

**BALLON-PHOTOGRAMMETRIE ÜBER DEM GRABUNGSFELD VON
MOHENJO-DARO/PAKISTAN**

Jürgen Heckes, Deutsches Bergbau-Museum Bochum
Rüdiger Kotowski; Landolf Maelshagen
Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn
Bundesrepublik Deutschland
Kommission V

Zusammenfassung

Die architekturhistorischen und archäologischen Forschungen in der prähistorischen Ruinenstadt MOHENJO-DARO werden seit 1978 in interdisziplinärer Kooperation unter der wissenschaftlichen Leitung von Prof. Dr.-Ing. Günter Urban und Dr.-Ing. Michael Jansen / Lehrstuhl für Baugeschichte und Denkmalpflege der RWTH Aachen fortgesetzt. Die Dokumentation der aus dem 3. Jahrtausend v. Chr. (2000-2500 B.C.) stammenden Bausubstanz nach Grund- und Aufriß erfolgte mit geodätischen und photogrammetrischen Mitteln. Für die photogrammetrischen Luftaufnahmen wurde die Mittelformatkamera Rolleiflex SLX Réseau mit den Objektiven 50 und 120 mm verwendet. Der für Nahbereichsluftaufnahmen von K. L. Busemeyer (Aachen, GEFA-Flug) konzipierte und konstruierte Heißluftfesselballon stand hier erstmals für flächenhafte Triangulationen zur Verfügung. Durch Bündeltriangulation wurde am hiesigen Institut ein Paßpunktfeld für die photogrammetrische Auswertung nach Lage und Höhe geschaffen, welche am Zeiss Planicomp C100 ausgeführt werden wird.

Einführung und Hintergründe

Die architekturhistorischen und archäologischen Forschungen in der prähistorischen Ruinenstadt Mohenjo-Daro werden seit dem Jahre 1978 in interdisziplinärer Zusammenarbeit unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Günter Urban und Dr.-Ing. Michael Jansen (Lehrstuhl für Baugeschichte und Denkmalpflege der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen) fortgesetzt und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Erstmals wurde während der Arbeitskampagne 1982/83 dieses Projekts zur photogrammetrischen Aufnahme eines größeren Flächenverbandes ein von K. L. Busemeyer (Aachen, GEFA-Flug) konstruiertes, ferngelenktes gefesseltes Luftschiff (Abb. 1 u. 2) verwendet /1/,/2/,/10/, dessen Einsatz nur bei höheren Windgeschwindigkeiten problematisch ist. Für die photographischen Aufnahmen standen zwei Mittelformatkammern Rolleiflex SLX Réseau (mit 6 x 6 bzw. 11 x 11 Réseau Punkten) zur Verfügung, welche inzwischen bei vielfältigen Anwendungen in unterschiedlichsten Disziplinen erprobt wurden /3/,/4/. Die Kamera wird in der Luftschiffgondel (Abb. 3) kardanisches gelagert und läßt sich über eine leichte Zeigerkonstruktion, die am Objektiv befestigt ist, vom Piloten ferngesteuert in Streifenrichtung auskannten. Bei Verwendung von 60 mm breiten, handelsüblichen Rollfilm (Ilford FP 4, Kodak Ektachrome 64) wurde mit den beiden Objektiven Distagon 4/50 mm (dingseitiger Öffnungswinkel 78°) und S-Planar 5,6/120 mm (dingseitiger Öffnungswinkel 36°) gearbeitet.

Die immense kulturhistorische Bedeutung des fruchtbaren Indus-Schwemmlandes und größerer Bergiche im erweiterten Industal bis zu einer Flächendeckung von 1500 x 1500 km² (Abb. 4) wurde erst durch die Ausgrabungen von Mohenjo-Daro im Jahre 1921 durch den indischen Archäologen R. D. Banerjee und wenig später, zwischen 1924 und 1927, durch den Direktor des indischen Antikendienstes Sir John Marshall und durch spätere archäologische Arbeiten augenfällig /5/,/6/,/8/.

