

PHOTOGRAMMETRISCHE BAUAUFNAHME DER "KIRCHEN VON SIENA" -
ENTWICKLUNG EINES KONZEPTS ZUR VERMESSUNG VON GROSSBAUWERKEN

R. Kotowski
Universität Bonn

J. Peipe
Universität der Bundeswehr München

W. Wester-Ebbinghaus
Universität Hannover

ABSTRACT

Since 1979 the authors have been engaged in photogrammetric recording of several churches in the city of Siena/Italy in conjunction with a research project of "Deutsches Kunsthistorisches Institut Florenz". The survey method is characterized by employing equipment that highly facilitates the fieldwork *in situ*, in particular the partial metric camera ROLLEIFLEX SLX RESEAU. Control has been determined by analytical photogrammetric means with bundle adjustment as the primary approach. The development and improvement of the procedure is demonstrated with the recorded churches as an example.

EINLEITUNG

In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Kunsthistorischen Institut in Florenz wurden seit 1979 in mehreren Kampagnen vier Kirchenbauten in Siena/Italien photogrammetrisch aufgenommen. Die Aufgabenstellung bestand darin, zuerst ein räumliches Punktfeld am Objekt festzulegen, um dann mit dessen Hilfe Einzelmaße berechnen und vor allem Strichkartierungen im Maßstab 1 : 100 herstellen zu können. Die Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertung werden für bauhistorische Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojekts "Die Kirchen von Siena" verwendet (Riedl und Seidel 1985).

Bei der Vermessung der Kirchen S. Agostino, S. Domenico, S. Francesco und des Doms von Siena entstand im Laufe der Jahre ein Konzept für die photogrammetrische Aufnahme von Großbauwerken, dessen besondere Vorzüge die Möglichkeit zur optimalen Anpassung an das Objekt und dessen Lage vor Ort und die wirtschaftliche Arbeitsweise sind. Es wurden sowohl instrumentelle Voraussetzungen für die photogrammetrische Aufnahme geschaffen - durch die Einführung der Teil-Meßkammer Rolleiflex SLX Réseau in die photogrammetrische Praxis - als auch programmtechnische Voraussetzungen für die numerische Auswertung der Bilder im Rahmen einer Bündelausgleichung, in die zusätzliche Beobachtungen eingeführt werden können. Die Entwicklung dieses Konzepts wird im folgenden erläutert und die Verfahrensweise, wie sie heute operationell vorliegt, am Beispiel der Vermessung des Doms von Siena zusammengefaßt dargestellt.

AUFNAHMEOBJEKTE

Die Bettelordenskirchen S. Agostino, S. Domenico und S. Francesco stammen aus dem 13. bzw. 14. Jahrhundert. Sie liegen wegen ihrer Größe ¹⁾ am Rande der Altstadt, da zu dieser Zeit der Kern des Stadtgebietes von Siena bereits dicht bebaut war. Die Kirchen wurden an Hügelländern errichtet, so daß sich die Chorbereiche in steil abfallendem Gelände befinden (Abb. 1).
Eine vollständige Bauaufnahme ist nur mit Hilfe der Photogrammetrie durchführbar.

1) S. Agostino: 63 m lang, im Querschiff 38 m; S. Domenico und S. Francesco: über 80 m lang, im Querschiff 55 m

