
Digitale Bildverarbeitung und graphische Datenverarbeitung in der archäologischen Prospektion

Helmut Becker

In der archäologischen Prospektion in Bayern werden Luftbild und Geophysik kombiniert eingesetzt. Beide Prospektionsverfahren, die Verarbeitung der Meßdaten, Verwaltung und Archivierung der Luftbilder wären ohne Computereinsatz mit dem wenigen Personal am bayerischen Landesamt für Denkmalpflege undurchführbar. Mit dem Aufbau des Luftbildarchivs in Landshut und des Labors zur digitalen Bildverarbeitung in München 1983 lief die Entwicklung der Computerverfahren zunächst getrennte Wege. Verwaltung und Archivierung der inzwischen über 650.000 Luftbilder erfolgt auf Personal-Computern auf der Basis von dBASE-Datenbanken. Aus der Fundstellenverwaltung wurde das Inventarisationsprogramm weiterentwickelt, das erstmals alle archäologischen Fundstellen Bayerns aus den Ortsakten und aus dem Luftbildarchiv in einer Datenbank zusammenfassen wird. Die Datenbankanwendungen wurden von W. Gerstner, dem Leiter des Luftbildarchivs, programmiert und betreut.

Der Aufbau des Labors zur digitalen Bildverarbeitung in München begann etwa zur gleichen Zeit im Zuge der gigantischen Baumaßnahmen des BMW-Werkes Regensburg-Harting. Dieses Labor hat die kombinierte Verarbeitung ausgewählter archäologischer Luftbilder und geophysikalischer Prospektionsmessungen zur Erstellung exakter Pläne archäologischer Denkmäler zur Aufgabe. Die erfolgreiche Prospektion vieler archäologischer Denkmäler, die eine hohe Qualität der archäologischen Quellen belegt, führte zum Projekt "Archäologische Reservate" in den Landwirtschaftsflächen. Hier sollen ausgewählte archäologische Denkmäler von überregionaler Bedeutung durch Flächenankauf, Einbindung in die EG-Programme zur Flächenstillegung oder durch Aufnahme in das Kulturlandschaftsprogramm aus der rauen landwirtschaftlichen Produktion herausgenommen und als Wiese unter absoluten Schutz gestellt werden.

Mit dem Umzug des Luftbildarchivs von Landshut nach München im Juli 1989 wurde personell und räumlich die dringend notwendige Einheit von Archiv und Auswertung geschaffen. Die Verbindung der Datenbanken der Inventarisierung und der Archive mit der Detailarbeit der Planerstellung einzelner archäologischer Denkmäler eröffnete insbesondere durch die Einführung eines graphischen Datenverarbeitungssystems (GDV) neue Möglichkeiten.

Diese GDV-Schnittstelle zwischen digitaler Bildverarbeitung von Einzelobjekten einerseits zu den Datenbanken der Inventarisierung und der Archive andererseits führt zum Aufbau eines geographischen Informationssystems archäologischer Denkmäler, das allerdings erst mit dem Abschluß der Datenbankeingabe der Inventarisierung funktionsfähig sein wird. Dieses archäologisch-geographische Informationssystem (AGIS) wird durch die Programme der Datenbanken gesteuert; die graphischen Anwendungen kommen beispielsweise bei Verbreitungskarten, archäologischen Karten unterschiedlicher Thematik, Führung der Flugkarten und Archivkarten sowie der Kartenwerke der Inventarisierung zum Tragen. Die Bedeutung des Aufbaus von AGIS mag aus der Tatsache ersichtlich sein, daß trotz der chronisch gespannten Mittel- und Personalsituation am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege die Stelle für

einen technischen Kartographen und ein zweiter graphischer Arbeitsplatz eingerichtet werden konnte. Da die Arbeiten am AGIS noch in den Kinderschuhen stecken, soll hier nur auf die jetzt schon bewährte Verbindung von digitaler Bildverarbeitung mit der graphischen Datenverarbeitung eingegangen werden.

Über das Zusammenwirken von Luftbild, Magnetik und digitaler Bildverarbeitung ist in den Archäologischen Informationen 8, Heft 2, 1985 berichtet worden. Die grundlegenden Merkmale der Meß- und Auswertungsverfahren sind dort beschrieben. Es mag daher ausreichen, wenn hier vor allem auf die Änderungen und Weiterentwicklung der Verfahren eingegangen wird.

Die Luftbildarchäologie in Bayern wird seit 1990 von dem Archäologen K. Leidorf, der als Nachfolger von O. Braasch sorgfältig in seine neue Tätigkeit eingewiesen worden war, unverändert weiter betrieben. Ein großer Sprung in der Weiterentwicklung der Magnetik steht 1991 ins Haus: Die bisherigen Cäsium-Magnetometer mit einer Empfindlichkeit von 0.1 Nanotesla (Nanotesla = nT bezeichnet die Stärke des erdmagnetischen Feldes; in unseren Breiten etwa 47.000 nT) können mit neuen (prozessorgesteuerten) Zählern bis 0.001 nT Empfindlichkeit betrieben werden. Dadurch öffnen sich neue Fenster für die magnetische Prospektion.

