

---

# Methoden

---

G. Kupfer

## **Nahbereichsphotogrammetrie und ihre Anwendungsmöglichkeiten für die Archäologie**

### **Einleitung**

Im Jahre 1674 nahm der Maler Jacques Carrey den Westgiebel des Parthenons ausführlich zeichnerisch auf. Leider ist eine maßstäbliche Rekonstruktion nach dieser Vorlage nicht möglich. Es gibt viele Kulturdenkmäler, die heute photogrammetrisch aufgenommen werden könnten, um sie so in einem ausmeßbaren Dokument wenigstens vor einem möglichen Totalverlust zu bewahren, was bei der Explosion des Parthenons und dem nachfolgenden Substanzverlust noch nicht möglich war.

Knapp zwei Jahrzehnte nach Erfindung der Photographie setzte A. Meydenbauer 1858 als erster die photographische Aufnahme zur Bauaufnahme ein und begründete so (neben A. Laussedat) die Photogrammetrie.

### **Vor- und Nachteile der Photogrammetrie**

Unter besonderer Berücksichtigung der Aufgaben in der Archäologie sollen wesentliche Vor- und Nachteile photogrammetrischer Arbeitsweise zusammengestellt werden. Grundsatz dabei soll sein, daß die Photogrammetrie nicht andere Verfahren verdrängen soll, wo letztere günstiger einzusetzen sind.

Insbesondere ist eine Kombination mit anderen geodätischen Verfahren häufig sinnvoll.

Letztlich dürfte die Wirtschaftlichkeit oder die Durchführbarkeit bei einer konkreten Aufgabe darüber entscheiden, welches Verfahren man einsetzt. Dabei muß natürlich auch definiert werden, was als wirtschaftlich zu gelten hat.

Vorteile der Photogrammetrie:

- Vollständige Dokumentation des photographisch Erfassbaren in kurzer Zeit
- Berührungs- und zerstörungsfreie Arbeit
- Auswertung unabhängig von der Aufnahme unter verschiedenen Gesichtspunkten, auch mit späteren Ergänzungen aus den gleichen Bildern
- Auswahl des Auszuwertenden unter günstigen Arbeitsbedingungen im Büro
- Geringere Feldarbeit als bei anderen geodätischen Verfahren

Nachteile der Photogrammetrie:

- Meßergebnisse liegen nicht sofort vor
- Hohe Investitionskosten für Aufnahme- und Auswertegeräte

Die Auswertung schließt jeweils die Interpretation und Auswahl des Auszumessenden ein. Falls dies nicht in Personalunion er-

folgt, ist eine genaue Absprache zwischen Archäologen und Photogrammeter erforderlich, ggf. unter Verwendung von Vergrößerungen ausgewählter Bilder mit Eintrag des Auszuwertenden.

### Photogrammetrische Arbeitsverfahren allgemein

Unabhängig von den jeweiligen Einsatzbedingungen gibt es in der Photogrammetrie grundsätzlich verschiedene Endprodukte. Sie können photographisch, graphisch oder numerischer Art sein. Photographisch erhält man Kontaktkopien, Vergrößerungen, Entzerrungen und Orthophotos bzw. Differentialentzerrungen. Jedes Produkt kann mit kartographischen oder anderen Notaten ergänzt, und mehrere Stücke können montiert verwendet werden, ggf. mit standardisiertem Rahmen. Damit können grundsätzlich verschiedene Aufnahmekonfigurationen Anwendung finden.

Für Entzerrungsaufgaben genügen ggf. Einzelbilder. Dreidimensionale Erhebungen müssen entweder nach dem photogrammetrischen Meßtischverfahren oder mittels Parallaxenphotogrammetrie erfolgen. Ersteres ist anwendbar, wenn es nur um die Erfassung eines Punkthaufens geht, wobei die Punkte in zwei Bildern eindeutig identifizierbar sein müssen (Abb. 1). Die Parallaxen- oder Stereophotogrammetrie bedient sich dagegen der Fähigkeit des Menschen, zwei fast parallel von verschiedenen Standorten aufgenommene Bilder je einem Auge zugeordnet stereoskopisch (räumlich) sehen zu können (Abb. 2). In solchen Modellen können nicht nur eindeutig identifizierbare Punkte eingemessen werden (und man braucht solche Punkte z.B. mit bekannten Koordinaten, um die Messung auf ein übergeordnetes Koordinatensystem beziehen zu können). Vielmehr kann man eine räumliche Meßmarke bei der Auswertung an Objektlinien entlangführen und diese Linien in Grund-, Aufriß oder Schnitt kontinuierlich zeichnen.