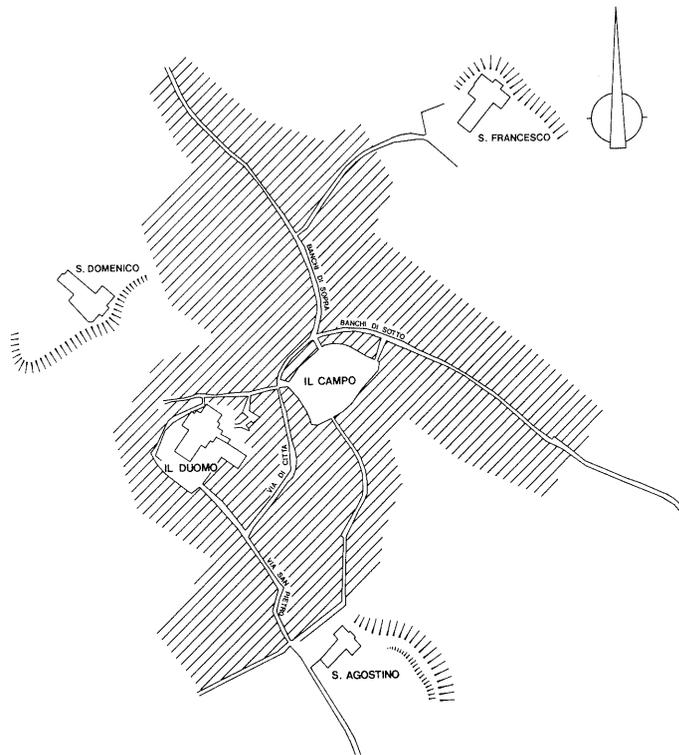


Abb. 1: Stadtplan von Siena



Abb. 2: S. Agostino,
Aufnahme mit Wild P 32

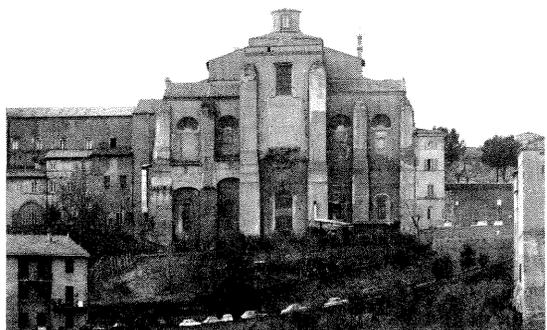


Abb. 3: S. Agostino, Fernaufnahme
mit Linhof Technika

Der Dom von Siena liegt in der Mitte der Stadt auf ihrem höchsten Punkt. Der heutige Bau mit seinen imponierenden Ausmaßen von ca. 90 m Länge und 55 m Breite wurde ab 1210 errichtet. Im Jahre 1339 beschloß man, sein Längsschiff als Querschiff einer neu zu errichtenden Kirche zu betrachten. Der Bau dieses "Neuen Doms" wurde nicht vollendet. Ziel der Bauaufnahme ist die Erfassung aller zum Dom gehörenden Gebäude (Abb. 1); sie befinden sich - wie die anderen Kirchen - in abschüssigem Gelände.

ENTWICKLUNG DES KONZEPTS FÜR DIE PHOTOGRAMMETRISCHE BAUAUFNAHME DER "KIRCHEN VON SIENA"

Bei allen Vorhaben von Siena waren bestimmte Randbedingungen zu berücksichtigen. Zum einen sollten die Arbeiten vor Ort in kurzer Zeit und mit möglichst wenig Personal und Aufwand durchgeführt werden. Zum anderen war zu bedenken, daß die Fassaden der großen Kirchenbauten wegen ihrer Hanglage nicht von allen Seiten zugänglich sind, so daß die Aufnahmeentfernungen zwischen ca. 20 m und 300 m variieren. Um einen für die Auswertung geeigneten Bildmaßstab zu erhalten, müssen also Aufnahmekammern verschiedener Brennweite zur Verfügung stehen. Wegen der dichten Bebauung waren auch Bilder von exponierten Standpunkten (Türme, Hausdächer) vorzusehen. Diese Gegebenheiten vor Ort beeinflussen die Wahl des Instrumentariums für die photogrammetrische Aufnahme.

Für das erste Projekt - S. Agostino - wurde daher neben einer photogrammetrischen Meßkammer Wild P32 (Abb. 2) eine mit langbrennweitigem Objektiv ausgestattete Nicht-Meßkammer Linhof Technika (Bildformat 60 mm x 90 mm, Objektiv Symmar 300 mm) eingesetzt, um die Chorfassade aus etwa 300 m Entfernung einschließlich Dachaufbauten stereoskopisch erfassen zu können (Abb. 3).

Die Verwendung einer Nicht-Meßkammer erfordert die Bereitstellung ausreichend dichter Information im Objektraum, um die innere Orientierung für jede Aufnahme zu erhalten (bildvariante Kalibrierung). Zu diesem Zweck wurde ein räumliches Paßpunktfeld am Objekt durch Vorwärtseinschneiden mit einem Theodolit festgelegt. Nach Berechnung der Kalibrierdaten wurden die Nicht-Meßbilder am Zeiß Planicom C 100 als Stereomodelle orientiert und Kartierungen der Kirchenfassaden hergestellt.