Technik und Positionierungsverfahren der automatisierten Meßwagen müssen ebenfalls verbessert werden: Die Sensoren werden dann als gedämpftes Vertikalpendel auf dem Meßwagen angeordnet. Die Genauigkeit der automatischen Positionierung wird durch Interpolationsverfahren optimiert; eine schnellere Meßdatenerfassung soll ein engeres Meßraster (0.25m statt bisher 0.50m) und damit eine höhere Auflösung bei der Prospektion feiner archäologischer Strukturen ermöglichen. Die magnetische Prospektion eines Hektars mit 25 cm Meßintervall bei einem Profilabstand von 50 cm (80.000 Messungen) soll dann nur wenig länger als ein Tag dauern. Die Datenaufnahme im Gelände wird von den Handheld-Computern auf Festspeicher umgestellt. Mit modernen Laptop-Computern kann nahezu die gesamte Meßdatenverarbeitung der Magnetik, deren graphische Darstellung bis hin zur Interpretation des digitalen Bildes bereits im Gelände erfolgen.

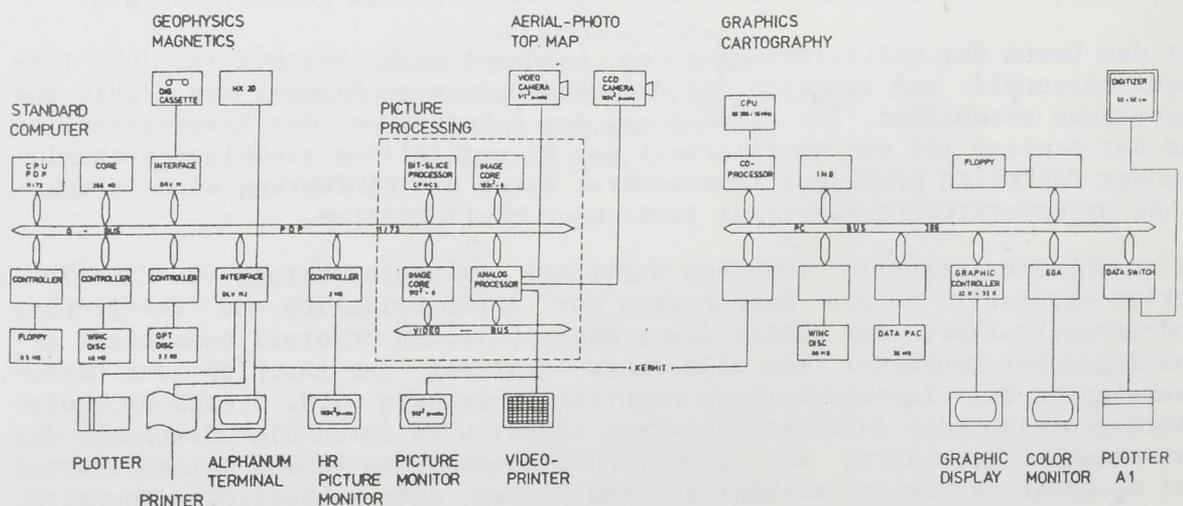


Abb. 1 Blockbild der kombinierten Computeranlage zur digitalen Bildverarbeitung und graphischen Datenverarbeitung am Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege in München (Stand 11/1990).

Trotz dieser Möglichkeiten der heutigen Computer-Technik wird die endgültige Auswertung der magnetischen Prospektion weiterhin am Bildcomputer im Labor gemacht. Nur hier kann Magnetik und Luftbild kombiniert und in die graphische Datenverarbeitung eingebunden werden. Das digitale Bildverarbeitungssystem im Münchner Labor läuft nun schon ins achte Jahr! Es gelang jedoch beim technischen Fortschritt mitzuhalten: Bildspeicher und Monitore wurden von der sogenannten Video-Norm mit 512 x 512 Bildpunkten (pixel) und 256 Graustufen auf das hochauflösende HR-Video mit 1024 x 1024 pixel umgestellt. Das Bild wird ohne die störende Interlace-Technik der Fernsehbildschirme als Ganzes auf einem so großen Monitor ausgespielt, daß die Arbeit sogar Spaß macht.