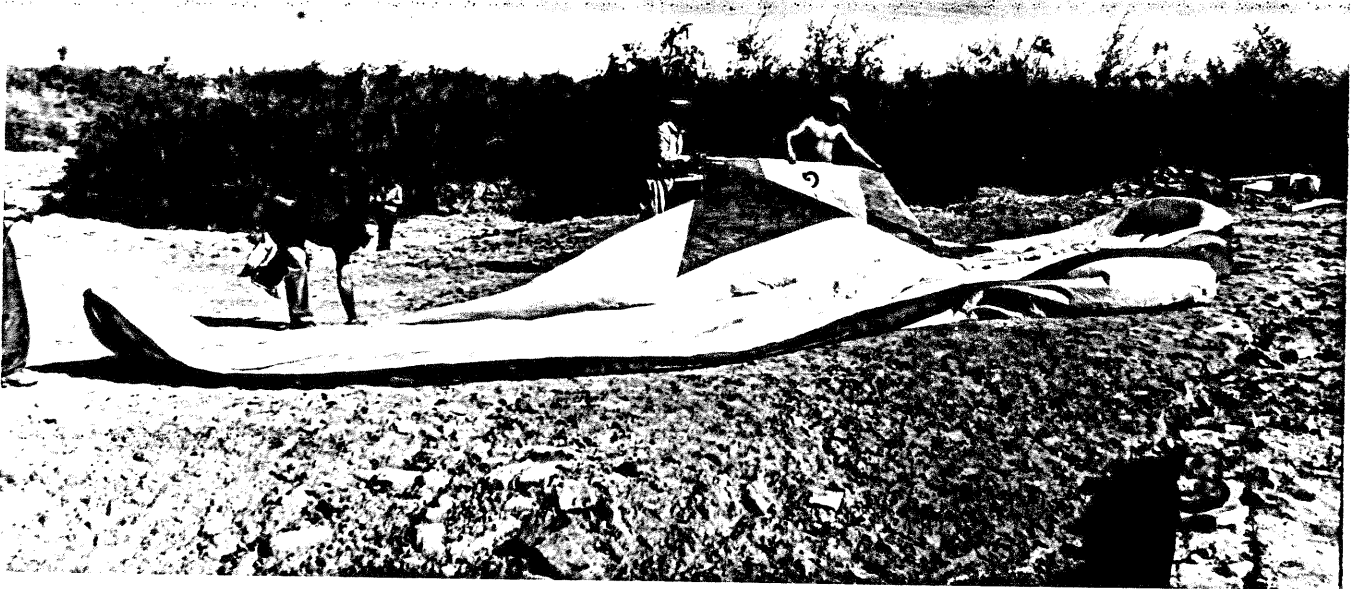


Abb. 1 Der Heißluftfesselballon während der Startvorbereitungen

Daß hier in Mohenjo-Daro, wie in Harappa, einem Fundort, der bereits im 19. Jahrhundert bekannt war, der ca. 500 km nordöstlich im Industal gelegen ist und nach dem die "Indus-Kultur" heute auch "Harappa-Kultur" genannt wird, die Wiege für eine der frühesten, hoch entwickelten Stadtkulturen gefunden worden ist, wurde vorher von den Archäologen nicht erkannt. Harappa war schon beim Bau der Eisenbahn Lahore - Multan im Jahre 1857 bekannt; es wurde als Ziegelsteinbruch genutzt, denn seine gebrannten Lehmziegel wurden von britischen Ingenieuren für den Bau der Trasse verwertet.

Banerjee kam bei seiner Grabung in Mohenjo-Daro am buddhistischen Heiligtum, einem Stupa, der vermutlich nach der Zeitenwende, in der Kushan-Zeit um ca. 200 nach Chr., von Mönchen im Rahmen einer Klosteranlage erbaut worden ist, zu der Erkenntnis, daß unter der buddhistischen Anlage Teile der prähistorischen Siedlung zu vermuten seien. Von Marshall wurde daraufhin im großen Stil das alte Mohenjo-Daro freigelegt, dessen Hochblüte zwischen etwa 2500 und 2000 vor Chr. anzusiedeln ist und in dem bis zu 35000 Einwohner gelebt haben mögen. Da bis heute weder hier noch in anderen Regionen der Harappa-Kultur eine Art Monumentalarchitektur, wie Paläste, prächtige Denkmäler, Kolossalfiguren oder Totenstädte vergangener Herrscher-Dynastien vorgefunden wurde, so läßt sich nach heutigen archäologischen Erkenntnissen, eine weitere Fehleinschätzung der traditionellen Archäologie belegen. Diese orientierte sich an den Vorbildern der Frühkulturen Mesopotamiens oder Ägyptens und interpretierte, bisweilen sogar willkürlich, monarchisch-absolutistische, politisch-religiöse Herrschaftsmodelle in die Architektur der Harappa-Kultur hinein (z.B. "Priesterkönig"). Beeinflussungen der Indus-Kultur durch andere Frühkulturen sind bis dato nicht nachweisbar, Handelskontakte können vermutet werden. Vielmehr läßt die pragmatische und wenig luxuriöse Bauweise mit einfachen und einheitlichen Grundrißtypen (aus gleichmäßig geformtem, gebranntem Lehmziegel) auf die Keimzellen