Aus der Vermessung von S. Agostino ergaben sich für die weiteren Vorhaben im wesentlichen drei Folgerungen:

- Der Aufwand bei der photogrammetrischen Aufnahme ist zu vermindern durch die Verwendung eines einzigen KammerSystems, das allen Anforderungen genügt; also eine leichte und einfach zu handhabende Kammer mit Wechselobjektiven, möglichst großem Bildformat und moderner Fototechnik, die zudem exakte photogrammetrische Auswertungen ermöglicht. Wesentlich ist, daß die Bestimmung von Paßinformation für die Feldkalibrierung nicht mehr oder nur in geringem Umfang erforderlich sein sollte.
- Zur Skalierung und Horizontierung der photogrammetrischen Modelle ist Objektinformation vorzusehen, die im Gegensatz zur üblichen, zeitaufwendigen Einmessung von Paßpunkten vor Ort schnell und unkompliziert zu erhalten ist, z.B. Strecken und Höhenunterschiede.
- Für die Bestimmung der Koordinaten eines räumlichen Punktfeldes bietet sich auch in der Architekturphotogrammetrie das Verfahren der Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen an (siehe z.B. Torlegård 1983, Ebner 1984, Wester-Ebbinghaus 1986 a). Die Anordnung der Aufnahmen ist - bei freier Stationierung - so zu wählen, daß am Objekt optimale Strahlenschnittgeometrie entsteht. Das Bauwerk wird im Innen- und Außenraum allseitig erfaßt und die Bilder bzw. Bildverbände über gemeinsame Punkte miteinander verknüpft. Zu den für die Triangulation verwendeten Aufnahmen können die für die Stereokartierung vorgesehenen treten. Sämtliche photogrammetrischen Strahlenbündel werden in einer Ausgleichung zusammen mit der geodätischen Information verarbeitet (Wester-Ebbinghaus 1981). Eine Kalibrierung der Aufnahmekammer kann - sofern not-