Die Digitalisierung der Luftbilder und der zur Entzerrung benötigten Kartenausschnitte erfolgt sehr schnell (0.1 Sekunden) mit einer HR-CCD Kamera, die 1024 x 1024 Sensoren mit hoher geometrischer Genauigkeit der Anordnung auf einem winzigen Chip enthält. Trotz der höheren Auflösung von Scannern wurde die Kamera-Digitalisierung wegen wesentlicher Vorteile bei der praktischen Arbeit beibehalten: Die verschiedenen Objektive der Kamera erlauben ohne Vorbereitung die sehr schnelle Digitalisierung jedes Formats und jeder Vorlage vom KB-Dia, Papierfoto bis zur Karte in nahezu jeder Vergrößerung. Die Auflösung von 1024 x 1024 pixeln stellt erfahrungsgemäß einen brauchbaren Kompromiß zwischen Erkennbarkeit von Details und Rechenzeit bei den geometrischen Operationen im Bild dar.

Die Arbeitsgänge bei der Luftbildentzerrung laufen folgendermaßen ab: Zunächst wird eine Übersichtsaufnahme zur Kontrolle der Paßpunkte auf die Karte übertragen, dann werden weitere Aufnahmen in den ersten Luftbildplan eingearbeitet. Bei sehr feinen Details wird ein Ausschnitt aus dem Luftbildplan als Zielbild digital vergrößert und mit dem Makro-Objektiv der CCD-Kamera eine extreme Vergrößerung eines Ausschnitts der Luftaufnahme digitalisiert und in das Zielbild transformiert. Die beiden Beispiele in diesem Beitrag wurden auf diese Weise erstellt. Andere Projekte wurden im Ausschnitt teilweise mit 200facher Vergrößerung bearbeitet. Auf einer aus 300 m Höhe aufgenommenen Kleinbildaufnahme werden dann bereits einzelne Kieselsteine am Boden sichtbar. Das Geheimnis für diese verblüffende fotografische Auflösung besteht in der Verwendung sehr hochwertiger Objektive und extrem feinkörniger Filme, die in dieser Kombination von O. Braasch in die Luftbildarchäologie eingeführt wurden. Auch das hier gezeigte Beispiel eines Speicherbaus im römischen Kastell von Eislingen-Salach läßt einzelne Getreidebüschel schon bei knapp 100facher Vergrößerung erkennen (Abb. 3). Das gleiche Ergebnis ließe sich bei der Digitalisierung des Diapositivs mit einem Scanner erst bei einer Auflösung von über 3.000 Zeilen pro cm erreichen.

Die Interpretation der Magnetik wurde durch die Darstellung in der HR-Video Norm auf dem großen Monitor ebenfalls erleichtert. Der Darstellung der Magnetik als digitales Bild liegt folgende Idee zugrunde: Der Meßpunkt im Gelände wird als Bildpunkt betrachtet und der Meßwert in einen Grauwert zwischen 0 = schwarz und 255 = weiß transformiert. Bei einem Meßraster von 0.50 m oder 0.25 m ist die Auflösung im Bildverarbeitungssystem natürlich kein Problem: Die Meßpunkte werden sogar vergrößert, um einen Verarbeitungsmaßstab von 1:500 zu erreichen. Die relativ grobe Rasterung des Magnetogramms wird durch Interpolationsverfahren oder Filterung ausgelöscht, so daß der Eindruck eines fotografischen Bildes des Untergrundes entsteht (Abb. 6).

Die Kunst der digitalen Bildverarbeitung besteht nun darin, die Erkennbarkeit der archäologisch relevanten Strukturen für das Auge zu optimieren. Die eigentliche Interpretation wird dann nicht der Maschine überlassen,