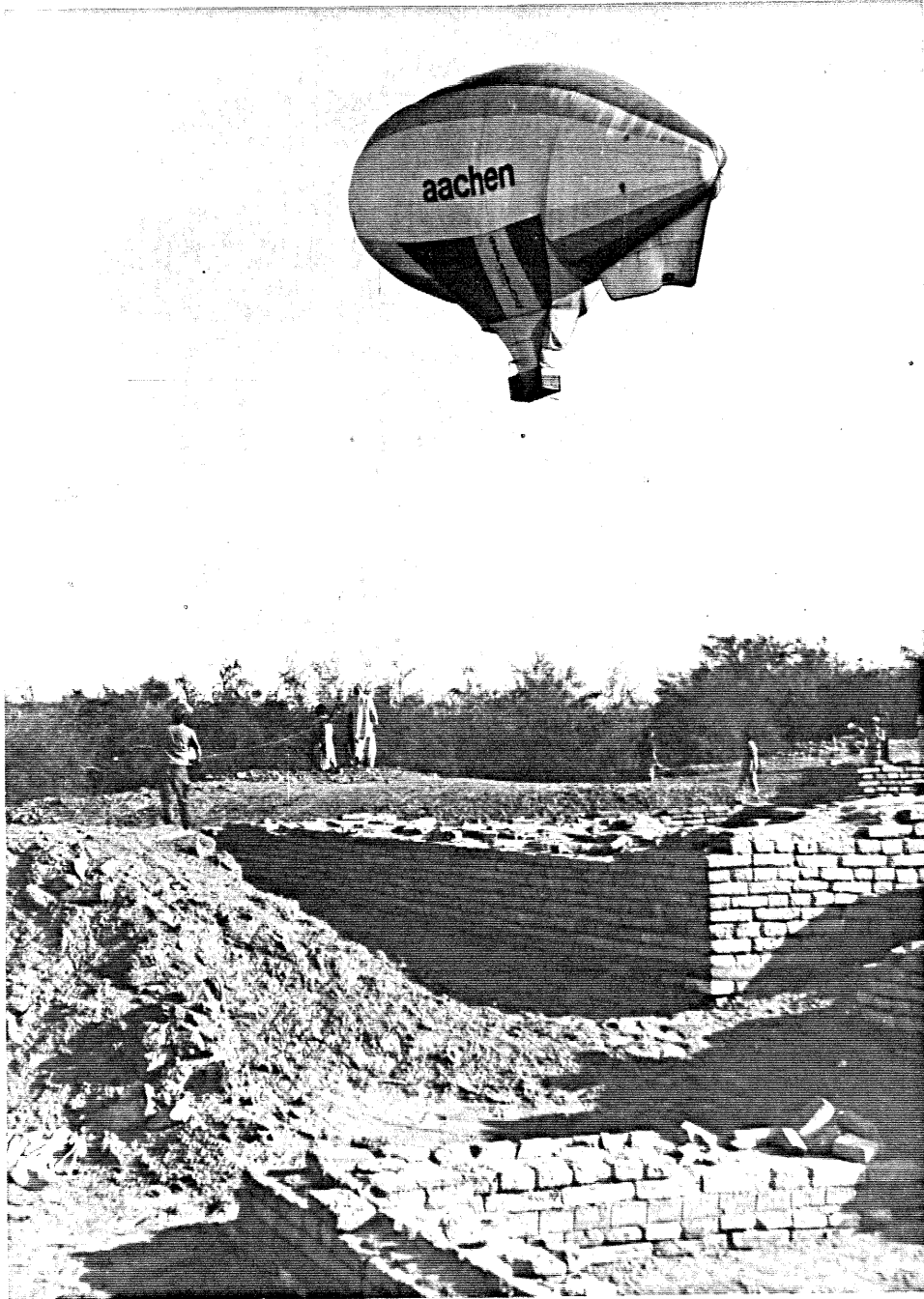


Abb. 2 Der Ballon kurz nach dem Start über einem Grabungsfeld

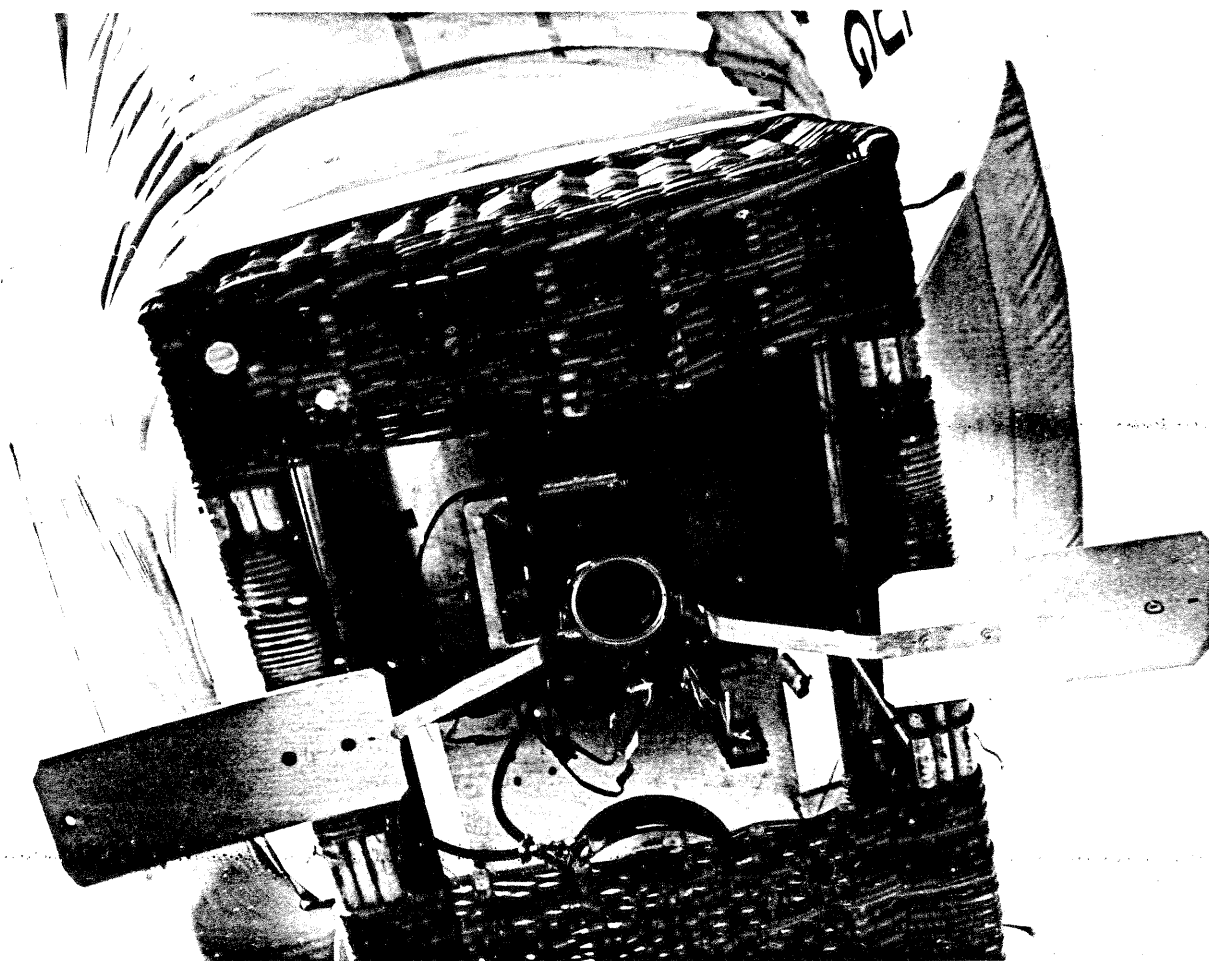


Abb. 3 Die Luftschiffgondel mit der Rolleiflex SLX Réseau

prodemokratischer Gesellschaftsformen in einer technisch wie organisatorisch hochentwickelten Stadtgemeinschaft schließen.

Neben der endgültigen Klärung der Entstehungsgeschichte bleiben die Fragen nach dem Niedergang der Harappa-Kultur offen. Wurde es durch klimatische Veränderungen oder gar Katastrophen, in deren Folge sich der Indus verlagerte, verursacht, oder ist er durch den Einfall indogermanischer Stämme provoziert worden. Fest steht hingegen, daß die auf Siegeln gefundenen Schriftzeichen bis heute ihrer Entzifferung harren und somit Rätsel aufgeben, ähnlich wie es aus gesellschaftspolitischem Betrachtungswinkel die "patriarchalischen Pseudo-Demokratien" unserer Tage zuweilen auch tun.

Aufnahmekonzeption und Datenbehandlung