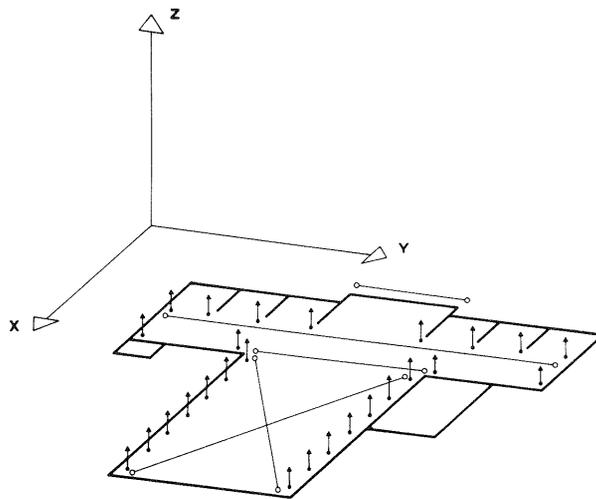


Abb. 4: S. Domenico, geodätische Einpaßinformation zur Bündeltriangulation

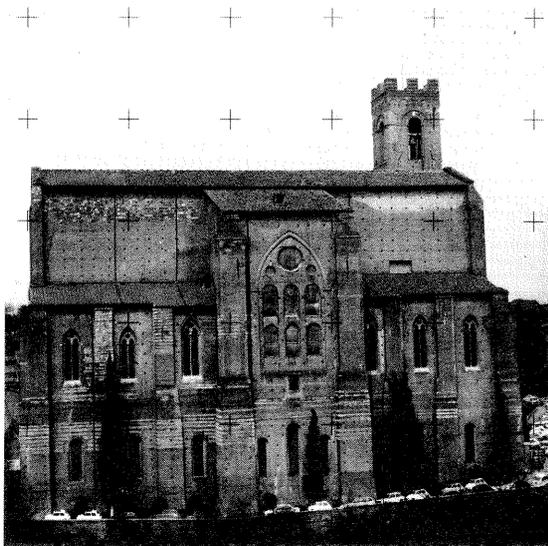


Abb. 5: S. Domenico, Fernaufnahme mit Rolleiflex SLX Réseau

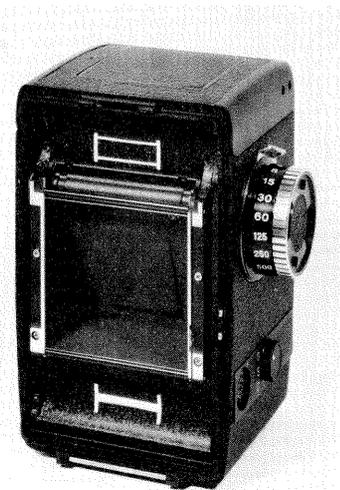


Abb. 6: Rolleiflex SLX Réseau Teil-Meßkammer



Abb. 7: Rolleiflex SLX Réseau mit Wechselobjektiven

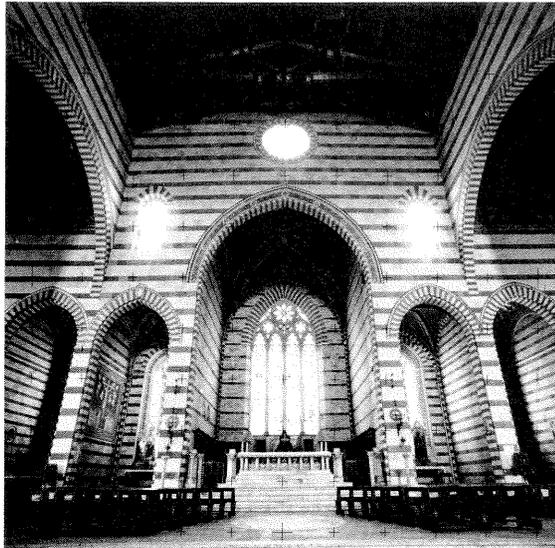


Abb. 8: S. Francesco, Chorfassade im Innenraum, Aufnahme mit Rolleiflex SLX Réseau



Abb. 9: S. Francesco, Chorfassade im Innenraum, Stereokartierung

wendig - simultan erfolgen, wobei auch die Einführung von aus früheren Berechnungen bekannten Daten der inneren Orientierung als beobachtete Parameter möglich ist. Bei dieser Vorgehensweise werden alle Beobachtungen mit angemessenem Gewicht berücksichtigt, und man erzielt das bestmögliche Ergebnis. Als Resultat der Bündelausgleichung erhält man die räumlichen Koordinaten aller Objektpunkte, die innere Orientierung der Aufnahmekammer und die äußere Orientierung der an der Ausgleichung beteiligten Bilder. Zur Beurteilung des Resultats werden die Standardabweichungen der geschätzten Parameter und Zuverlässigkeitsmaße für die Beobachtungen herangezogen.

Das geschilderte Verfahren wurde bei der Vermessung der Kirche S. Domenico konsequent angewendet (Kotowski et al. 1983). Als Aufnahmekammer wurde die von der Firma Rollei fototechnic hergestellte und auf Anregung und in Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie der Universität Bonn modifizierte Rolleiflex SLX eingesetzt (Abb. 5). Die Vorteile dieser Mittelformatkamera, für die inzwischen zehn Wechselobjektive mit Brennweiten von 40 mm bis 500 mm zur Verfügung stehen, sind vor allem geringes Gewicht und professionelle Fototechnik. Durch den Einbau einer Glasplatte mit bis zu 11 x 11 Kreuzen vor der Filmfläche wird das Prinzip der Teil-Meßkammer realisiert, ohne Kamerafunktionen einzuschränken (Wester-Ebbinghaus 1983). Das hochgenau kalibrierte Réseau ermöglicht die Korrektur systematischer Bildfehler infolge Filmdeformation und Filmverzug und definiert ein eindeutiges Bezugssystem für den Bildraum, so daß die Elemente der inneren Orientierung der Kammer mit geringem Aufwand bestimmt werden können. An die Stelle der bildvarianten Kalibrierung einer Nicht-Meßkammer tritt eine bildinvariante Kalibrierung, für die eine Serie von Aufnahmen einer bestimmten Kammerkörper-Objektiv Kombination gilt. Die Reproduzierbarkeit der inneren Orientierung bei Veränderung der Fokussierung bzw. bei Wechsel des Objektivs wird mit $\pm 50 \mu\text{m}$ für die Kammerkonstante und die Koordinaten des Bildhauptpunktes sowie mit $\pm 5 \mu\text{m}$ für die Verzeichnung angegeben (Wester-Ebbinghaus 1983). Die Bildraumparameter können bei der Ausgleichung des räumlichen Richtungsbündelnetzes simultan mitbestimmt werden, wenn die Aufnahmeordnung dafür genügend Information liefert (Wester-Ebbinghaus 1986 b). Die stabile Netzgeometrie eines geschlossenen Rundumverbandes, wie er bei der Bauaufnahme der Kirchen von Siena vorliegt, erfordert in der Regel keine speziellen Aufnahmen für die Kalibrierung (Kotowski et al. 1985). Mit dem vorgestellten Teil-Meßkammer-System (Abb. 6) ist es möglich, sich den Gegebenheiten vor Ort bestmöglich anzupassen.

