf der Karte gleichermaßen erfolgt ist, werden die Transformationskoeffizienten für die Zentralprojektion, die die Paßpunkte zur Deckung bringt, berechnet.

Unter der Annahme einer ebenen Topographie wird nun jeder Bildpunkt transformiert und das Luftbild zeilenweise in die Karte übertragen. Die Entzerrung eines Bildes dauert etwa 3 bis 5 Minuten und wird zur Kontrolle der Verlässlichkeit der gewählten Paßpunkte am Bildschirm betrachtet. Nach der Entzerrung steht das Luftbild maßgerecht in der topographischen Karte, die in einem weiteren Schritt noch auf das Bild kopiert werden kann. Weiterhin können mehrere solcher entzerrten Bilder entweder ganz oder im Ausschnitt am Bildschirm kompiliert werden.

Während die Luftbildarchäologie als flächendeckendes Prospektionsverfahren eingesetzt wird, erbringt die magnetische Prospektion am Boden bei ausgewählten Fundstellen noch genauere Pläne sogar bei Überdeckungen, die aus der Luft keine archäologischen Strukturen erkennen lassen. Dies wird durch die komplexen magnetischen Eigenschaften der in allen Böden vorhandenen Eisenoxide ermöglicht.

Die unterschiedlichen Magnetisierungen archäologischer Objekte wie beispielsweise verfüllte Gräben, Gruben, Brandstellen etc. verursachen Störungen des natürlichen Magnetfeldes der Erde: die Archäologie ist daher gleichsam im Magnetfeld über dem Boden abgebildet. Das Problem der Sichtbarmachung dieses latenten Bildes ist nun in einer Kombination von hochentwickelter Meßtechnik im Gelände mit der Auswertung der Meßdaten am Bildcomputer des Bayer. Landesamtes für Denkmalpflege befriedigend gelöst.