Über dem gesamten Grabungsfeld von Mohenjo-Daro wurden in vier Teilbereichen flächendeckende Luftbildverbände mit den beiden Objektiven 50 und 120 mm aufgenommen /2/, /4/. Für einen ersten Versuch wurde aus einem der Verbände die Region um den Stupa-Hügel (ca. 140 x 150 m²), der sich gegenüber dem sonstigen Terrain um ca. 15 m erhebt, ausgewählt (Abb. 5 u. 6). Der kleine Block umfaßt 17 Bilder in drei Streifen (14 Modelle) und ist mit dem S-Planar 120 mm in ca. 105 m über Grund geflogen worden. Bei recht regelmäßiger Flugstreifenanordnung ergeben sich zwischen 55 und 60 % Längs- und zwischen 20 und 23 % Querüberdeckung. Sämtliche Bilder des Verbandes enthalten 9 signalisierte Punkte, zu denen auch die unter Zuhilfenahme einer Spiegelreflexkamera abgeloteten Aufnahmestandorte zählen (Abb. 7). Die Art der Fixierung wurde in dieser Form erstmals in /9/ vorgeschlagen. Zur Festlegung der Lotfußpunkte und der übrigen Paßpunkte dienten weiße Signale auf schwarzem Pappgrund. All diese Punkte sind nach Lage und Höhe auf das örtliche trigonometrische Netz bezogen.