Im Falle von S. Domenico wurden die Bildverbände innerhalb und außerhalb der Kirche über gemeinsame Punkte in den Fenstern miteinander verbunden. Als geodätische Einpaßinformation wurden Strecken und Höhenunterschiede vor Ort bestimmt (Abb. 4), also Beobachtungsformen gewählt, die mit geringem Aufwand zu erhalten sind. Damit ist eine Horizontierung und Maßstabsfestlegung des photogrammetrischen Gesamtmodells möglich. Die Ausgleichung erfolgte mit dem Rechenprogramm BOBUE (Wrobel und Ellenbeck 1976, Mauelshagen 1977).

Bei der Vermessung der Kirche S. Francesco wurde dieses Aufnahmekonzept in einigen Punkten erweitert, mit dem Ziel, das eingesetzte Instrumentarium noch besser zu nützen, den Aufwand für die geodätischen Messungen weiter zu verringern und damit die Wirtschaftlichkeit zu steigern und außerdem die Zuverlässigkeit durch verbesserte Kontrollierbarkeit der Ergebnisse zu erhöhen (Kotowski et al. 1985). Vier Kammerkörper-Objektiv-Kombinationen von 40 mm bis 350 mm wurden in der Bündelausgleichung - inzwischen mit dem Rechenprogramm MOR-S (Wester-Ebbinghaus 1985, Hinsken 1985) - kalibriert (Kotowski 1985).

Neben Strecken- und Höhenmessungen wurde mit einem Ingenieur-Theodolit ein Richtungsbündel im Inneren der Kirche beobachtet, das anstelle von Diagonalstrecken, die unter Umständen nur schwer mit ausreichender Genauigkeit zu messen sind, zur Stabilisierung des Bildverbandes beitragen kann. Es wurde teilfrei ausgeglichen (Koch 1980, Zinndorf 1985 a und b) und damit der Rangdefekt wegen nicht definierter räumlicher Verschiebung und azimuthaler Drehung des Punktfeldes gegenüber dem Objektkoordinatensystem behoben. Die Form des Objekts kann allein aus dem photogrammetrischen Datenmaterial bestimmt werden. Dieses Vorgehen wird vorteilhaft zur Erkennung fehlerhafter Messungen angewendet.