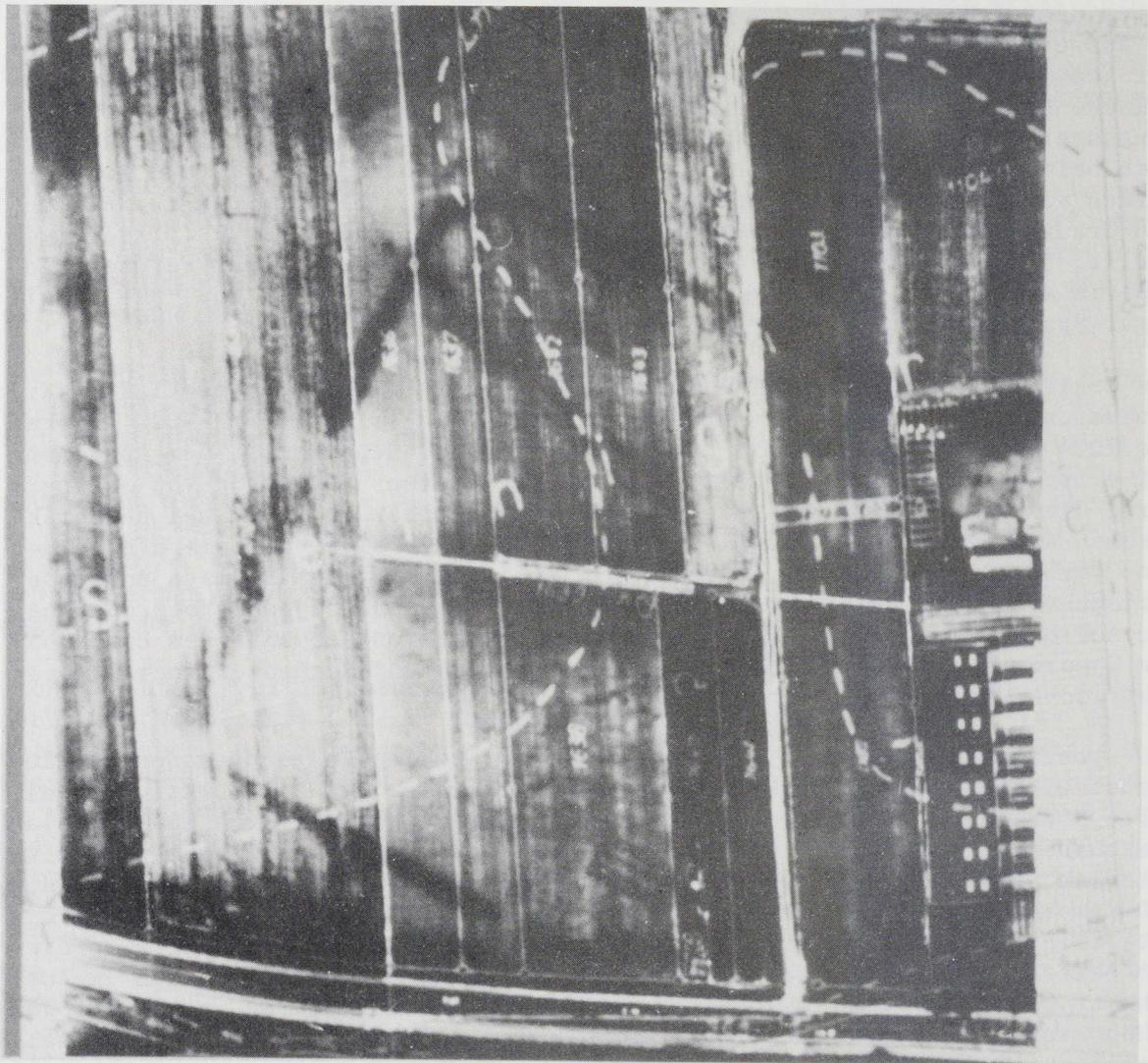


Abb. 2 Kastell Eislingen-Salach.
In sechs Teilen entzerrtes Digitalbild der gesamten Anlage mit Überlagerung der Flurkarte. Foto vom hochauflösenden Bildschirm mit 1024 x 1024 Bildpunkten. Kontrastverstärkung und Angleichung der mittleren Helligkeiten der verschiedenen Getreidefelder mit den Bewuchsmerkmalen. Luftaufnahme von O. Braasch vom Juni 1989. Archiv Nr. 7324/002; SW.

sondern erfolgt manuell durch eine Zeichnung in einer graphischen Ebene über dem Bild. Zur Definition dieser graphischen Ebene über dem digitalen Bild wird beispielsweise der Grauwert 255 (= weiß) als Overlay reserviert. Das digitale Bild wird dadurch in seiner Qualität nicht beeinträchtigt. Bei der interaktiven Zeichnung mit Hilfe eines Fadenkreuzes (cursor) in der gewählten Farbe speichert der Computer die Koordinaten jedes Punktes und alle Stützpunkte eines Polynoms als sogenanntes Vektor-Protokoll. Die Koordinaten dieser Zeichnung und der Paßpunkte werden anschließend über eine Leitung an den Graphik-Computer übertragen. Eine affine Transformation bringt die Paßpunkt-Koordinaten mit den Gauß-Krüger-Koordinaten dieser Punkte im digitalisierten Kartenausschnitt zur Deckung. Bei Anwendung dieser Transformationsparameter wird nun die ganze Zeichnung in den vergrößerten Kartenausschnitt eingepaßt. Die Verarbeitungsfehler dieser Transformation vom Bild- zum Graphik-Computer liegen meist unter 5 cm. Abschließend wird die Interpretationszeichnung durch Glättung der Polynome und Markierung der archäologischen Objekte mit unterschiedlicher Schraffur und Farbe graphisch aufbereitet.

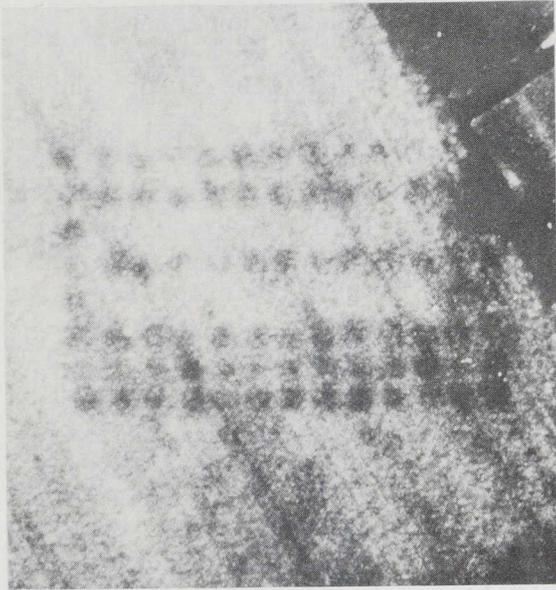


Abb. 3
Kastell Eisingen-Salach.
Digitalbild des etwa 100-fach vergrößerten Ausschnittes mit den massiven Fundamenten des Speichers.