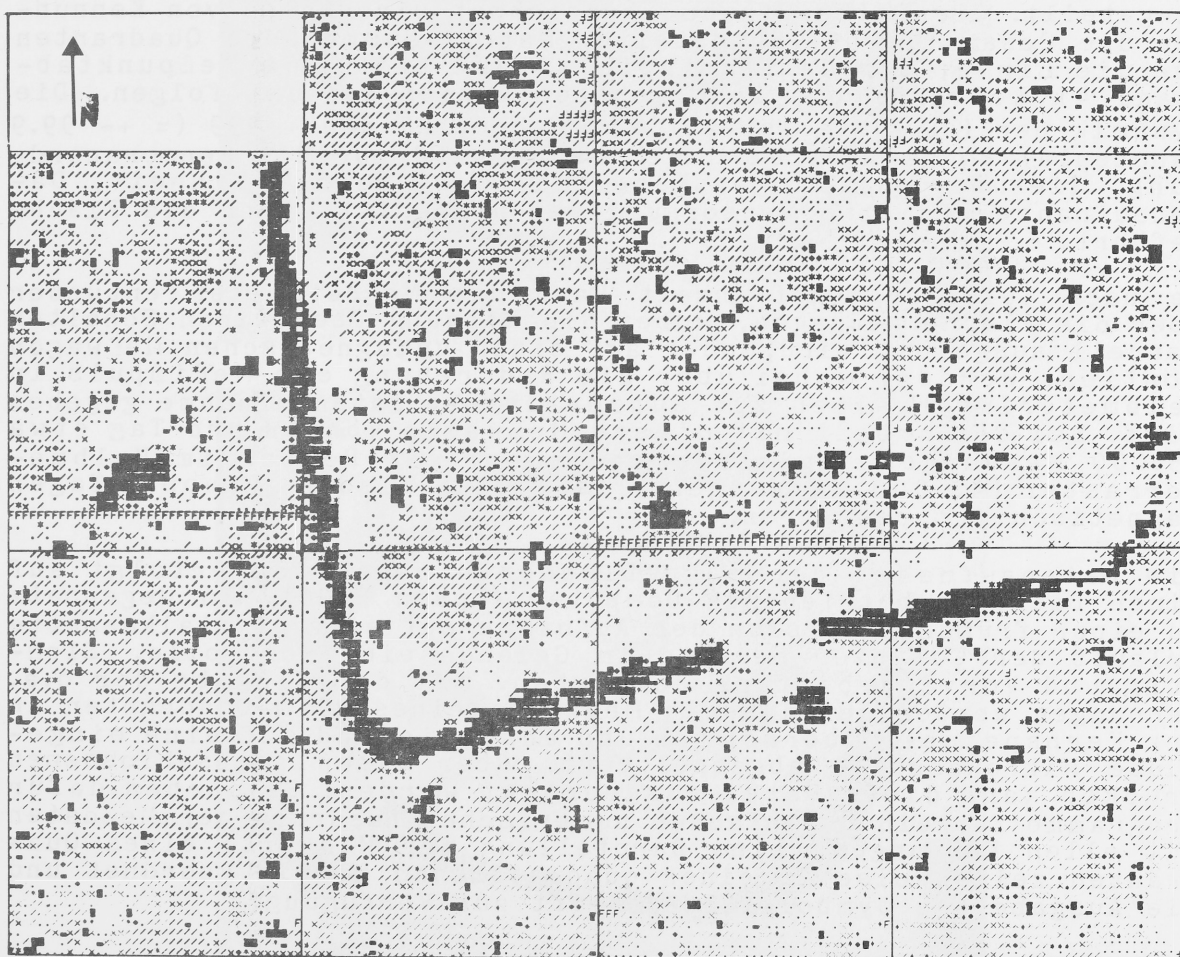


Abb. 2: Symboldichteschrift der magnetischen Prospektion eines Erdwerkes bei Viecht, Lkr. Landshut (Mag Nr. 7538/90B)

Ausdruck im Gelände mit Handheld-Computer HX20 und Thermodrucker P 40. Cäsium-Magnetometer, Vertikalgradient, 0,5 m-Meßintervall, Dynamik -0,5 bis 2,5 Nanotesla. Die 20 m-Quadranten sind in dieser Darstellung als Rechteck verzerrt. Die archäologischen Strukturen sind als Schwärzung zu erkennen.

---

Die archäologisch relevanten magnetischen Störungen sind meist so schwach, daß sie am besten mit den derzeit empfindlichsten Magnetometern, sogenannten "optisch gepumpten Cäsium-Magnetometern", gemessen werden. Zur Eliminierung sowohl der natürlichen, kosmisch und geologisch bedingten, als auch der technischen Störungen, deren Amplituden die gesuchten archäologischen Störungen völlig überdecken, bedient man sich einer Differentialmessung zweier Sensoren in vertikaler Anordnung mit einem Bodenabstand von 0,3 und 1,8 m und Meßintervallen von 0,5 m; so ist die hohe Empfindlichkeit von 1/10 Nanotesla der verwendeten Magnetometer zur archäologischen Prospektion zu nutzen (1/10 Nanotesla (nT) entspricht bei einer mittleren Stärke des Erdmagnetfeldes von 50.000 nT einer Auflösung von 2 in 1.000.000 Teilen!).

Die Logistik der Feldmessung richtet sich nach dem von I. Scollar am Rheinischen Landesmuseum Bonn entwickelten System: Eine 200 x 200 m Fläche wird in 20 m-Quadranten unterteilt, die im Gelände mit Pflöcken vermarktet werden. Diese 20 m-Quadranten werden mit Maßbändern und Meßleinen weiter in ein Meter-Raster eingeteilt. Zur Datenaufnahme bezeichnet eine Folge von Kennungen die Gesamtfläche, Fundstelle, Matrix-Nummer des Quadranten und die Linie, der dann beispielsweise bei 0,5 m Meßpunktabstand 41 Meßwerte bis zur nächsten Linien-Kennung folgen. Die Dynamik der Meßwerte ist auf einen Bereich von +-999 (= +- 99.9 Nanotesla) begrenzt. Bei der Messung wird nur die Sensoranordnung, die über ein langes Kabel mit der Anzeige-Einheit, Datenaufnahme und Stromversorgung verbunden ist, über die Fläche geführt.

