

DIFFERENTIALENTZERRUNG VON NICHT-MESSBILDERN  
IN DER LUFTBILDARCHÄOLOGIE

(ORTHOPHOTOGRAPHY OF NON-METRIC IMAGERY  
IN AERIAL ARCHAEOLOGY)

J. Peipe  
Universität der Bundeswehr München

ABSTRACT

In Archaeology aerial photographs are used for the detection and documentation of the signatures of subterranean destroyed monuments. The results of a project to produce orthophotographs from oblique non-metric images of hilly terrain are presented. A Digital Terrain Model of the site is derived from conventional aerial photographs. A combination of these and some non-metric images is processed in a bundle adjustment in order to determine interior and exterior orientation required for the production of orthophotographs.

EINLEITUNG

Die Luftbildarchäologie als Verfahren zur Prospektion und Dokumentation von Bodendenkmälern hat sich seit einiger Zeit auch in Deutschland etablieren können. Bereits in den zwanziger Jahren dieses Jahrhunderts wurde vor allem in England ihre Methodik entwickelt und zur Erkennung und Interpretation der Spuren vor- und frühgeschichtlicher Siedlungen und Felder systematisch angewendet (Crawford 1924). In Deutschland machte im Jahre 1938 ein Band der Reihe "Luftbild und Luftbildmessung" der Firma Hansa Luftbild GmbH mit diesen und eigenen Arbeiten zum Thema bekannt. Doch erst lange nach dem Ende des Zweiten Weltkriegs wurden Institutionen geschaffen, z.B. am Rheinischen Landesmuseum in Bonn (Scollar 1983) und in jüngster Zeit an den Landesdenkmalämtern in Bayern und Baden-Württemberg (Braasch 1983), die sich nicht nur mit der Entdeckung von Fundstellen, sondern auch mit der metrischen Auswertung der Luftbilder für die Archäologie beschäftigen.

Die oberirdischen Reste eines Bauwerks - eines Hauses, einer Befestigung, einer Straße usw. - können aus der Luft meist besser erkannt und in ihrem gegenseitigen Zusammenhang gedeutet werden als vom Boden aus. Sie werden z.B. in schrägem Sonnenlicht als Schattenmerkmale sichtbar. Im Winter führen Schnee, Reif und Sonneneinstrahlung zu einer Modellierung des Geländes und verdeutlichen damit auch die vielfältigen Zeugnisse menschlicher Tätigkeit. Liegen Bauwerke unterhalb der heutigen Erdoberfläche, so werden vom erhöhten Standpunkt aus ihre Spuren auf bearbeiteten Feldern deutlich. Eingeebnete Gräben oder Gruben sowie Mauerreste zeigen sich als Boden-, Feuchte- oder Bewuchsmerkmale (Abb. 2). Detaillierte Angaben zur Entstehung und Interpretation dieser verschiedenen Merkmale sind der Literatur zu entnehmen (z.B. Martin 1968, Christlein und Braasch 1982, Braasch 1983).

Unterirdische Bodendenkmäler treten aber nur an wenigen Tagen des Jahres aus ihrer Umgebung hervor. Bei dieser Gelegenheit können sie vom Luftbildarchäologen erfaßt werden. Dies geschieht mit Kleinbild- oder Mittelformatkameras von niedrig fliegenden Flugzeugen aus. Soll metrische Information aus den meist stark geneigten Aufnahmen entnommen werden, so werden sie in der Regel mit vor Ort eingemessenen oder aus Karten entnommenen Paßpunkten und unter Annahme einer ebenen Topographie perspektiv entzerrt. Wenn Höhenunterschiede im Gelände vorhanden sind, führt dies bekanntlich zu erheblichen Lagefehlern in der Entzerrung. Methoden der differentiellen Umbildung sind dann angebracht. Im folgenden werden Hinweise zur Herstellung von Orthophotos aus Nicht-Meßbildern gegeben und der gewählte Verfahrensablauf an einem Beispiel aus der Luftbildarchäologie erläutert. Wesentliche Bestandteile des Verfahrens sind die Verwendung vorhandener Reihenmeßkammer-Aufnahmen und die Bündeltriangulation.