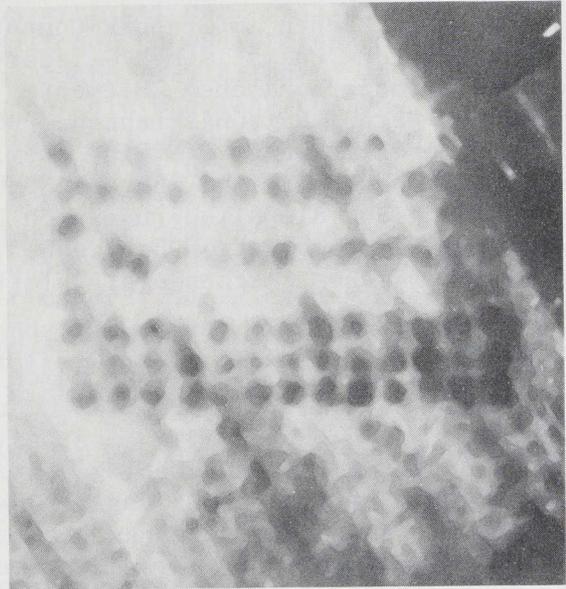


Abb. 4
Digitale Verarbeitung des gleichen Bildes mit extremen Tiefpaßfilter und Subtraktion durch einen Gradientenfilter. Die Spuren der Pfosten in den Gruben werden sichtbar.