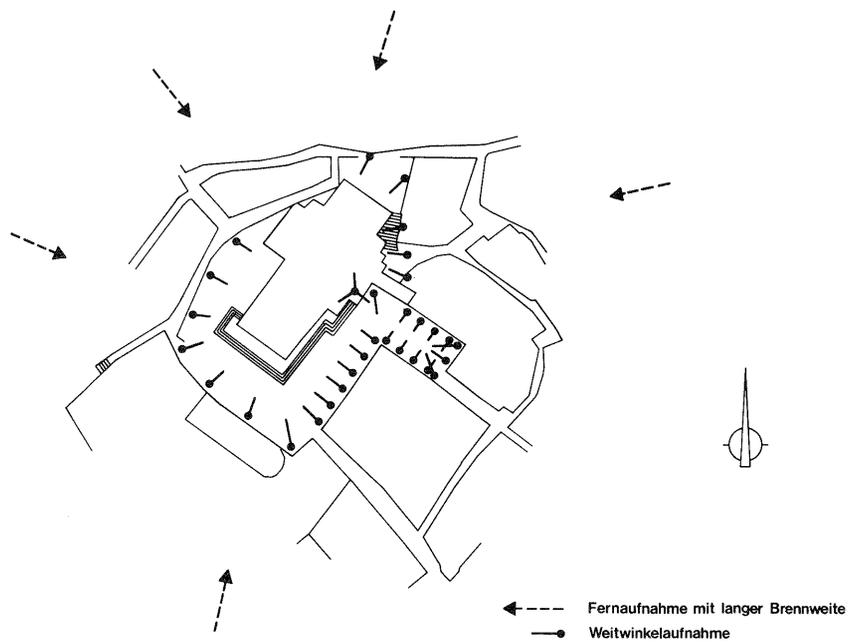


Abb. 10: Dom, Aufnahmeanordnung im Außenbereich

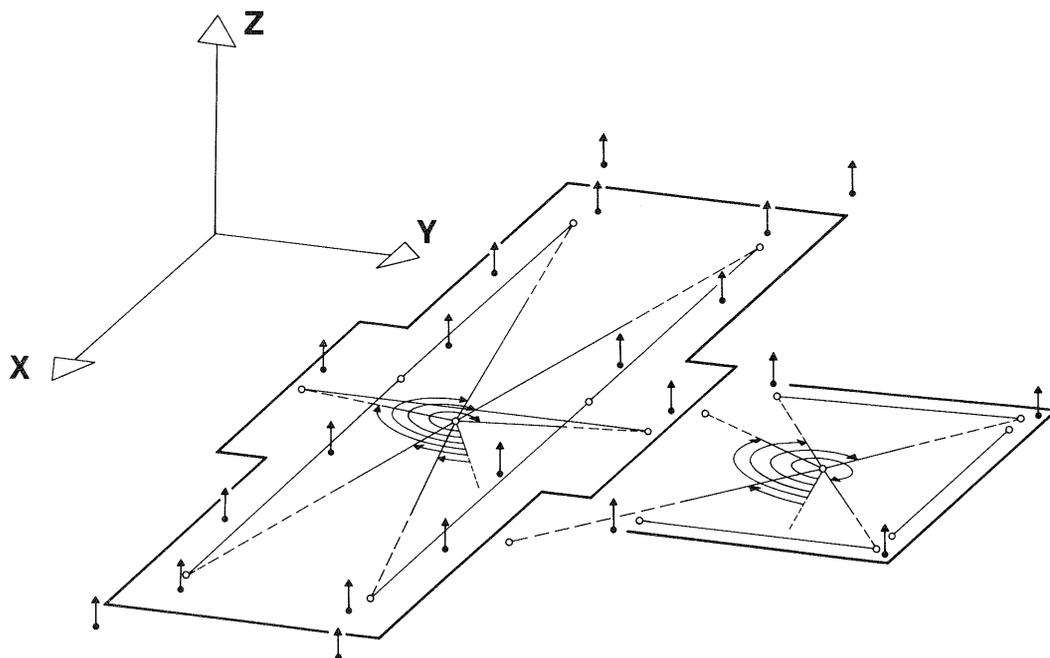


Abb. 11: Dom, geodätische Einpaßinformation zur Bündeltriangulation:
Strecken, nivellierte Höhen und Richtungsbündel

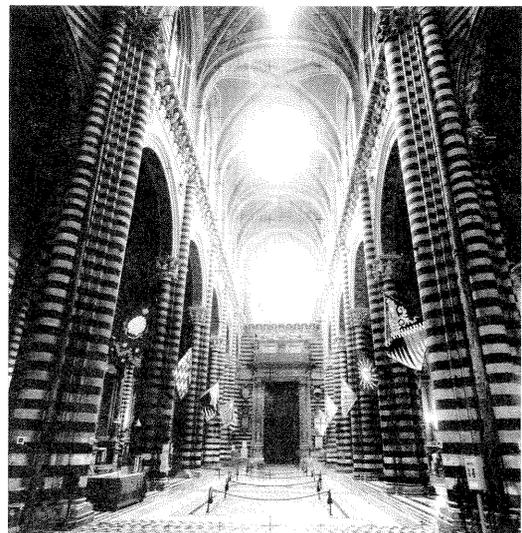
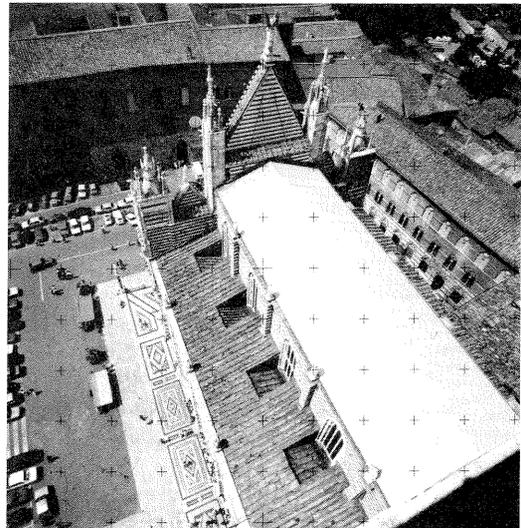
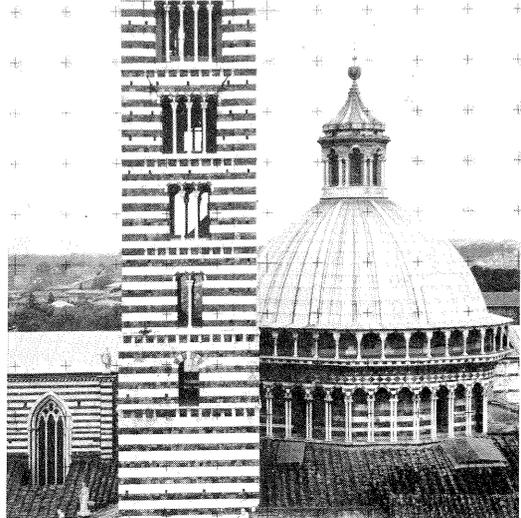