Je nach Geländebeschaffenheit kann das Magnetometer entweder über die Fläche getragen, wobei die Messung über einen Schalter manuell ausgelöst wird, oder auf einen unmagnetischen Meßwagen montiert werden, wobei über die Raddrehung ein Meßimpuls in Halbmeterintervallen zur automatischen Datenaufnahme gegeben wird. Bei der Arbeit mit diesem Meßwagen können pro Tag etwa 25.000 Messungen registriert werden; ein Hektar im Halbmeter raster (40.000 Messungen!) läßt sich also in knapp 2 Tagen magnetisch prospektieren.

Die Datenaufnahme der magnetischen Prospektion erfolgt auf einen Batterie-betriebenen Computer (Epson HX20). Im Gegensatz zu einer früheren Version der Aufnahme auf eine Digitalkassette erlaubt der Computer bereits im Gelände eine Kontrolle, Sichtung und Vorverarbeitung der Daten. Mit der Eingabe der o.a. Kennungen werden jeweils die Meßwerte eines 20 m-Quadranten in den Kernspeicher übernommen und anschließend auf eine eingebaute Mikrokassette abgespeichert. Über einen angeschlossenen Drucker kann diese Datei ausgedruckt werden. Es stehen dafür Programme für einen einfachen numerischen Ausdruck der Meßdaten mit allen Kennungen, eine Darstellung der Meßwerte eines Quadranten zeilenweise in einer quadratischen Matrix geordnet und die Ausgabe als Symboldichteschrift zur Verfügung.

Die graphische Darstellung der Prospektionsmessung als Symboldichteschrift ermöglicht bereits im Gelände eine erste Interpretation der archäologischen Strukturen, die jedoch in der folgenden Datenverarbeitung im Labor ganz wesentlich vertieft werden kann (Abb. 2).

Der Darstellung der magnetischen Prospektion als digitales Bild liegt folgende Idee zugrunde: Der Meßpunkt im Gelände wird als Bildpunkt betrachtet und der Meßwert in einen Grauwert umgewandelt. Dazu wird der im Gelände eingesetzte Computer über eine serielle Leitung mit dem Bild-Computer gekoppelt.

Nach einer Prüfung der Datenstruktur und der Kennungen werden die Daten dem Format der Bildverarbeitung angepaßt. Der wichtigste Schritt hierbei ist die Reduzierung der Dynamik der Meßwerte von  $\pm 999$  auf 256 Graustufen des digitalen Bildes. Um hierbei nicht die hohe Meßgenauigkeit der Magnetometer zu verlieren, wird nach der statistischen Analyse der Daten eines Quadranten interaktiv ein Fenster im Histogramm der dynamischen Verteilung der Werte gesetzt und als Bilddatei formatiert.