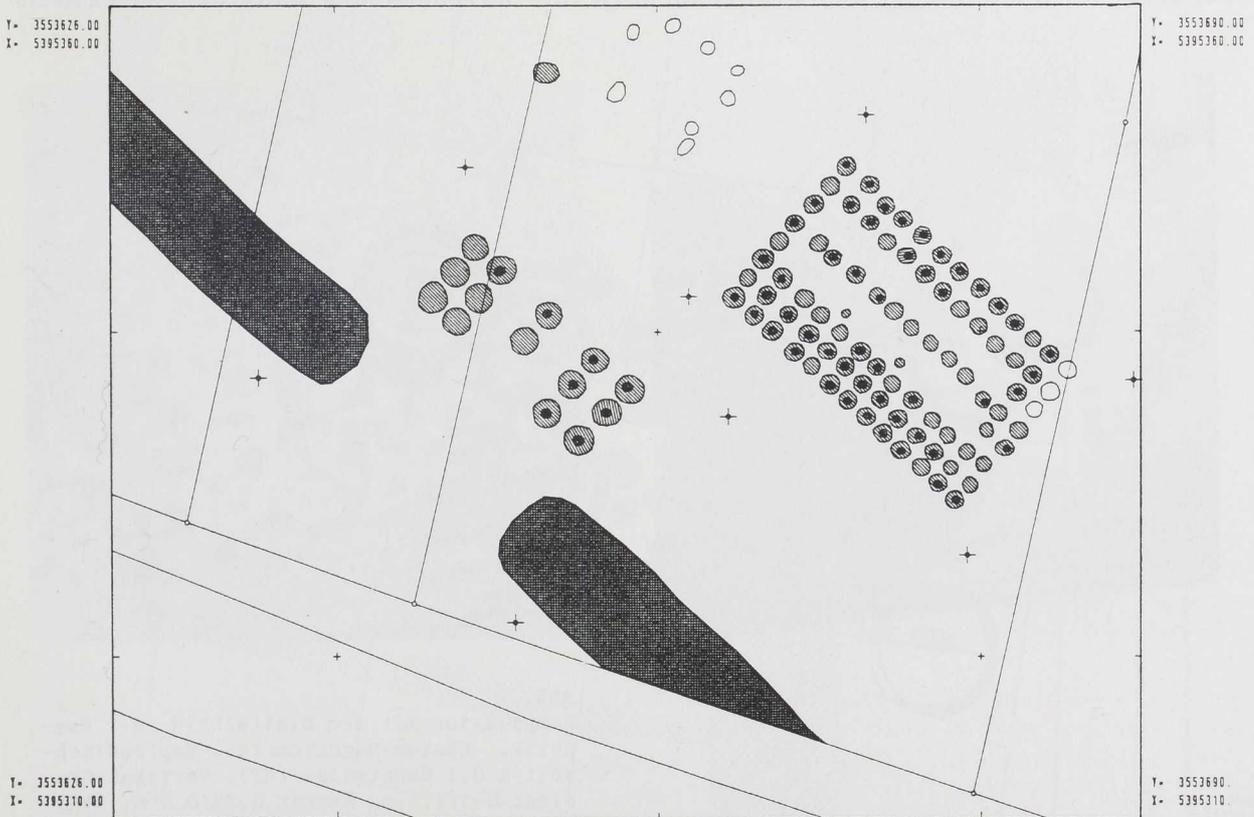


Abb. 5 Kastell Eisingen-Salach.
Ausschnitt aus dem digital erstellten Plan mit Südtor, Speicherbau, weiteren Gruben und Lineamenten der Innenbebauung. Plan Nr. 7324/002.

Verschiedene Ebenen im Graphik-Computer eröffnen nahezu unbegrenzte Möglichkeiten der thematischen Gliederung der Zeichnung. So werden beispielsweise die topographischen Elemente der Karte, Grenzsteine, Flurgrenzen, Straßen, Wege, Nutzungsgrenzen, Böschungen, Höhenlinien, Schraffuren der Häuser, Beschriftungen etc. in jeweils eigenen Ebenen geführt. Insbesondere für die Archäologie sind mehrere Ebenen reserviert, die eine differenzierte Darstellung und die Gliederung nach Perioden ermöglichen. Der fertige Plan kann für jede Kombination der Ebenen, in jedem Maßstab und jeder Farbe über ein automatisches Zeichengerät (plotter) ausgegeben werden.

Diese "Werkbank" zur Erstellung archäologischer Pläne aus Luftbildern und geophysikalischer Prospektion durch eine Kopplung des digitalen Bildverarbeitungssystems mit dem Graphik-Computer sollte mit zwei Personen besetzt sein, die sich gegenseitig zuarbeiten. Am Bildcomputer sollte selbstverständlich der Luftbildarchäologe sitzen, während die Interpretation des abstrakteren magnetischen Bildes den Geophysiker verlangt. Der Graphik-Computer ist mit einem Kartographen besetzt, der das gesamte Spektrum der graphisch-kartographischen Arbeiten von der manuellen Digitalisierung der Flurkarte als Plangrundlage, die Transformation der vektorisierten Interpretationszeichnungen, die graphische Bearbeitung der Pläne bis hin zur reinen Kartographie thematischer Karten beherrscht.

Zwei Beispiele mögen den vorangegangenen Trockenschwimmkurs etwas vernügnlicher gestalten: Die Luftaufnahme des römischen Kastells von Eislingen-Salach in Baden-Württemberg von O. Braasch vom Juni 1989 ist eine aufregende Transformation eines archäologischen Befundes in die Bewuchsmerkmale des Getreides. Die Zeichnung im Bewuchs ist hier so klar, daß sich sogar die Spuren der Pfosten in den Pfostengruben der Holzbebauung abbilden; deutlich



Abb. 6
Gräberfeld Pforzen.
Ausschnitt aus dem digital entzerrten Bild mit den Bewuchsmerkmalen im Klee. Luftbild von K. Leidorf vom 28.07.1990. Archiv Nr. 8128/072; SW5843-15.

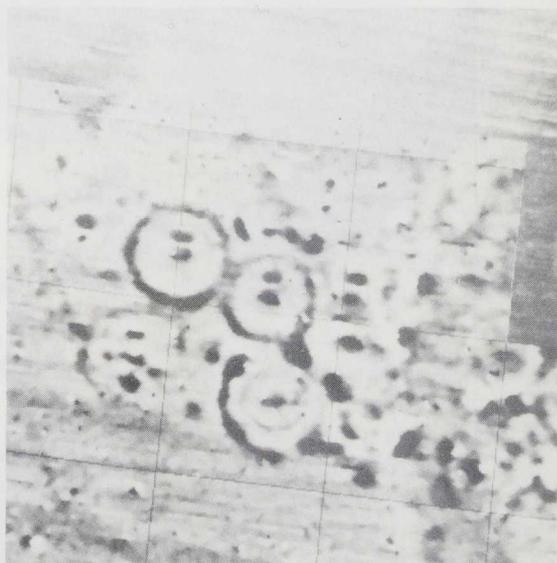


Abb. 7
Kompilation mit dem Digitalbild der Magnetik. Cäsium-Magnetometer, Empfindlichkeit ± 0.1 Nanotesla (nT), Vertikal-Gradient $0.3/1.8$ m, Raster $0.25/0.5$ m, Dynamik $-2.0/+5.0$ nT in 256 Graustufen, Median-Filterung 9×9 pixel und Subtraktion eines Gradientenfilters; 20m-Gitter, Mag. Nr. 8128/072. Typische Dipolanomalien von Eisenwaffen in der Längsachse der Zentralbestattungen.