## AUSWERTEVERFAHREN

Von einem Bodendenkmal, dessen Lage bekannt ist, sind im allgemeinen mehrere Einzelbilder vorhanden, die das Objekt oder Teile davon aus unterschiedlichen Richtungen und Flughöhen zeigen. Bilder mit in etwa paralleler Aufnahmerichtung existieren nicht, so daß eine photogrammetrische Auswertung durch stereoskopische Betrachtung und Messung nicht in Frage kommt. Die numerische Bestimmung von Einzelpunkten ist kaum sinnvoll, da das Bodenmerkmal nur selten klar definierte Details aufweist.

Zur Auswertung von Einzelbildern werden Verfahren der Entzerrung angewendet. Dabei erweist sich die optische Umbildung der Nicht-Meßbilder am Entzerrungsgerät als problematisch, weil die vorhandenen Bereiche für Tischneigungen und Vergrößerung Mehrfachentzerrungen der Schrägaufnahmen erforderlich machen. Zudem verbleiben systematische Fehler (z.B. wegen der Verzeichnung des Objektivs) im Auswertergebnis. Die rechnerische Entzerrung ebenen Geländes mittels projektiver Transformation kann vorteilhaft sein, wenn nur wenige Punkte zu bestimmen sind. Linienweise Auswertungen erhält man in diesem Fall durch punktweises Abfahren der abgebildeten Strukturen z.B. in einem Monokomparator oder auf einem Digitalisieretablett und durch on-line Transformation im angeschlossenen Rechner (Burnside et al. 1983, Hell 1986a). Steht Höheninformation in Form eines Digitalen Geländemodells zur Verfügung, so können auch Einzelbilder nicht ebenen Geländes "räumlich" ausgemessen werden (Radwan und Makarovič 1980, Hell 1986b).

In der Luftbildarchäologie ist ein bildhaftes Ergebnis der photogrammetrischen Auswertung im allgemeinen einer Strichkartierung vorzuziehen, es sei denn, der Archäologe führt diese selbst aus. Ihm sollte in jedem Fall die Interpretation der oft nur schwer erkennbaren Strukturen überlassen bleiben. Zwei Verfahrensweisen sind daher für die Auswertung stark geneigter Nicht-Meßbilder besonders geeignet: die rechnerische Entzerrung in Verbindung mit der Digitalen Bildverarbeitung und die Herstellung von Orthophotos. DBV-Anlagen sind im Bereich der Luftbildarchäologie in Deutschland bei zwei Institutionen vorhanden (Scollar 1983, Becker 1984, Becker und Braasch 1984). Die Einführung von Höheninformationen bei der Bearbeitung von Aufnahmen bewegten Geländes ist dort zur Zeit noch nicht realisiert.

Die Vorzüge der digital gesteuerten Differentialumbildung sind bekannt: die innere Orientierung, vor allem die Verzeichnung der Aufnahmekammer, wird berücksichtigt, die Gerätebereiche für Vergrößerung und Aufnahmeneigung lassen die Bearbeitung extremer Schrägbilder zu, und es entsteht ein bildhaftes Auswertergebnis. Ebenes und bewegtes Gelände können in gleicher Weise entzerrt werden, wenn die Form der Geländeoberfläche bekannt ist (z.B. Vozikis 1984). Die Höheninformation kann z.B. aus Karten, vorhandenen Digitalen Geländemodellen oder durch Stereoauswertung abgeleitet werden; sie muß lediglich für das Bodendenkmal selbst und seine nächste Umgebung bereitgestellt werden. Die äußere Orientierung der Schrägaufnahmen kann man am Orthoprojektor aus Paßpunkten berechnen. Allerdings ist es nicht einfach, markante Punkte der Nicht-Meßbilder in einer Karte zu identifizieren, um ihre Koordinaten zu erhalten. Es wird daher vorgeschlagen, Reihenmeßkammer-Aufnahmen des Gebietes, in denen das Bodendenkmal selbst meist nicht zu erkennen ist, als "Datenbasis" zu verwenden. Aus diesen kann durch Stereoauswertung sowohl ein Digitales Geländemodell als auch die Paßpunktinformation bestimmt werden. Diese Aufnahmen überdecken eine größere Geländefläche als die Nicht-Meßbilder, so daß man eher kartensichere Punkte für ihre Orientierung findet, wenn nicht sogar signalisierte Paßpunkte vorhanden sind. Da - wie bereits erwähnt - im Regelfall mehrere Nicht-Meßbilder aus unterschiedlichen Aufnahmeentfernungen zur Verfügung stehen, bietet es sich an, eine Netzverdichtung im Rahmen einer Bündeltriangulation vorzunehmen, an der die RMK-Aufnahmen beteiligt sind. Lagerung und Maßstabsfestlegung des photogrammetrischen Gesamtmodells erfolgt mit Hilfe der im Stereomodell gemessenen Paßpunkte. Aus der Ausgleichung erhält man die äußere Orientierung der für die Differentialentzerrung vorgesehenen Nicht-Meßbilder zur direkten Übergabe an den Orthoprojektor. Eine simultane Kalibrierung bzw. Teilkalibrierung der Aufnahmekammer ist möglich, wenn in der Bündelausgleichung ausreichende Information enthalten ist (Wester-Ebbinghaus 1986).