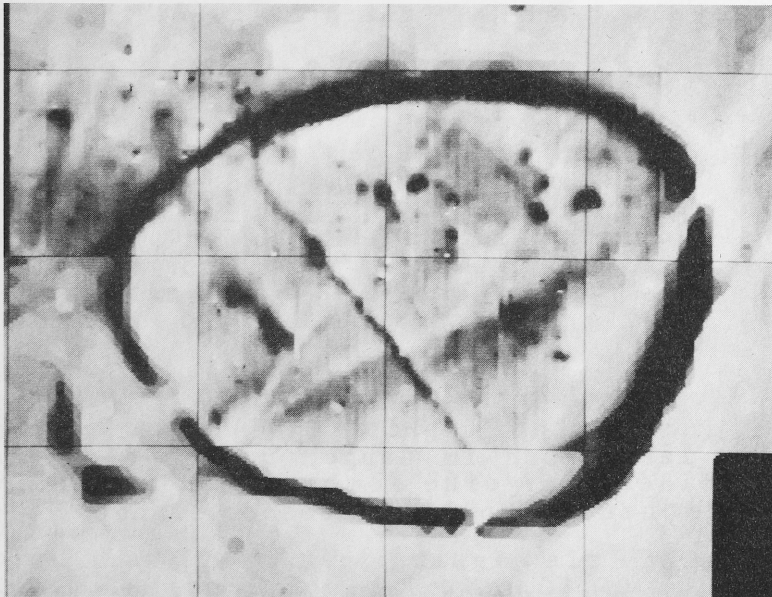
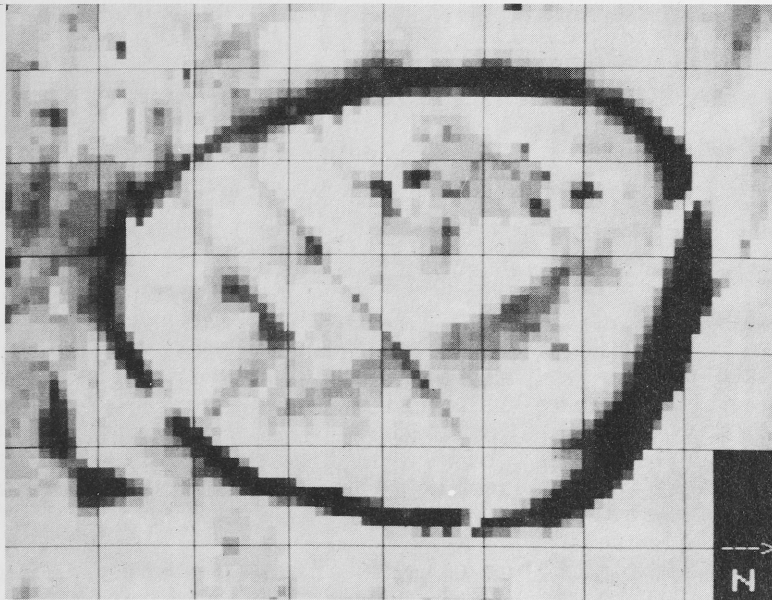


Abb. 3: Digitalbild der magnetischen Prospektion mehrerer Erdwerke am Galgenberg bei Kopfham, Lkr. Landshut.  
a) Cäsium-Magnetometer, Variometeranordnung, Meßintervall 1,0 m, Dynamik - 10,0 bis + 20,0 Nanotesla, 10 m-Gitter. Das Raster der Meßpunkte ist noch zu erkennen.  
b) dito, jedoch Daten gefiltert und Innenfläche mit Meßintervall 0,5 m nachgemessen, Dynamik -10,0 bis + 20,0 nT, 20 m-Gitter.

---

Zur Verarbeitung der Meßdaten als digitales Bild wird nun der Meßwert in einen Grauwert zwischen schwarz = 0 und weiß = 255 umgesetzt. Die 41 x 41 Meßdaten jedes 20 m-Quadranten werden nun in ein etwa briefmarkengroßes Bildfenster mit 41 x 41 Punkten eingelesen. Das Quadrat wird in der Videotechnik dabei im Verhältnis 4 : 3 verzerrt, da ein Bildpunkt am Schirm etwa 0,4 x 0,3 Millimeter mißt. Nach einer Korrektur dieses Effekts werden die Quadranten in einen Abbildungsmaßstab 1 : 500 vergrößert. Erst jetzt ist das "magnetische Abbild" der archäologischen Fundstätte am Bildschirm zu betrachten. Das Auge kann natürlich archäologische Strukturen in einem Bild wesentlich besser als in den bisherigen Zahlenschemata oder graphischen Darstellungsverfahren erkennen (Abb. 3).

Bildverbesserungstechniken wie beispielsweise Kontrastverstärkung, Filterung oder Falschfarbendarstellung ermöglichen weiterhin die Verdeutlichung der archäologischen Information im Bild.

Jeder dieser Verarbeitungsschritte dauert nur wenige Sekunden und ist sofort am Bildschirm sichtbar. Beispielsweise lassen sich die als Folge der thermischen oder elektronischen Drift der Magnetometer unterschiedlichen Niveaus der einzelnen Meßquadranten so genau anpassen, daß die Übergänge unsichtbar werden. Schwache lineare Anomalien werden nach Median-Filterung und Kontraststeigerung wesentlich verdeutlicht. Zur Sichtbarmachung kleiner lokaler Anomalien dienen Gradienten-Filter, die nach einer Subtraktion nicht mehr sichtbare Übergänge in den Grautönen nachzeichnen.