sichtbar wird dieses Phänomen allerdings erst bei der digitalen Bildverarbeitung. Um der Topographie mit ziemlichen Höhendifferenzen Rechnung zu tragen, wurde die Übersichtsaufnahme in sechs Teilbildern auf die Karte übertragen. Die Fehler lassen sich durch die Überlagerung des entzerrten Digitalbildes mit der Karte abschätzen (Abb. 2). Man sieht dabei auch, daß das Kartenbild mit der tatsächlichen Flureinteilung nur in Ausnahmefällen übereinstimmt – ein Riesenproblem bei der Festlegung der Paßpunkte. Die einzelnen Partien der Innenbebauung wurden mit dem oben beschriebene Trick im extrem vergrößerten Ausschnitt digitalisiert und in den Plan eingepaßt. Der auffallende Pfostenbau rechts an der Lagerstraße gleich hinter dem Süd-tor soll hier stellvertretend für die anderen Bauten stehen: Die Vergrößerung mit dem Makro-Objektiv der CCD-Kamera läßt bereits die Textur einzelner Getreidebüschel erkennen (Abb. 3). Eine extreme Tiefpaßfilterung löscht diese Textur aus; nach der Subtraktion eines Gradientenfilters vom tiefpaßgefilterten Bild sieht man in einem Großteil der Gruben die Pfosten stehen (Abb. 4).

Auch beim zweiten Beispiel handelt es sich um Bewuchsmerkmale – diesmal im Klee und in einer Gegend, die wegen der hohen Niederschläge im Alpenvorraum ein derart phantastisches Bild gar nicht zeigen dürfte. K. Leidorf gelang die Luftbildentdeckung dieses frühmittelalterlichen Adelsfriedhofs bei Pforzen/Allgäu im trockenen Frühsommer 1990. Die Verarbeitung ist Routine – erst eine Übersichtsaufnahme mit den Paßpunkten zur Entzerrung, dann wieder die extreme Vergrößerung im Ausschnitt und die Spreizung der Kontraste