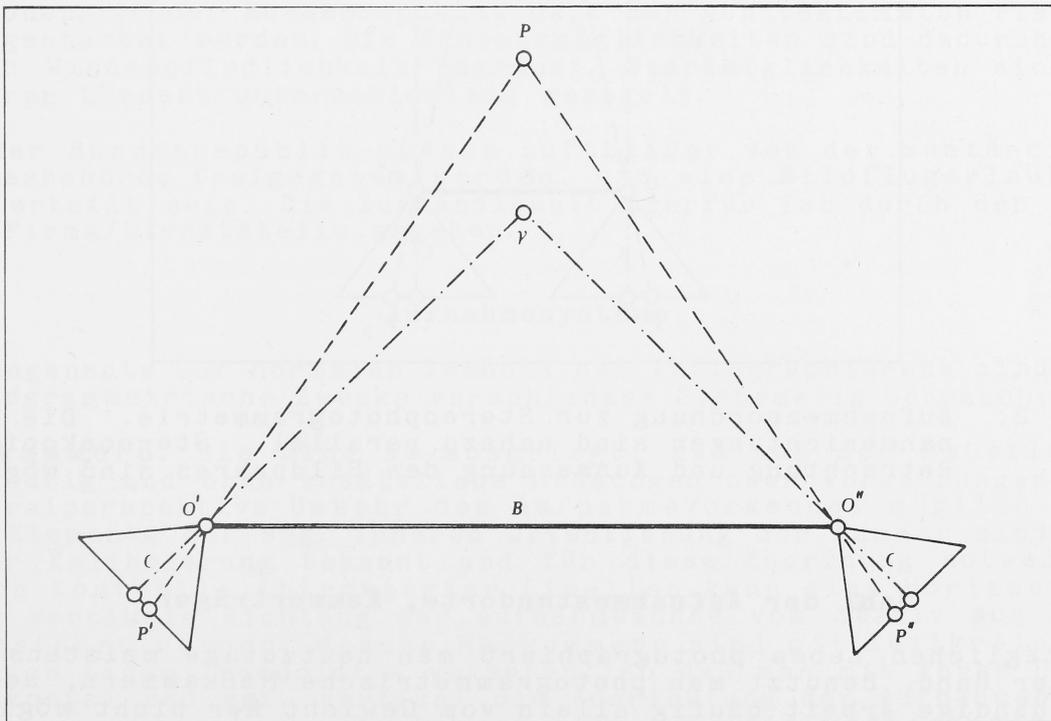


Abb. 1: Aufnahmeanordnung zur Meßtischphotogrammetrie (schematische Grundrißdarstellung). Die Aufnahmerichtungen schneiden sich unter dem Winkel . Stereoskopische Betrachtung des Bildpaares ist nur in Sonderfällen möglich.

Insbesondere lassen sich bei entsprechend eingepaßten Modellen Höhenlinienpläne oder - etwa bei Skulpturen - Schichtenpläne im Aufriß zeichnen.

Meßtisch- und Stereophotogrammetrie können kombiniert aus Verbänden von grundsätzlich beliebig vielen Bildern für jeweils zwei Bilder praktiziert werden. Solche Bildverbände sind aber heute hervorragend geeignet, größere Objektflächen mehr oder weniger rein photogrammetrisch zu erfassen und mit Hilfe der Bildtriangulation für diese Fläche ein Punktfeld im übergeordneten Koordinatensystem zu erstellen. Häufig wird man sich in der Archäologie auf die Festlegung des Maßstabes beschränken können, wozu mindestens eine Strecke nicht-photogrammetrisch und bildsichtbar bestimmt werden muß. Sollen darüber hinaus Höhenunterschiede im Objekt meßbar sein, so sind einige Punkte bildsichtbar zu nivellieren usw.

Mit den Koordinaten aus einer Bildtriangulation können sodann Modelle nach Meßtisch- oder Parallaxenverfahren auf das Objektsystem eingepaßt und detailliert ausgemessen werden.

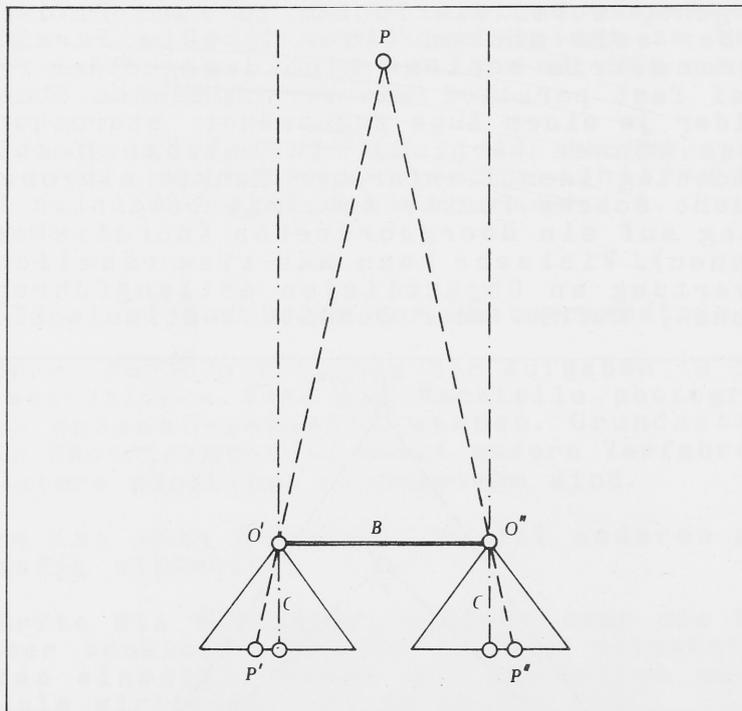


Abb. 2: Aufnahmeanordnung zur Stereophotogrammetrie. Die Aufnahmerichtungen sind nahezu parallel. Stereoskopische Betrachtung und Ausmessung des Bildpaares sind möglich

### Wahl der Aufnahmestandorte, Kammerträger

Im täglichen Leben photographiert man heutzutage meistens aus freier Hand. Benutzt man photogrammetrische Meßkamern, so ist freihändige Arbeit häufig allein vom Gewicht her nicht möglich. Zumindestens mit diesen Kamern muß erdgebunden vom Stativ aus gearbeitet werden.

Der Archäologe wird besonders bei Grabungen von überhöhtem Standort aus senkrecht nach unten photographieren wollen. Dies kann von Leitern (Feuerwehr!) bzw. Hubsteigern aus geschehen. Ggf. müssen dafür Kammer-Halterungen gebaut werden.