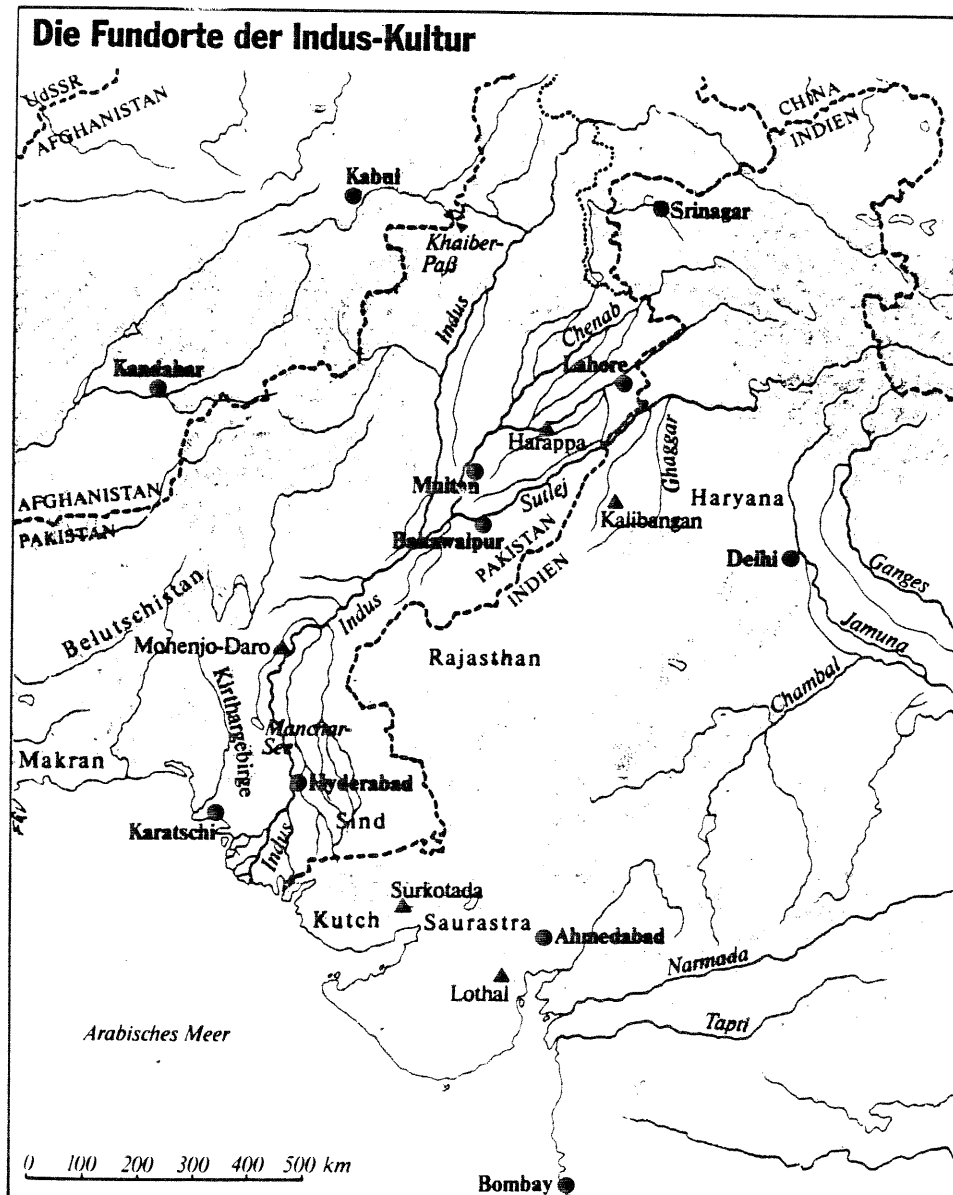


Abb. 4 Die Lage Mohenjo-Daros und anderer Fundstellen der "Harappa-Kultur" im Indus/Pakistan (nach /5/)