## HERSTELLUNG VON ORTHOPHOTOS EINER FUNDSTELLE IN NIEDERBAYERN

Am südöstlichen Ende einer langgestreckten Erhebung in der Gemeinde Künzing-Unternberg wurden auf Luftbildern die Spuren eines Bodendenkmals entdeckt (Abb. 1 und 2). Es handelt sich dabei um ein Grabenrondell aus dem 4. Jahrtausend v.Chr. (Christlein und Braasch 1982, Steinbrecher 1985). Es existiert eine große Zahl von Luftaufnahmen im Kleinbildformat über einen Beobachtungszeitraum von etwa sieben Jahren. Neben großmaßstäblichen Photos, auf denen das Objekt deutlich sichtbar ist, sind Überblicksaufnahmen vorhanden, die die Umgebung der Fundstelle zeigen, das Objekt selbst

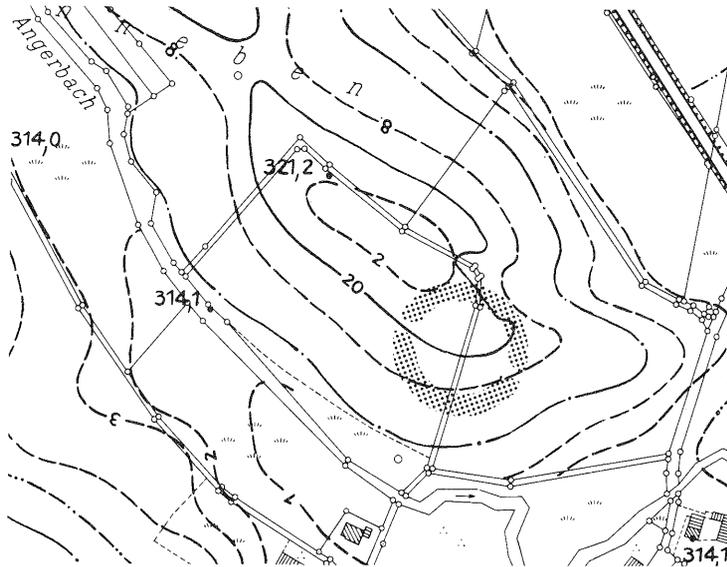


Abb. 1 Ausschnitt aus der Höhenflurkarte 1 : 5000. Die Fundstelle Künzing-Unternberg ist durch eine kreisförmige Signatur gekennzeichnet.