---

Für den Nahbereich, zu dem man empirisch Aufnahmeentfernungen bis etwa dreihundert Meter rechnet, kommen Aufnahmen aus normalen bemannten Flächenflugzeugen nicht in Frage. Es sind folgende unbemannte Kammerträger erprobt worden:

**Drachen.** Sie benötigen zum Einsatz bestimmte Windgeschwindigkeiten und sind ansonsten preiswert.

**Fesselballons.** Besonders Heißluftballons haben sich im Einsatz auch unter widrigen logistischen Verhältnissen bewährt. Zur Minderung der extremen Windempfindlichkeit ist der Ballon möglichst stromlinienförmig zu konstruieren.

**RC-Flächenflugzeug.** (RC = Remote Control - Fernlenkung). Eine Start- und Landestrecke von einigen Zehnermetern ist erforderlich. Zudem muß der "Pilot" geübt sein. Der Aufnahmeort und die gesamte Fluglinie (insbesondere ihre Höhe über Grund) müssen durch zusätzliche Navigationshilfen kontrolliert werden können. Hierzu eignet sich z.B. eine senkrecht nach oben gerichtete großformatige Kamera mit Mattscheibe und Koordinatengitter in der Bildebene, auf der ein "Navigator" das Flugzeug beobachtet und dem "Piloten" Fluganweisungen gibt.

**RC-Hubschrauber.** Es wird keine Landebahn benötigt. Das Gerät ist jedoch in der normalen Version nur von sehr Geübten zu fliegen. Es werden derzeit Versuche mit Kreiselstabilisierung zur Vereinfachung der Steuerung unternommen. Zudem soll eine eingebaute Fernsehkamera mit Fernübertragung zum Piloten eine genaue Navigation ermöglichen.

Der Aufwand und die potentiellen Nutzungsmöglichkeiten steigen in der Reihenfolge der Aufzählung. Neben unbemannten Kammerträgern können auch Ultra-Leichtflugzeuge für photogrammetrische Zwecke eingesetzt werden. Es gibt Bautypen für ein oder zwei Personen. In der Bundesrepublik darf nur von bestimmten Plätzen aus gestartet werden. Die Einsatzmöglichkeiten sind dadurch und durch Windempfindlichkeit begrenzt. Startmöglichkeiten sind in anderen Ländern unterschiedlich geregelt.

In der Bundesrepublik müssen Luftbilder von der zuständigen Landesbehörde freigegeben werden, und eine Bildflugerlaubnis muß erteilt sein. Die Zuständigkeit hierfür ist durch den Sitz der Firma/Dienststelle gegeben.

### Aufnahmesysteme

Im Gegensatz zur normalen Technik des Photographierens sind für photogrammetrische Zwecke verschiedene Systeme in Gebrauch:

**Meßkammern.** Sie sind so ausgelegt, daß aus den Meßbildern eindeutig und ohne zusätzliche Messungen oder Vorkehrungen die zentralperspektive Umkehr des Aufnahmevorganges möglich ist. Die Elemente der sog. inneren Orientierung der Kammer sind aus einer Kalibrierung bekannt und für diese Zuordnung notwendig. Durch Kontrolle integrierter Libellen kann eine horizontale oder vertikale Richtung der Aufnahmeachse vom Stativ aus herbeigeführt werden. Manche Meßkammern sind mit Teilkreisen - ähnlich einem Theodolit - versehen, so daß man mit ihrer Hilfe horizontal und ggf. vertikal die Ausrichtung der Aufnahmeachse genau vorgeben kann. So lassen sich z.B. die Bedingungen der Stereophotogrammetrie einhalten. Mit diesen Einrichtungen können aber auch Winkelmessungen, ähnlich wie mit einem Theodolit, durchgeführt werden.

**Stereomeßkammern** entstehen, wenn zwei Meßkammern unter weitgehender Einhaltung der Parallelität der Aufnahmeachsen und

---

einer vorgegebenen Basislänge fest oder beweglich zueinander montiert sind. Diese klassische Anordnung für archäologische Aufnahmen im Abstand bis höchstens etwa 50 Meter erfordert doppelten Kameraaufwand, vereinfacht aber andererseits die Aufnahme und ggf. die Auswertung.

Meßkammern werden heute noch weitgehend zur Verwendung von Glasplatten als Träger der photographischen Schicht ausgelegt. Bei Verwendung von Film ist dessen Planlage im Zeitpunkt der Aufnahme zu garantieren, wozu man ihn meistens über eine Ansaugvorrichtung gegen eine ebene Platte legt. Glasplatten sind schwer und zerbrechlich. Sie sind nicht überall erhältlich. Filme sind demgegenüber fast überall bis zur Formatbreite von 6 cm zu kaufen, sowohl schwarz-weiß als auch in Farbe.

**Teilmeßkammern.** WESTER-EBBINGHAUS hat normale Photoapparate mit einer Glasplatte vor der Bildebene versehen. Sie trägt ein quadratisches Gitter von Kreuzen mit genau bekannter Lage. Dieses "Reseau" wird auf die Filmoberfläche bei der Aufnahme mit aufbelichtet und gestattet es, bei der Auswertung sowohl Filmunebenheiten als auch mechanische Deformationen des Films zu berücksichtigen, wodurch teilweise die Anforderungen an eine Meßkammer erfüllt sind. Nicht erfüllt und deshalb zusätzlich zu ermitteln sind die übrigen Anforderungen an eine Zentralprojektion. Die innere Orientierung der Teilmeßkammer muß deshalb - zumindest bei jeder Änderung der Entfernungseinstellung am Objektiv - jeweils mit einem geeigneten Verfahren bestimmt werden. Handelt es sich bei der Teilmeßkammer um eine sog. Systemkamera, so können ggf. Objektive mit sehr unterschiedlicher Brennweite und entsprechend unterschiedlichen Bildwinkeln sehr flexible Aufnahmeanordnungen ermöglichen. Da im Gegensatz zu Meßkammern die verwendeten Objektive praktisch nicht verzeichnungsfrei sind, ist eine Auswertung der Bilder an klassischen Auswertegeräten derzeit noch nicht möglich. Versuche einer Umbildung zur Verzeichnungs- und Verzerrungsfreiheit solcher Bilder laufen am hiesigen Institut.