Abb. 12: Dom, Beispiel aus dem Bildverband, Aufnahmekammer Rolleiflex 6006-metric

Die Genauigkeit der ermittelten Objektkoordinaten betrug bei S. Francesco ± 1.5 cm (mittlerer quadratischer Punktfehler) mit Maximalwerten von ± 3.0 cm.

Als Beispiel für die Stereokartierung von S. Francesco wird ein Plan der Chor-Innenfassade gezeigt (Abb. 7 und 8). Der Bauhistoriker erwartet die exakte Wiedergabe der wesentlichen Linien des Bauwerks. Eine detaillierte flächendeckende Auswertung von Ornamenten, Maßwerk, Figuren etc. ist - wenn auch photogrammetrisch ohne weiteres realisierbar - nicht erwünscht. Da die Kartierung an einem Analytischen Plotter erfolgte, konnten die Daten der inneren und äußeren Orientierung aus der Bündelausgleichung an das Auswertegerät übergeben und die Modelle direkt gebildet werden; die sonst übliche zweistufige Modellorientierung entfiel.

PHOTOGRAMMETRISCHE BAUAUFNAHME DES DOMS VON SIENA

Das vorliegende operationelle Konzept soll im folgenden durch Angaben zur Vermessung des Doms von Siena, die zur Zeit in Arbeit ist, ergänzt werden. Die Verteilung der Aufnahmen im Außenbereich der Kirche ist aus Abb. 9 zu ersehen. Ein geschlossener Rundumverband konnte realisiert werden, der durch Aufnahmen vom Glockenturm des Doms gestützt wird. Wie im Fall von S. Francesco war der Einsatz von mehreren Kammerkörper-Objektiv-Kombinationen notwendig. Abb. 12 zeigt typische Bilder des Verbandes.

Die Aufnahmeordnung im Innenraum besteht aus Bildstreifen für die Längs- und Querschifffassaden mit 60 %iger Überdeckung sowie verknüpfenden Decken und Diagonalaufnahmen (Abb. 12). Aufnahmen von hochgelegenen Standpunkten (Balkon, Sims, Kuppelgalerie) stabilisieren den Bildverband. Außerdem wurde ein "Bilderbündel" im Innenraum erstellt. Es handelt sich dabei um Aufnahmen mit gleichem Drehzentrum, die sich überdecken und gleichmäßig über den Horizont verteilt sind. Der Vektor zwischen Dreh- und Projektionszentrum kann daher in der Ausgleichung für alle Bilder als unverändert angesetzt werden (Wester-Ebbinghaus 1985). Als Aufnahmekammer wurde eine Rollei-flex 6006-metric eingesetzt, eine Weiterentwicklung der bewährten SLX Réseau. Je ein mit dem Ingenieurtheodolit beobachtetes Richtungsbündel innerhalb und außerhalb des Doms ersetzte die Messung von Diagonalstrecken (Abb. 11). Der Theodolit-Standpunkt wurde signalisiert und wird, da in einigen Meßbildern enthalten, in der Bündelausgleichung mitgeführt.

Für all diese und weitere vorstellbare Beobachtungen im Objektraum bietet das Verfahren der gemeinsamen Ausgleichung ("Combined Adjustment") optimale Wirksamkeit.

ZUSAMMENFASSUNG

Die photogrammetrische Erfassung des Ist-Zustandes eines Bauwerkes bietet sich vor allem dann an, wenn es um die Bestandsaufnahme großer Gebäude und/oder komplizierter Formen geht. Anmietung und Aufbau eines Gerüsts und die Vermessung von Hand sind im allgemeinen wesentlich teurer und oft ungenauer als die photogrammetrische Vermessung.