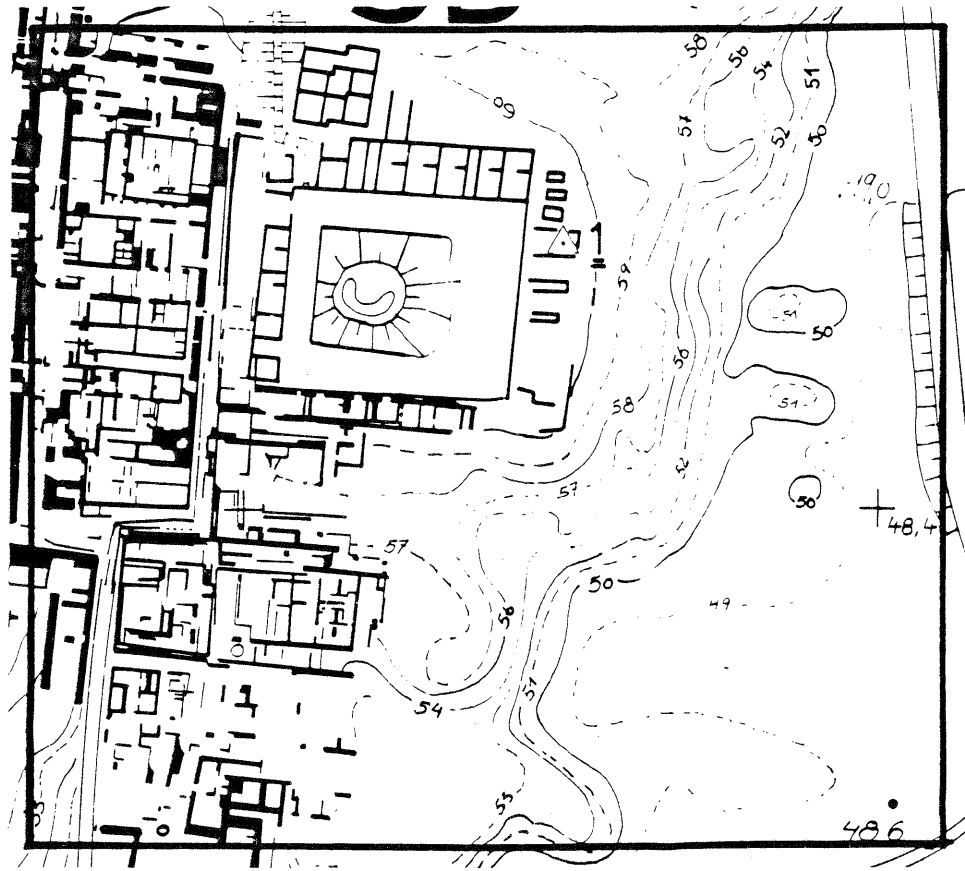


Abb. 5 Montage alter Karten (um den Stupa-Hügel), Maßstab ca. 1 : 850, photogrammetrischer Teilblock