Als Teilmeßkammer ist bislang in weitestem Umfang die ROLLEI-FLEX SLX bzw. 6006 im Gebrauch. Flexibilität und leichte Handhabung bei der Aufnahme, Möglichkeit zum Einbau in nichtbezeichnete Träger und ggf. Verwendung eines Magazins für 70 mm-Film haben dem Gerät schon eine weite Verbreitung ermöglicht. Auch die ROLLEI 3003 ist bereits als Teilmeßkammer verwendet worden. HASSELBLAD hat demgegenüber aus den Standardkameras echte Meßkammern entwickelt.

**Photoapparate.** Bei diesen Apparaten sind die Elemente der inneren Orientierung nicht bekannt. Somit gelingt eine Rekonstruktion der Zentralprojektion nur unter besonderen Verhältnissen. Dies muß streng genommen für jedes Bild geschehen. Entweder sind hierzu bei der Aufnahme Vorkehrungen zu treffen, z.B. durch geodätische Bestimmung einer großen Zahl räumlich verteilter Paßpunkte, oder diese Informationen müssen nachträglich am Objekt gewonnen werden. Zudem ist die Verzeichnung der Objektive normaler Photoapparate für photogrammetrische Zwecke allgemein zu groß. Die Verzeichnung kann unabhängig von der Aufnahme bestimmt werden, falls die Aufnahmekamera zur Verfügung steht.

Mit den genannten Eigenschaften sind normale Photoapparate für photogrammetrische Zwecke demnach wenig geeignet. Ihr Einsatz zur reinen bildlichen Dokumentation ohne geometrische Strenge bleibt davon unberührt. Auch für Notaufnahmen sind sie häufig nicht zu ersetzen. So besteht etwa bei zerstörten Objekten eine Rekonstruktionsmöglichkeit häufig nur anhand von Papierbildern unbekannter Kameras. Manchmal existieren von diesen sogar nur aufgerasterte Drucke.

---

Grundsätzlich ist für einen Nichtphotogrammeter die klassische Aufnahme mit Stereomeßkammer am einfachsten. Dies trifft auch für die Auswertung zu. Eine Einarbeitung zur Nutzung von Teilmeßkammern ist notwendig, aber sicherlich auch gut möglich. Damit wird die Flexibilität photogrammetrischer Arbeit erheblich erweitert. Die Auswertung von Aufnahmen mit einer Teilmeßkammer kann sinnvoll nur mit Hilfe elektronischer Rechner durchgeführt werden, wie sie in modernen Auswertesystemen integriert sind.

Die Arbeit mit Bildern von einfachen Photoapparaten für photogrammetrische Zwecke sollte dem Fachmann überlassen bleiben, falls es sich nicht alleine um geringe Genauigkeitsanforderungen oder bildliche Dokumentationen handelt.

### Auswertung - Auswertegeräte

Bei der Übersicht über photogrammetrische Arbeitsverfahren wurde oben festgestellt, daß es unterschiedliche Endprodukte gibt, die mit verschiedenen Auswerteverfahren und -geräten gewonnen werden können. Die Kosten der Gerätesysteme, aber auch der Auswertung selbst, können dabei extrem unterschiedlich sein. Meydenbauer schuf ein rein graphisches Auswerteverfahren aus photogrammetrischen Meßtischaufnahmen mit sehr großen Bildformaten (bis 40 cm x 60 cm). Der Arbeitsaufwand bei Aufnahme und Auswertung ist damit immens und heute wirtschaftlich nicht tragbar.

Bei ebenen Objekten können graphisch Entzerrungen geneigter Aufnahmen konstruiert werden. Bei geringem Arbeitsumfang (wenige Aufnahmepunkte) ist dies vertretbar. Genauere und umfangreichere Arbeiten erfordern jedoch entsprechenden Geräteaufwand.

**Entzerrungsgeräte.** Sollen genügend ebene Objekte (Fassaden, Mosaike, Bas-Reliefs u.ä.) bildlich in einheitlichem Maßstab dargestellt werden, so können Neigungen der Kammerachse bei der Aufnahme gegenüber der Senkrechten an einem Entzerrungsgerät eliminiert werden. Außerdem lassen sich maßstäbliche Vergrößerungen herstellen.

**Orthoprojektoren.** Unebene Oberflächen können mit Orthoprojektoren oder Differentialentzerrungsgeräten aus der photographischen Zentralprojektion in eine Orthogonalprojektion umgebildet werden. Neben der Wahl einer sinnvollen Bezugsebene (z.B. Horizontalebene) ist die Kenntnis der Abweichungen der Objektoberfläche von dieser Bezugsebene (z.B. Höhenunterschiede im Objekt) in Profilen o.ä. Voraussetzung. Ggf. können Abwicklungen von Regelflächen (z.B. Tonnengewölben) ebenfalls mittels Orthoprojektoren erfolgen.