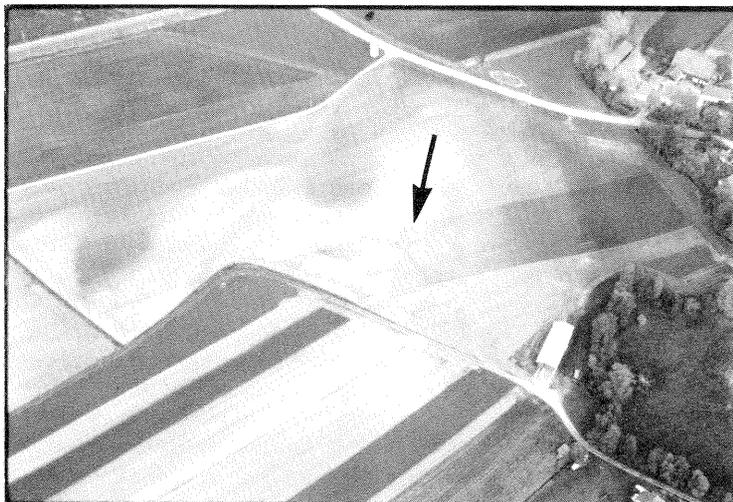


Abb. 2 Nicht-Meßbild der Fundstelle (Vergrößerung eines Farb-Diapositivs 24×36 mm<sup>2</sup>. Freigegeben durch die Regierung von Oberbayern, Nr. GS 300/38970-81)

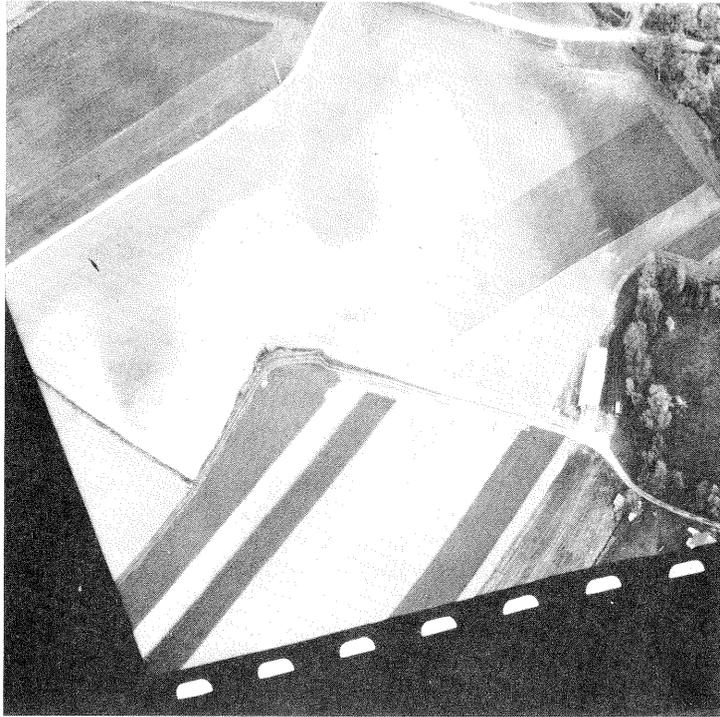


Abb. 3 Orthophoto des in Abb. 2 gezeigten Nicht-Meßbildes (Verkleinerung, Original-Maßstab 1 : 1000).