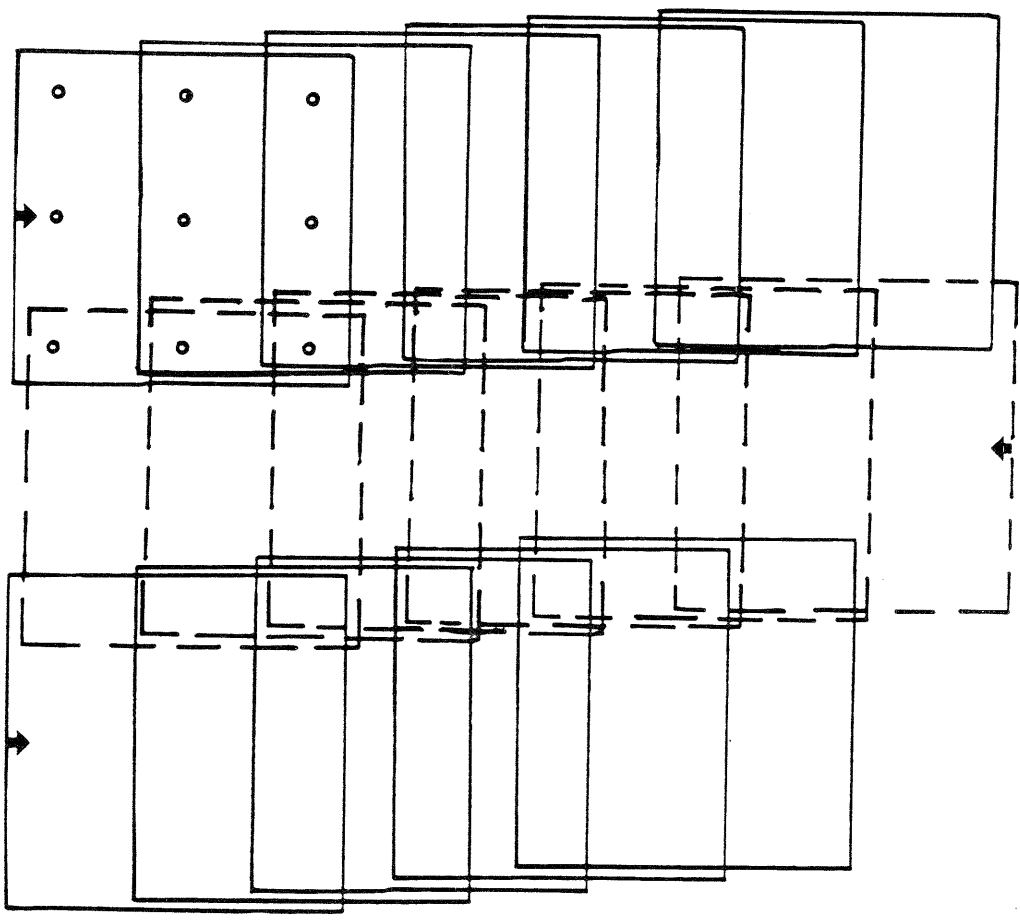


Abb. 6 Die Bildfluganordnung zum Teilblock



Abb. 7 Fixierung des Ballonstandortes mittels einer Spiegelreflexkamera
(Photos von K. L. Busemeyer)

Die Original-Negative wurden am Planicomp C100 des Deutschen Bergbau-Museums / Bochum monoskopisch ausgemessen (je Bild 36 Réseaupunkte, 9 signalisierte Punkte, Standardabweichungen aus Doppelmessungen in $x: \pm 2.6 \mu\text{m}$, in $y: \pm 2.8 \mu\text{m}$). Die Bildkoordinaten wurden durch Interpolation innerhalb lokaler Réseamaschen gewonnen /13/. Die anschließende Modellbildung und der räumliche Rückwärtschnitt am HP-1000 Rechner des Instituts für Photogrammetrie der Universität Bonn dienen der Bestimmung von Näherungswerten für die Parameter der äußeren Orientierung und die Objektkoordinaten (Mehrzweckprogramm /3/). Die so interaktiv aufbereiteten Daten wurden alsdann zur Berechnung von Bündelausgleichungen /7/,/12/ zusammengestellt.

Triangulationen

Wie bei photogrammetrischen Luftbildblöcken üblich wurde der Rand des Blocks im Abstand von 2 bis 4 Basislängen mit Lagepaßpunkten besetzt. Die gleichen Randpunkte dienen auch zur Höheneinpassung. Außerdem wurde eine zusätzliche Kette von Höhenpaßpunkten quer durch den Block vorgesehen.

Nach den bisher durchgeführten Bündeltriangulationen und Transformationen können die vorzustellenden Ergebnisse als nur vorläufig angesehen werden. Während die Lagegenauigkeit mit Standardabweichungen zwischen $\pm 5 - 10 \text{ cm}$ für die zweckbezogene Weiterbenutzung hinreichend ist (vgl. auch /11/), können mit diesem Bildverband bei einem Bildmaßstab von $1 : 800$ in Verbindung mit einer Schmalwinkelkamera und bei einem Basisverhältnis von $1 : 6$ die gewünschte Höhengenaugigkeit von $\pm 5 \text{ cm}$ nicht erreicht werden.

Zufriedenstellendere Ergebnisse hätten erzielt werden können, wenn vom Personal vor Ort -vorteilhafterweise in der Phase der Punktsignalisierung- zusätzliche Weitwinkelaufnahmen durchgeführt worden wären, um bessere Strahlenschnittgeometrie zu erzielen.

Näheren Aufschluß über Genauigkeitssteigerungen gaben Simulationen für Kammerkonstanten von 120 und 50 mm. Dazu wurden die Bilddaten so generiert, daß der tatsächlichen Aufnahmeanordnung weitestgehend entsprochen wurde. Unter Vorgabe eines \hat{a} priori σ_0 von $\pm 10 \mu\text{m}$ und von beobachteten Paßpunkten (Lage: $\pm 10 \text{ cm}$, Höhe: $\pm 5 \text{ mm}$ -eine Größenordnung, die durch Nivellement sicher erreicht werden kann -, Paßpunktanordnung siehe vorne) ergaben sich für das 120 mm - Objektiv Standardabweichungen in der Lage von $\pm 6 \text{ cm}$ und in der Höhe von $\pm 10 \text{ cm}$, für das 50 mm - Objektiv belaufen sich die Standardabweichungen in der Lage auf $\pm 2 \text{ cm}$ und in der Höhe auf $\pm 3 \text{ cm}$. Diese Ergebnisse verifizieren erwartungsgemäß, daß eine Ergänzung des 120 mm - Bildverbandes um 50 mm - Distagonaufnahmen zu einer deutlichen Blockstabilisierung führt und die geforderten Grenzen für die Höhengenaugigkeit eingehalten werden.