Beide Typen von Entzerrungsgeräten sind wegen der Kosten nur in größeren photogrammetrischen Betrieben zu finden.

**Komparatoren.** Mit ihnen lassen sich Bildkoordinaten mit z.T. höchster Genauigkeit bestimmen (bis zu 1 Mikrometer). Neben der Gerätegenauigkeit bestimmt auch die Identifizierbarkeit der einzustellenden Punkte die erreichbare Endgenauigkeit. Es ist hier und bei den folgenden Geräten zu beachten, daß das Bild selbst Bestandteil des Meßvorganges ist und mit seinen geometrischen Eigenschaften die Endgenauigkeit des Produktes mitbestimmt. Monokomparatoren dienen zur Messung einzelner Bilder. Damit nach Meßtisch- oder Stereoverfahren dreidimensionale Endergebnisse gerechnet werden können, müssen die auszumessenden Bildpunkte sehr genau dem jeweiligen Objektpunkt zugeordnet

---

werden können. Bei Verwendung eines Monokomparators kann dies einwandfrei durch signalisierte (gekennzeichnete) Objektpunkte geschehen. Natürliche Details müssen Eindeutigkeit garantieren (Ecken, Fugen usw.).

Stereokomparatoren ermöglichen die stereoskopische Betrachtung und Ausmessung entsprechend aufgenommener Bildpaare. Damit ist die Zuordnung der Bildpunkte aus zwei Bildern zu einem Punkt der Objektoberfläche auch ohne Signalisierung eindeutig möglich.

Die Ergebnisse aller Komparatormessungen müssen rechnerisch zu Objektkoordinaten usw. verarbeitet werden. Dies ist heute mit Mini- aber auch Mikrorechnern (Personal Computern) möglich. Dabei können - je nach Rechnerkapazität und verfügbaren Programmen - zwei oder mehr Bilder zur Ermittlung der Objektkoordinaten dienen. Objektausdehnung, Anzahl der Bilder sowie der angemessenen Objektpunkte können bei geeignetem Programmsystem sehr groß sein. Andererseits möchte man gerne neben photogrammetrischen Informationen (Messungen) auch andere objektrelevante Kenntnisse in die Berechnung einbeziehen, so etwa neben bekannten Objektkoordinaten auch die Bedingung, daß Punkte auf einer Geraden oder in einer Ebene usw. liegen. Auch Koordinaten des Kammerstandpunktes, Neigung der Kammerachse, Abstand zu Objektpunkten u.ä. sollen verwendbar sein. All dies erfordert ein sehr flexibles Programmsystem und vom im Felde Arbeitenden Kenntnis der Arbeitsmöglichkeiten. Nur so ist ein optimales Ergebnis und zügige sinnvolle Feldarbeit möglich.

**Stereoauswertegeräte, -systeme.** Heute gebräuchliche Stereoauswertegeräte basieren auf einem komparator-ähnlichen Aufbau mit einem optischen System zur stereoskopischen Betrachtung der Bilder. Koordinaten des Objekts werden bei älteren Konstruktionen z.B. über mechanische Analogdarstellungen des Strahlenganges in verkleinertem Maßstab gewonnen. Der Auswerter bewegt über Handräder und Fußscheibe den Modellpunkt dreidimensional, wobei gleichzeitig optisch eine räumlich erscheinende Meßmarke mit diesen Bewegungen im räumlich betrachteten Stereobildpaar bewegt wird. Die Meßmarke läßt sich damit stereoskopisch auf Objektpunkte einstellen oder - was kontinuierliche Messungen ermöglicht - entlang von räumlich verlaufenden Objektlinien führen. Bei gleichbleibender Höheneinstellung im Modellraum erhält man bei Führung der Meßmarke am Objekt Höhenlinien. Auch beliebige parallele Schnittlinien vom Objekt können so grundsätzlich erhalten werden, wenn man eine Schnittebene konstant hält.

Seit rund zehn Jahren sind sog. analytische Auswertegeräte (-systeme) in größerem Umfang im praktischen Einsatz. Sie werden vermutlich in einigen Jahren die klassischen Geräte mit analoger Darstellung verdrängt haben. Mit Hilfe integrierter Rechner oder Prozessoren werden hier Bildkoordinaten aus dem Komparator rechnerisch in Objektkoordinaten transformiert. Praktisch geschieht bei der Ausmessung diese Umrechnung aus Objektkoordinaten in die Koordinaten der beiden Bilder, wobei Stellmotoren die Bilder entsprechend dem Rechnerergebnis nachführen. Dies geschieht mit Kontrolle auf Richtigkeit meistens mit einer Frequenz von 50 Hertz, also 50 mal in der Sekunde. An klassische und moderne Geräte können Kartiertische oder Plotter zur graphischen Darstellung des Meßergebnisses angeschlossen werden. Es ist aber auch möglich, die Ergebnisse auf einem Bildschirm darzustellen und/oder die Koordinaten der angemessenen Punkte zu speichern. Letztere können dann - zeitlich unabhängig von der Auswertung - zur weiteren rechnerischen Aufbereitung oder kartographischen Darstellung verwendet werden.