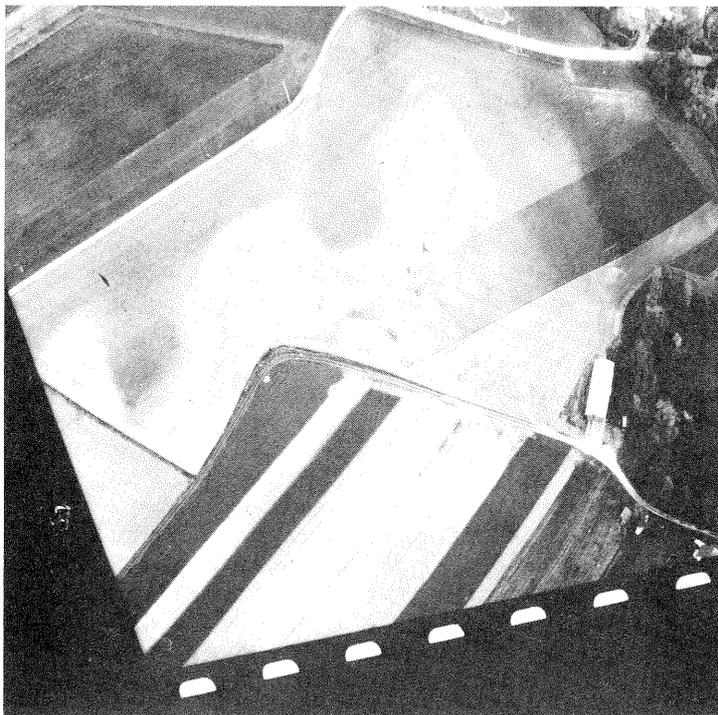


Abb. 4 Entzerrung des in Abb. 2 gezeigten Nicht-Meßbildes auf eine mittlere Ebene durch das Bodendenkmal (Verkleinerung, Original-Maßstab 1 : 1000).

aber kaum erkennen lassen. Alle Bilder wurden mit einer Leica R3 mit 90 mm-Objektiv Elmarit-R (bei konstanter Fokussierung auf Unendlich) hergestellt.

Außerdem stehen Reihenmeßkammer-Aufnahmen im Maßstab 1 : 10 000 aus dem Jahre 1960 zur Verfügung. Zwei davon wurden im analytischen Plotter Zeiß Planicomp C100 zu einem Stereomodell orientiert. Aus diesem ergab sich durch profilweise Höhenmessung ein Digitales Geländemodell zur Steuerung des Orthoprojektors. Zudem wurden die Landeskoordinaten von mehr als zwanzig Geländepunkten bestimmt, die auch in jeweils einigen der fünf ausgewählten Nicht-Meßbilder identifizierbar waren, und ihre Bildkoordinaten registriert. Anschließend wurden diese Punkte in den Nicht-Meßbildern monoskopisch ausgemessen und darüberhinaus weitere fünfzehn Punkte, die nur in den Nicht-Meßbildern enthalten sind. Die Bündeltriangulation wurde mit dem Rechenprogramm MOR (Wester-Ebbinghaus 1985) durchgeführt. Aus diesem stabilen Verband von RMK-Aufnahmen und Nicht-Meßbildern ließ sich im Rahmen der Bündelausgleichung die äußere Orientierung der drei für die Orthoprojektion vorgesehenen Bilder bestimmen. Die Objektpunkte konnten im Mittel mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.4$  m festgelegt werden.

Die innere Orientierung der Nicht-Meßkammer wurde im voraus mit Hilfe von Testfeld-Aufnahmen ermittelt. Bei der Simultankalibrierung in der Bündelausgleichung ergab sich für die Kammerkonstante ein veränderter Wert. Die übrigen Parameter (Hauptpunktlage und radial-symmetrische Verzeichnung) wurden im Rahmen ihrer Genauigkeit bestätigt.

Orthophotos im Maßstab 1 : 1000 wurden am Zeiß Orthocomp Z2 hergestellt. Abb. 3 zeigt eines davon, auf dem der östliche Teil des Bodendenkmals zu sehen ist. Abbildungsfehler im oberen Teil des Orthophotos erklären sich daraus, daß das Digitale Geländemodell aus Reihenmeßkammer-Aufnahmen des Jahres 1980 abgeleitet wurde, die Nicht-Meßbilder aber das an dieser Stelle durch eine Flurbereinigung veränderte Gelände erfaßten. Die Verhältnisse in der direkten Umgebung des Objekts blieben jedoch erhalten.

Der Orthoprojektor wurde auch zur Herstellung einer Entzerrung derselben um ca. 50 % geneigten Aufnahme (Abb. 2) auf eine mittlere Ebene durch das Objekt benutzt. In Abb. 4 sind die durch Höhenunterschiede hervorgerufenen Lageversetzungen im Vergleich zu Abb. 3 vor allem am Bildrand deutlich zu erkennen.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Die Luftbildarchäologie bietet sich zur Bestandsaufnahme der vorhandenen Bodendenkmäler an. Vom Flugzeug aus können sie als Boden- oder Bewuchsmerkmale erkannt und photographisch dokumentiert werden. Wenn sie vermessen und in Karten eingetragen werden, ist es möglich, sie zu schützen oder zumindest bei Planungen zu berücksichtigen.