Am Beispiel der Bauaufnahme der "Kirchen von Siena" wurde die Entwicklung eines Konzepts zur photogrammetrischen Vermessung von Großbauwerken geschildert. Teil-Meßkammer und Bündelprogramm zur gemeinsamen Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen bilden ein operationelles System, das sehr wirtschaftlich arbeitet und sich den Gegenbenheiten vor Ort optimal anpassen läßt. Geodätische Messungen werden auf ein Mindestmaß beschränkt; dabei werden Beobachtungsformen, die einfach zu erhalten sind, bevorzugt.

Bei der Stereokartierung sollte sich der Photogrammeter auf ein Minimum beschränken, also in Absprache mit dem Nutzer - Architekt, Bauforscher usw. - nur die wesentlichen Strukturen des Bauwerkes darstellen.

DANK

Allen an den Arbeiten in Siena beteiligten Herren der photogrammetrischen Institute der Universitäten Bonn, Hannover und der UniBw München sei an dieser Stelle für ihren Einsatz bei Aufnahme und Auswertung gedankt. Ebenso herzlich bedanken wir uns bei der Leitung und den Mitarbeitern des Deutschen Kunsthistorischen Instituts in Florenz für die hervorragende Zusammenarbeit und Betreuung vor Ort.

LITERATUR

- Ebner, H., 1984: Combined Adjustment of Photogrammetric and Non-photogrammetric Information. ISPRS Kongreß, Kommission III, Rio de Janeiro.
- Hinsken, L., 1985: MOR-S: Ein Anwendungsbeispiel für die Sparse-Technik in einem photogrammetrisch-geodätischen Netzausgleichungsprogramm. ZfV 110, 416-424.
- Koch, K.R., 1980: Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen. Dümmler Verlag, Bonn.
- Kotowski, R., Rößmann, H., Wester-Ebbinghaus, W., 1983: Zweischalige Bündeltriangulation an einem Großbauwerk. ZfV 108, 119-127.
- Kotowski, R., 1985: Basilika di San Francesco - Ein Beispiel zur simultanen Feldkalibrierung mehrerer Aufnahmesysteme. DGK B 275, 134-141, München.
- Kotowski, R., Peipe, J., Wester-Ebbinghaus, W., 1985: Ein Beispiel für die gemeinsame Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen - Arbeiten an der Basilika di San Francesco in Siena. Vortrag bei der wiss.-techn. Jahrestagung der DGPF, Berlin.
- Mauelshagen, L., 1977: Teilkalibrierung eines photogrammetrischen Systems mit variabler Paßpunktanordnung und unterschiedlichen deterministischen Ansätzen, DGK C 236, München.
- Riedl, P.A., Seidel, M. (Hrsg.), 1985: Die Kirchen von Siena, Band 1, Bruckmann Verlag, München.
- Torlegård, K., 1983: Combined Geodetic and Photogrammetric Mensuration - Problems and Possibilities. FIG-Kongreß, Sofie, 501.2/1-501.2/11.
- Wester-Ebbinghaus, W., 1981: Zur Verfahrensentwicklung in der Nahbereichsphotogrammetrie. Dissertation Bonn.
- Wester-Ebbinghaus, W., 1983: Ein photogrammetrisches System für Sonderanwendungen. BuL 51, 118-128.
- Wester-Ebbinghaus, W., 1985: Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen. ZfV 110, 101-111.
- Wester-Ebbinghaus, W., 1986 a: Ingenieur Photogrammetrie - Mathematische Ansätze und instrumentelle Voraussetzungen. FIG-Kongreß, Toronto, 611.2.
- Wester-Ebbinghaus, W., 1986 b: Analytische Kammerkalibrierung. ISPRS Symposium, Kommission V, Ottawa.
- Wrobel, B., Ellenbeck, K.H., 1976: Terrestrisch-photogrammetrische Punktbestimmung durch Simultanausgleichung gemessener Orientierungsdaten und Bildkoordinaten in der Bündelausgleichung. ISPRS Kongreß, Kommission V, Helsinki.
- Zinndorf, S., 1985 a und b: Freies Netz - Anwendungen in der Nahbereichsphotogrammetrie. BuL 53, 109-114 und 198.