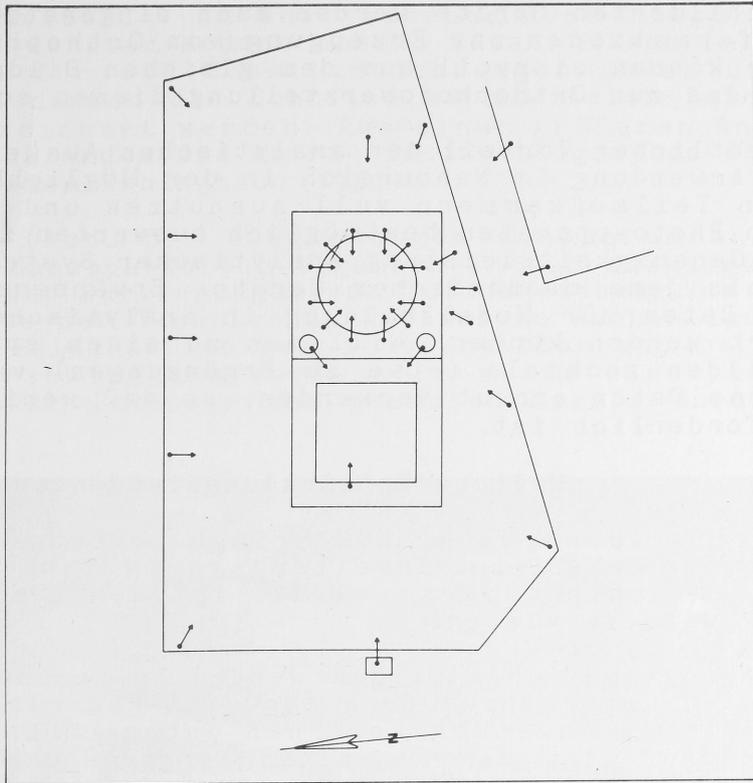


Abb. 3: Şehzade-Moschee in Istanbul. Skizze zur photogrammetrischen Aufnahmeanordnung. Pfeile kennzeichnen Aufnahmeort und -richtung.



Abb. 4: Meßbild zu Abb. 3. Aufnahme hier mit WILD P 32 auf Film. Die Kamera ist mit einem weitmaschigen Reseau zur Erfassung von Filmunebenheiten usw. versehen.

---

Die geschilderten Geräte werden auch eingesetzt, wenn man z.B. Höheninformationen zur Erzeugung von Orthophotos beschaffen muß. Sie können sinnvoll aus dem gleichen Bildmaterial erhoben werden, das zur Orthophotoherstellung dienen soll.

Ein wesentlicher Vorteil der analytischen Auswertesysteme liegt für die Anwendung im Nahbereich in der Möglichkeit, das Potential von Teilmeßkammern voll auszunutzen und auch Bilder von normalen Photoapparaten bestmöglich auswerten zu können. Weiter ist die Genauigkeitsleistung analytischer Systeme grundsätzlich besser als jene mechanischer Geräte. Erwähnenswert ist zudem, daß die Daten zur Modellbildung in analytischen Geräten abgespeichert werden können. Will man zu einem späteren Zeitpunkt diese Bilder nochmals (etwa zu Ergänzungen) verwenden, lassen sich diese Daten erneut verwenden, so daß wenig Vorbereitungszeit erforderlich ist.

### **Weitere Entwicklungstendenzen**

Analytische Auswertetechnik bringt gegenüber der klassischen Arbeitsweise erhebliche Erweiterungsmöglichkeiten im Einsatz der Nahbereichsphotogrammetrie. Auf den Abschnitt "Aufnahmesysteme" wird verwiesen.

Statt photographischer Bilder werden heute schon digitale Aufzeichnungen unter Verwendung sog. CCD-Kameras auf ihre photogrammetrische Anwendbarkeit hin untersucht. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, daß bei einer Vergrößerung der verwendeten Zahl von Sensoren in diesen Kameras viele Aufgaben der Photogrammetrie rein digital gelöst werden können. So besteht jetzt schon die Möglichkeit, solche Aufzeichnungen (die auch aus normalen Photographien abgeleitet werden können) rein rechnerisch zu entzerren und dann wieder in die bildliche Darstellung zurückzuverwandeln. Digitalisierte Bilder können miteinander korreliert werden, so daß dadurch ein digitales Objektmodell erzeugt werden kann. Schließlich ist es z.Z. zwar noch nicht möglich, aus digitalisierten Bildern alle gewünschten Details automatisch zu klassifizieren und somit das Darstellenswerte zu extrahieren. Automatische oder interaktive Objektklassifikation kann aber Bilddetails hervorheben, die das menschliche Auge nicht erfassen kann. Dies sind jedoch derzeit erst ansatzweise genutzte Hilfen.

Alle genannten digitalen Bildverarbeitungsschritte verlangen schnelle Rechner und erhebliche Speicherkapazitäten. Auch während der Aufnahme müssen die Bildspeicher schnell abfragbar sein, sofern man nicht Stehbilder zeugt.

### **Beispiele einschlägiger photogrammetrischer Arbeiten**

**Sehzade-Moschee.** (Abb. 3 u. 4) Dieses Beispiel entstammt nicht dem archäologischen Bereich. Es wurde gewählt, da es neuere Arbeitsmethoden deutlich machen. Das von Sinan in Istanbul errichtete Bauwerk sollte in seiner Struktur erfaßt werden. Insbesondere waren Schnittzeichnungen durch die Hauptkuppel zu erstellen. Es wurden weitgehend Freihand-Aufnahmen oder solche von einem leichten Stativ mit einer WILD P 32 (Meßkammer, Bildformat 6 x 9) und der ROLLEIFLEX SLX mit Reseau gemacht. Innen- und Außenraum wurden dabei über Signale an Fensterscheiben miteinander verknüpft. Paßinformationen waren einige Strecken außen und innen, einge nivellierte Punkte sowie im Innenraum der Hauptkuppel die Aufhängung der Leuchter als Lotrichtungen. Alle Informationen konnten gemeinsam in einer Berechnung berücksichtigt werden. Die ausgewählten Punkte wurden aus dem Bildverband mit einer Genauigkeit der Koordinaten bes-

ser als 2 cm ermittelt. Am analytischen Auswertegerät ZEISS Planicomp C1 00 konnten sodann anhand dieser Einpaßinformationen die Punkte für die Schnittzeichnungen außen und innen ausgemessen und danach die Schnitte am digitalen Zeichentisch des Gerätes gezeichnet werden. Aus einer größeren Anzahl von Modellen wurde außerdem ein Aufriß in der Längsachse der Anlage gezeichnet. (Wester-Ebbinghaus 1981).