Eine ähnliche Verdeutlichung der geringen Unterschiede im Grauton läßt sich durch die Falschfarbendarstellung erreichen. Schließlich läßt sich solch ein als Bild bearbeitetes Magnetogramm gleichermaßen als zusätzlicher "Kanal" in den Luftbildplan kompilieren (Abb. 4).

Die Bildverarbeitung bietet, verglichen mit den "klassischen" Techniken zur Darstellung geophysikalischer Messungen wie Isolinienpläne, Punktdichteschrift, oder 3D-Plot, so viele Vorteile, daß sie die Möglichkeiten solcher Präzisionsmessungen zur archäologischen Prospektion tatsächlich erst nutzbar macht. Natürlich ist dies nicht nur auf die Magnetik beschränkt, sondern gilt für alle geophysikalischen Flächenmessungen.

Noch ist die Magnetik den anderen Verfahren an Meßgeschwindigkeit und Genauigkeit im Detail überlegen. Die technische Entwicklung der elektrischen, elektromagnetischen, thermischen und Radarverfahren ist jedoch im Gange, und es bleibt abzuwarten, ob sich nicht eines oder eine Kombination mehrerer Verfahren zur archäologischen Prospektion besser eignet.

Die Magnetik kann noch durch eine genauere Positionierung und vor allem durch deren Automatisierung verbessert werden. Außerdem wird versucht, den Meßfortschritt weiter zu erhöhen, was mit einem Sensor-Array, das statt eines Meßprofils gleich einen Streifen überdeckt, denkbar wäre. Die bisher verwendeten Cäsium-Magnetometer sind für eine solche Anordnung von mehrfachen Sensoren nicht geeignet. Von der finanziellen Seite einmal abgesehen, sind mehrere dieser Magnetometer wegen der Störanfälligkeit beim Einsatz im Gelände überhaupt nicht mehr zu kontrollieren. Dazu müßten einfachere quasi-kontinuierlich messende Magnetometer mit der gleichen Empfindlichkeit von 1/10 Nanotesla zur Verfügung stehen.

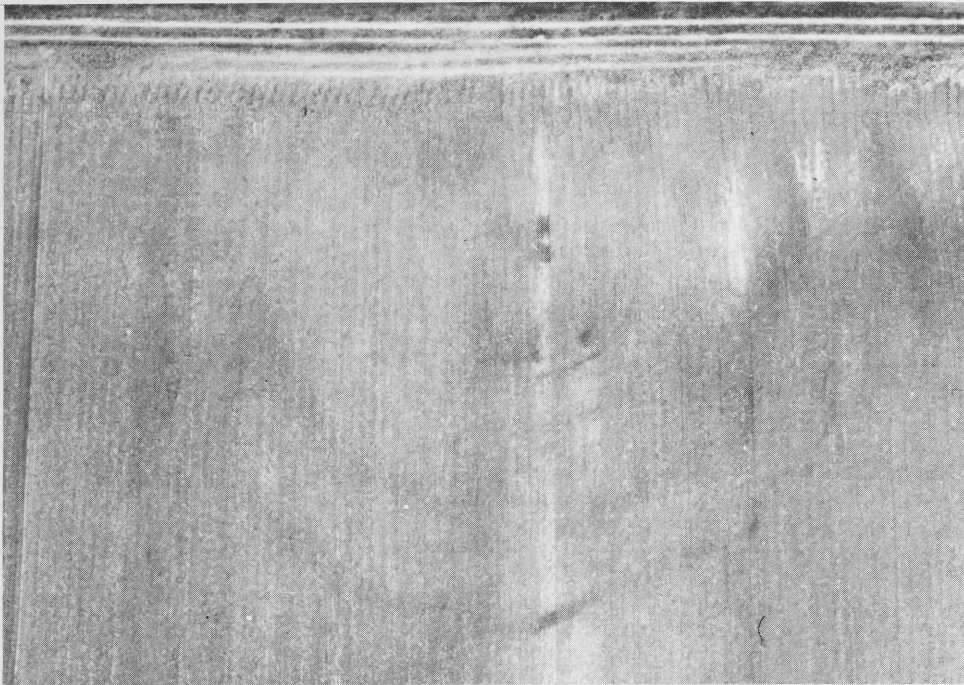


Abb. 4: Prospektion einer mittelneolithischen Kreisanlage bei Viecht, Lkr. Landshut (Plan Nr. 7538/90, Mag Nr. 7538/90 A).