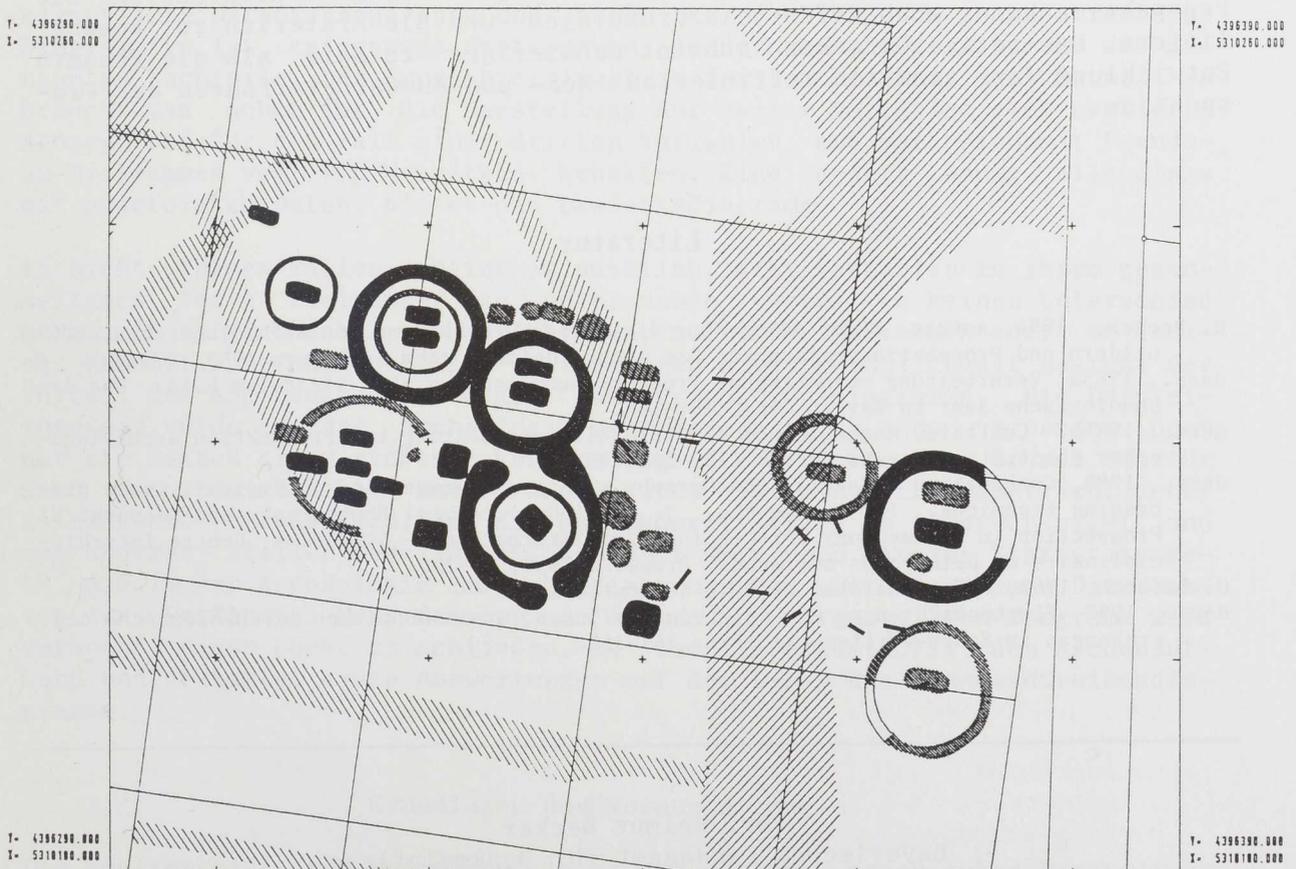


Abb. 8 Gräberfeld Pforzen. Ausschnitt aus dem auf der Basis von Luftbild und Magnetik digital erstellten Plan des Gräberfeldes.

(Abb. 6). Trotz dieses sagenhaften Befundes bleiben im Luftbild Fragen offen: Beispielsweise verdeckt der verlandete Bachlauf im östlichen Bereich des Gräberfeldes durch den höheren Wassergehalt alle archäologischen Strukturen. Die magnetische Prospektion, die im Kernbereich mit einem Meßpunkt-
abstand von 25 cm durchgeführt wurde, ist vom Wassergehalt des Bodens unberührt (Abb. 7). Der Plan basiert auf der kombinierten Interpretation von Luftbild und Magnetik, die sich hier wieder einmal hervorragend ergänzen: Das Magnetogramm zeigt sogar die Waffengräber. Beim Schmieden einer Eisenwaffe wird eine remanente Magnetisierung in der Längsachse aufgeprägt; eine Spartha oder ein Sax ist dadurch zu einem Magnet mit einem Nord- und einem Südpol geworden. Die magnetischen Dipolanomalien der Waffen sind nur bei den zentralen Bestattungen zu beobachten. Die Anlage mit den breiten Grabensegmenten und Öffnungen nach Norden und Süden, einer Innenpalisade und der übergroßen zentralen Grabgrube scheint eine besondere Bedeutung zu haben; sie ist von vier sehr großen Gruben umgeben, die als Pferdegräber interpretiert werden können. Mehrere Überschneidungen und die verschiedenen Grabtypen machen eine zeitliche Abfolge des Friedhofs deutlich.

Pläne dieser Art sollten für die archäologische Denkmalpflege wichtig sein. Zur Beurteilung der Bedeutung eines archäologischen Denkmals ist keine Ausgrabung nötig. Sogenannte "Sicherungsgrabungen" archäologischer Denkmäler gehören als "Zerstörungsgrabungen" gebrandmarkt. Die immensen finanziellen Mittel der größtenteils unveröffentlichten Notgrabungen sollten dringend den wesentlichen Aufgaben vorbehalten bleiben. Neben zerstörungsfreier Prospektion, Inventarisierung und Schutzmaßnahmen archäologischer Denkmäler als Hauptaufgaben der Denkmalpflege sollten sich Ausgrabungen auf wenige Forschungsgrabungen mit wissenschaftlicher Fragestellung konzentrieren. Die Prospektion kann auch dafür die Grundlagen und die Kriterien zur Auswahl liefern. Das nötige Umdenken scheint schwieriger zu sein als die gesamte Entwicklung der ziemlich raffinierten Meß- und Auswerteverfahren der Prospektion.

Literatur

- H. Becker, 1984, Aufbau einer Anlage zur digitalen Verarbeitung von archäologischen Luftbildern und Prospektionsmessungen. Das archäologische Jahr in Bayern 1983, 201-203.
ders., 1985a, Verarbeitung magnetischer Prospektionsmessungen als digitales Bild. Das archäologische Jahr in Bayern 1984, 184-186.
ders., 1985b, Luftbild, Magnetik und digitale Bildverarbeitung zur Prospektion archäologischer Fundstätten. Arch. Inf. 8 (2), 135-142.
ders., 1990, Combination of aerial photography with ground-magnetics in digital image processing technique. In: C. Leva u. J. Hus (eds.), Aerial Photography and Geophysical Prospection in Archaeology. Proceedings 2nd International Symposium, Centre Interdisciplinaire de Recherches Aeriennes, Brussels 1990, 25-35.
O. Braasch, 1983, Luftbildarchäologie in Süddeutschland.
ders., 1990, Flugbeobachtungen am Lager von Eislingen, Kreis Göppingen. Archäologische Ausgrabungen in Baden-Württemberg 1989, 361-369.

Dr. Helmut Becker
Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege
Abteilung Bodendenkmalpflege
Referat "Archäologische Prospektion und Luftbildarchäologie"
Hofgraben 4
8000 München 22