**Mohenjo-Daro.** (Abb. 5) Ausgrabungen dieses umfangreichen Areals aus der Harappa-Kultur begannen in den zwanziger Jahren mit entsprechenden Kartierungen von Teilbereichen. Vom Institut für Baugeschichte der Technischen Hochschule Aachen laufen seit einigen Jahren Feldarbeiten zur Dokumentation von ca. 300 Gebäuden. Auf Vorschlag des Verfassers wurde eine umfassende photogrammetrische Inventur des gesamten Areals durchgeführt.

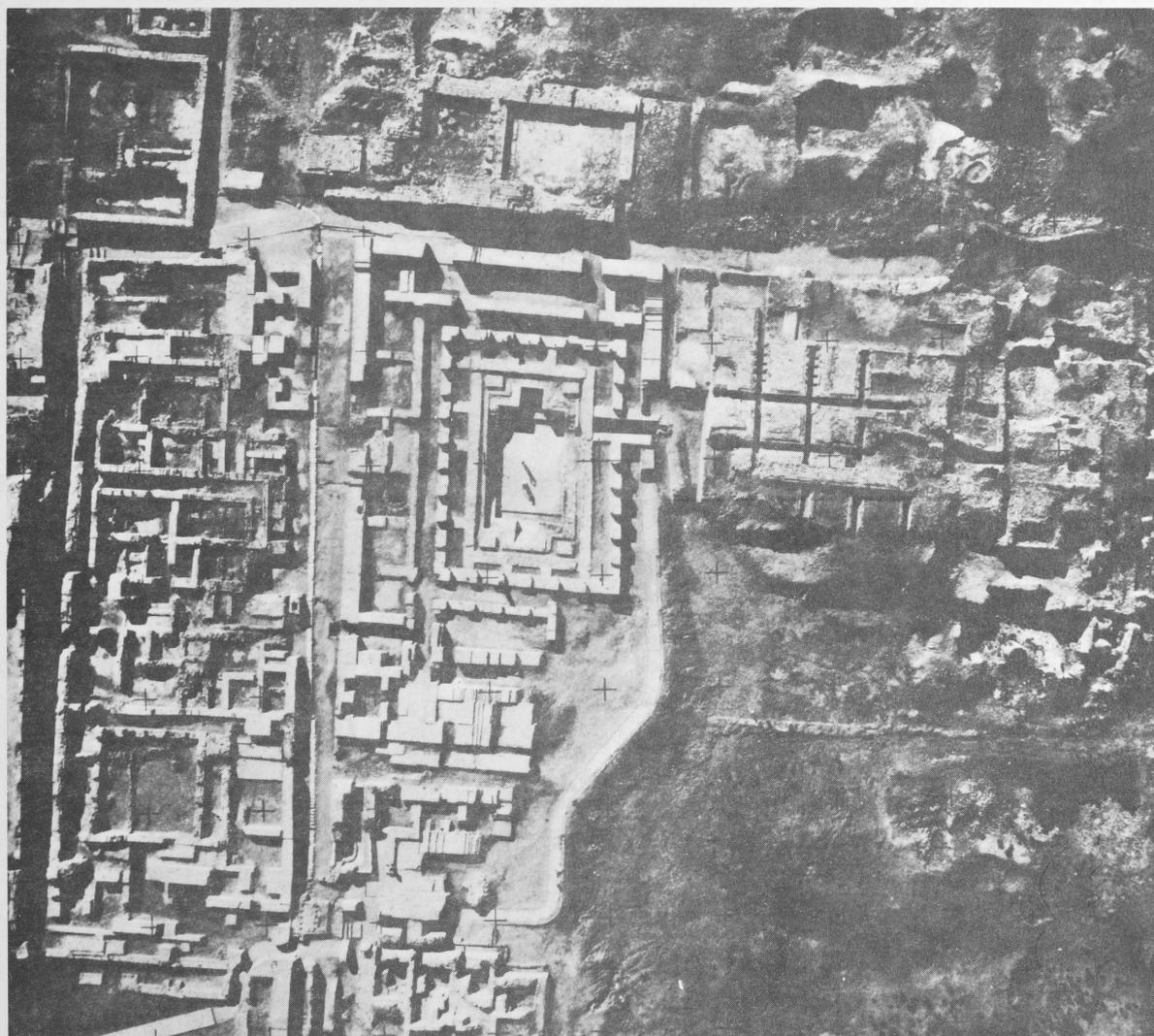


Abb. 5: Mohenjo-Daro (Pakistan). Aufnahme des sog. großen Bades mit ROLLEI SLX mit Reseau von einem Heißluftballon aus.