oben: Luftbild der Anlage als Bodenmerkmale (O. Braasch, Freigabe Nr. GS 300/8624-81). Zu erkennen sind der Doppelgraben, 2 Palisadengraben und mehrere Gruben im Inneren.

unten: Magnetometerprospektion der Anlage, Cäsium-Magnetometer, Vertikalgradient, Dynamik  $-5,0$  bis  $+10,0\text{ nT}$ , Meßintervall  $0,5\text{ m}$ ,  $20\text{ m}$ -Gitter. Luftbild und Magnetogramm liegen fast parallel. Die Verfüllung des ehemaligen Hohlweges verursacht die starken magnetischen Störungen im westlichen Bereich. Ergänzend zum Luftbild ist im Süden der Eingang der Anlage als Erdbrücke zu erkennen.

---

## Ausgewählte Literatur

- Archaeometry (Zeitschrift des "Research Laboratory for Archaeology and the History of Art", Oxford, ab 1958).
- Prospezioni archeologiche (Zeitschrift der "Fondazione Lerici", Rom, ab 1966).
- Aitken, M.J.: Physics and Archaeology. Sec. Ed., Oxford 1974.
- Becker, H.: Geophysikalische Prospektionsmethoden in der Archäologie. Ed. B. Hroudá: Methoden der Archäologie. S. 48-62, 1978.
- Becker, H.: Aufbau einer Anlage zur digitalen Verarbeitung von archäologischen Luftbildern und Prospektionsmessungen. Das Archäologische Jahr in Bayern 1983, 201-203, 1984.
- Becker, H.: Verarbeitung magnetischer Prospektionsmessungen als digitales Bild. Das archäologische Jahr in Bayern 1984, 184-186, 1985.
- Becker, H., Christlein, R. u. Wells, P.S.: Die hallstattzeitliche Siedlung von Landshut-Hascherkeller, Niederbayern. Arch. Korrespondenzblatt 9, 1979.
- Clark, A.: Archaeological prospecting: a progress report. J. Arch. Sc. 2, 297-314, 1975.
- Graham, I. u. Scollar, I.: Limitation on magnetic prospection in archaeology imposed by soil properties. Archäophysika 6, 1-126, 1976.
- Hesse, A.: Prospections géophysiques a faible profondeur. Applications a l'archaeologique. Paris, 1966.
- Le Borgne, E.: Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol et sur celles du schiste et du granite. Ann. Géophys. 16, 159-196, 1960.
- Linnington, R.E.: Techniques used in archaeological field surveys. Phil. Trans. Roy. Soc. London, A 269, 89-108, 1970
- Kermorvant, A. u. Masson, J.: Bilan d'activité de l'unité de prospection archéologique de l'université de Tour (France). Archäophysika, 9, 669-73, 1979.
- Mullins, C.E.: The magnetic properties of soil and their application to archaeological prospecting. Archäophysika 5, 143-348, 1974.
- Ralph, E.K., Morrison, F. u. O'Brian, D.P.: Archaeological surveying utilizing a high-sensitivity difference magnetometer. Geoexploration, 6, 109-22, 1968.
- Scollar, I.: Transformation of extreme oblique aerial photographs to maps or plans by conventional means or by computer. Aerial reconnaissance for archaeology, 52-59, 1975.
- Scollar, I.: Luftbild-Kartierung für die Archäologie. Spektrum der Wissenschaft, 44-55, 7/1983.
- Tabbagh, A.: On the comparison between magnetic and electromagnetic prospection methods for magnetic features detection. Archaeometry 26, 171-182, 1984.

---

Dr. H. Becker  
Referat für archäologische Prospektion  
Bayer. Landesamt für Denkmalpflege  
Arabellastr. 1, 8000 München 81