Die Herstellung von Orthophotos aus Nicht-Meßbildern ergänzt die üblicherweise angewendeten Methoden der Entzerrung, vor allem wenn Höhenunterschiede im Gelände vorhanden sind. Die hier vorgeschlagene Verfahrensweise ist dadurch gekennzeichnet, daß Reihenmeßkammer-Aufnahmen als "Datenbasis" verwendet werden, einerseits zur Gewinnung eines Digitalen Geländemodells und andererseits zur Bestimmung von Verknüpfungspunkten für eine Reihe von Nicht-Meßbildern des Bodendenkmals. Durch Zusammenfassung aller Aufnahmen in einer Bündeltriangulation gelingt es, die äußere Orientierung der für die Orthoprojektion vorgesehenen Bilder bestmöglich zu ermitteln. Die Kalibrierung der Nicht-Meßkammer kann simultan erfolgen, wenn der Bildverband ausreichende Information aufweist. Orthophotos als bildhafte Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertung ermöglichen dem Archäologen, die Struktur eines Bodendenkmals zu interpretieren und seine Lage, Größe und Form festzulegen.

## DANK

Für die Bereitstellung des Bildmaterials und vielfältige Unterstützung sei an dieser Stelle dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege, insbesondere den Herren O. Braasch und Dr. H. Becker, dem Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen und dem Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn herzlich gedankt.

## LITERATUR

- Becker, H., 1984: Aufbau einer Anlage zur digitalen Verarbeitung von archäologischen Luftbildern und Prospektionsmessungen. In: Das archäologische Jahr in Bayern 1983. Konrad Theiss Verlag, Stuttgart, 201-203.
- Becker, H., Braasch, O., 1984: Plan einer Siedlung aus der Jungsteinzeit bei Harting. In: Das archäologische Jahr in Bayern 1983. Konrad Theiss Verlag, Stuttgart, 27-30.
- Braasch, O., 1983: Luftbildarchäologie in Süddeutschland. Kleine Schriften zur Kenntnis der römischen Besetzungsgeschichte Südwestdeutschlands Nr. 30, Limesmuseum Aalen.
- Burnside, C.D., Walker, A.S., Hampton, J.N., Soffe, G., 1983: A Digital Single Photograph Technique for Archaeological Mapping and its Application to Map Revision. Phot. Record 11(61), 59-68.
- Christlein, R., Braasch, O., 1982: Das unterirdische Bayern. Konrad Theiss Verlag, Stuttgart.
- Crawford, O.G.S., 1924: Air Survey and Archaeology. Ordnance Survey Prof. Papers, Nr. 7, London.
- Hansa Luftbild G.m.b.H., 1938: Luftbild und Vorgeschichte. Luftbild und Luftbildmessung, Heft Nr. 16, Berlin.
- Hell, G., 1986a: Rechnerische Entzerrung. Karlsruher Geowissenschaftliche Schriften, Heft A/B 2, Karlsruhe (im Druck).
- Hell, G., 1986b: Strenge Einzelbildauswertung am Analytischen Auswertegerät PLANI-COMP C 100. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (im Druck).
- Martin, A.-M., 1968: Luftbild-Archäologie in der modernen Forschung. Bildmessung und Luftbildwesen 36, 178-183.
- Radwan, M.M., Makarovič, B., 1980: Digital mono-plotting system - improvements and tests. ITC Journal, Heft 3, 511-534.
- Scollar, I., 1983: Luftbild-Kartierung für die Archäologie. Spektrum der Wissenschaft, Heft Juli 1983, 44-55.
- Steinbrecher, I., 1985: Ein Beispiel zur photogrammetrischen Auswertung in der Luftbildarchäologie. Diplomarbeit Universität der Bundeswehr München (unveröffentlicht).
- Vozikis, E., 1984: Numerische Photogrammetrie und Archäologie. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie 72, 54-65.
- Wester-Ebbinghaus, W., 1985: Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen. Zeitschrift für Vermessungswesen 110, 101-111.
- Wester-Ebbinghaus, W., 1986: Analytische Kammerkalibrierung. ISPRS-Symposium, Kommission V, Ottawa.