Mit Hilfe eines zeppelinförmigen Heißluftballons wurde für die Flächenaufnahme eine ROLLEIFLEX SLX mit Objektiven von 50 mm bzw. 120 mm Brennweite zur stereoskopischen Auswertung eingesetzt. Die Aufnahmen wurden auf jedem einzelnen Ballon-Standpunkt mehrfach wiederholt und die Rollfilme nach jedem Flugtag vor Ort entwickelt. So konnte eine direkte Erfolgskontrolle durchgeführt werden. An 50 Einsatztagen wurde in einem Vierteljahr das gesamte Grabungsgebiet sowohl in der Fläche als auch zusätzlich in detaillierten Aufnahmen für unterschiedliche Zwecke erfasst. Etwa 2/3 der Bilder wurden auf Schwarz-weiß-Film, der Rest auf Farbfilm aufgenommen.

Die Ausführenden entschieden sich für eine sehr dichte Paßpunktbestimmung, vornehmlich mit Theodolit und Nivelliergerät. Inzwischen sind erste Bildtriangulationen durchgeführt worden, die deren Ebenbürtigkeit, insbesondere aber auch höhere Homogenität der Ergebnisse ohne Belastung der Feldarbeitszeit zeigten.

Da die Bilder einer Teil-Meßkammer nicht an allen photogrammetrischen Auswertegeräten mit der notwendigen Genauigkeit ausgewertet werden können, die Expeditionsergebnisse aber der Allgemeinheit zugänglich gemacht werden, sollte dieser Einschränkung möglichst abgeholfen werden. Auf die am hiesigen Institut laufenden Untersuchungen wurde bereits hingewiesen (Dames, Jacobs, Wanzke, Busemeyer).



Abb. 6: Notaufnahme eines Teiles der römischen Stadtmauer in Köln. Aufnahme mit Photocopter der Firma Schlüter aus der Luft. Aufnahmekammer Rolleiflex SLX mit Reseau. Die Aufnahme war wegen starker Luftturbulenzen sehr schwierig durchführbar.

**Römische Stadtmauer, Köln.** (Abb. 6) Die vorangegangenen Beispiele geben leider keinerlei Einblick in einen aktuellen Grabungsbefund mit den vielfältigen Dokumentationsmöglichkeiten der Photogrammetrie. Entsprechende Beispiele lagen hier nicht vor.

Eine Notaufnahme zeigen die beispielhaft ausgewählten Meßaufnahmen mit einer WILD P 32 anlässlich der Ausschachtungsarbeiten für eine Tiefgarage zwischen Kölner Dom und Rhein mit Teilen der freigelegten römischen Stadtmauer. Die Mauer mußte sofort nach Aufnahme abgebaggert werden. Neben dem erdgebundenen Einsatz der genannten Kamera wurden von einem "Photocopter" der Fa. Schlüter Senkrechtaufnahmen mit einer ROLLEIFLEX SLX angefertigt. Beide Materialien dienten zur Bestimmung eines engen Punktnetzes durch eine Bildtriangulation. Über Paßpunkte konnten die Neubestimmten Punkte im städtischen Vermessungsnetz koordiniert werden.

### Literatur

Eine neuere deutschsprachige Monographie über Nahbereichsphotogrammetrie existiert z.Zt. noch nicht. Englischsprachige Werke sind nicht vollständig und bereits nicht mehr auf neuestem Stand. Nachfolgend werden nur diese Bücher, nicht aber generelle Standardwerke zur Photogrammetrie genannt. Zudem enthält die Zusammenstellung einige Übersichtsarbeiten zum Thema sowie Literatur zu den Beispielen. Ausgehend davon kann weitere Literatur erschlossen werden.

- Atkins, K.B., Ed.: Developments in Close Range Photogrammetry - 1, Appl. Science Publishers, London 1980.
- Dames, W., M. Jacobs, W. Wanzke und K. Busenmeyer: Close-Range Aerial Photogrammetry in Archeology. In Interim Reports, Vol. 1. Report on Field Work Carried out at Mohenjo-Daro Pakistan 1982-83, ed. M. Jansen and G. Urban, Aachen 1984, S. 171-190.
- Ellenbeck, K.H. und R. Kotowski: Zur Entzerrung und Montage geeigneter Nahbereichsaufnahmen. Bildmessung und Luftbildwesen 53 (1985), S. 137-139.
- Grün, A. u. L. Mauelshagen: Photogrammetrische Bauaufnahme in der byzantinischen Wüstenstadt Resafa/Syrien. V. Internat. Symposium für Photogrammetrie in der Architektur und Denkmalpflege, 9.-12.10.1978, Sibenik, Jugoslawien.
- Karara, H.M., Ed.: Handbook of Non-Topographic Photogrammetry. American Soc. of Photogrammetry. Falls Church, Va., 1979.
- Kraus, K. u. P. Waldhäusl: Photogrammetrie für die Archäologie. In: Lebendige Altertumswissenschaft. Festgabe zur Vollendung des 70. Lebensjahres von Hermann Vettters (Sonderdruck 1985).
- Kupfer, G.: Aktuelle Fragen zur Strategie in der Nahbereichsphotogrammetrie. Internat. Archiv für Photogrammetrie, Vol 24 V/2, S. 292-300. London 1982.
- Lacmann, O.: Die Photogrammetrie in ihrer Anwendung auf nicht-topographischem Gebiet, Leipzig 1950.
- Wester-Ebbinghaus, W.: Zur Verfahrensentwicklung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Schriftenreihe des photogrammetrischen Instituts der Universität Bonn, Heft 2, 1981.
- do.: Ein photogrammetrisches System für Sonderanwendungen. Bildmessung und Luftbildwesen 51 (1983), S. 118-128.

---

Prof. Dr.-Ing. G. Kupfer  
Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn  
Nußallee 15, 5300 Bonn 1