Die geodätische Einpaßinformation betreffend erscheint es empfehlenswert, auf eine aufwendige Paßpunktbestimmung zu verzichten und sich statt dessen auf nivellierte Höhen und direkt gemessene Raumstrecken zu beschränken, da hiermit gleiche Genauigkeitsleistung erzielbar ist, wie weitere Simulationsrechnungen gezeigt haben.

Hinsichtlich der Parameter der inneren Orientierung wurden mit dem vorliegenden Bildmaterial für Kammerkonstante c_k und Hauptpunktlage x_H , y_H Werte aus einer zuvor durchgeführten Testfeldkalibrierung als Beobachtungen mit einer Genauigkeit \hat{a} priori von $\pm 100 \mu\text{m}$ eingeführt; ein Spielraum, innerhalb dessen die Reproduzierbarkeit für diese Parameter als gewährleistet angesehen werden kann. Wie in /11/ zeigte sich, daß für eine Verbesserung der Hauptpunktgenauigkeit im Verband ausreichende Information gegeben war. Für die Kammerkonstante hingegen bestätigte sich lediglich die \hat{a} priori Genauigkeit. Eine Überprüfung der äußeren Zuverlässigkeit ergab, daß Veränderungen von c_k , x_H , y_H um Beträge in der Höhe eines gerade noch erkennbaren groben Fehlers zu keiner unzulässigen Verfälschung der Objektkoordinaten führten. Die radialsymmetrische Verzeichnung ließ sich infolge ausreichender Bildpunktdichte auf $\pm 5 \mu\text{m}$ ermitteln. Ergebnisse aus früheren Kalibrierungen anderer S-Planar-Objektive bestätigten sich mit erreichten Maximalwerten von ca. $20 \mu\text{m}$ (vgl. /3/,/4/,/11/,/14/).

Abschließend sei hervorgehoben, daß die Winkel der äußeren Orientierung nach der Bündelausgleichung - φ und ω ergeben sich zu ± 1 bis 2 gon , und κ liegt zwischen ± 3 bis 6 gon - eine gute Manövrierfähigkeit des Heißluftschiffes (Auskantung, Einhaltung der Nadirrichtung) signalisieren.

Literatur

- /1/ Busemeyer, K.L.: Luftschiffeinsatz in Pakistan; Zeitschrift Modell, Heft 1, 1984
- /2/ Wanzke, H.: Einsatz eines Heißluftschiffes zur Dokumentation von Mohenjodaro/Pakistan; Presented Paper, Komm. V, XV. ISPRS-Kongress, Rio de Janeiro/Brasilien, 1984

- /3/ Wester-Ebbinghaus, W.: Zur Verfahrensentwicklung in der Nahbereichsphotogrammetrie; Dissertation Bonn, 1981
- /4/ Beiträge zu Symposien der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung im Jahre 1982, Veröffentlichung des Instituts für Photogrammetrie der Universität Bonn, Heft 3, 1982
- Beiträge zur Tagung "Nahbereichsphotogrammetrie", Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn, 22./23. 3. 1984
- /5/ Jansen, M.: Der Hügel der Toten beginnt zu reden ; Bild der Wissenschaft, Heft 3, 1982
- /6/ Jansen, M.: Preliminary Results of Three Years' Dokumentation in Mohenjo - Daro; Vorträge zum Mohenjo-Daro-Seminar am 5./6. 12. 1981 in Aachen, Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen, Heft 34, 1983
- /7/ Wester-Ebbinghaus, W.: Ein allgemein formuliertes Konzept zur Bildtriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen; Presented Paper Komm. III, XV. ISPRS-Kongress, Rio de Janeiro/Brasilien, 1984
- /8/ Mughal, R.: Current Research Trends on the Rise of Indus Civilization, Veröffentlichung des Geodätischen Instituts der RWTH Aachen, Heft 34, 1983
- /9/ Przybilla, H.J.; Wester-Ebbinghaus, W.: Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug; BuL Heft 5, 1979
- /10/ Heckes, J.: Überblick über Flugsysteme für photogrammetrische Aufnahmen im Nahbereich; Invited Paper, Komm.V, XV. ISPRS - Kongress , Rio de Janeiro/Brasilien, 1984
- /11/ Hansch, K.U.; Meid, A.: Photogrammetrische Aufnahme von Tempel- und Klosteranlagen in Kandy, Sri Lanka; AVN Heft 1, 1984
- /12/ Maelshagen, L.; Wester-Ebbinghaus, W.: Photogrammetric Documentation of a Mosaic Floor ; Presented Paper, CIPA-Symposium der ISPRS, Siena/ Italien, 1982
- /13/ Kotowski, R.: Zur Réseaukorrektur von systematischen Fehlern; BuL Heft 2, 1984
- /14/ Kotowski, R.; Rößmann, H.; Wester-Ebbinghaus, W.: Zweischalige Bündeltriangulation an einem Großbauwerk; ZfV Heft 3, 1983