

PRÄZISIONSPUNKTBESTIMMUNG ZUR DEFORMATIONSENTERSUCHUNG AN
DER MICHAELISKIRCHE IN LÜNEBURG MIT SIMULTANER KALIBRIE-
RUNG DES PHOTOGRAMMETRISCHEN SYSTEMS

E. Kruck

Sonderdruck

aus

DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe B

Heft Nr. 275

Arbeitstagung

"Kammerkalibrierung in der
Photogrammetrischen Praxis"

Bonn, Februar 1985

PRÄZISIONSPUNKTBESTIMMUNG ZUR DEFORMATIONSUNTERSUCHUNG AN DER MICHAELISKIRCHE IN LÜNEBURG MIT SIMULTANER KALIBRIERUNG DES PHOTOGRAMMETRISCHEN SYSTEMS

E. Kruck
Universität Hannover

EINFÜHRUNG

Die dreischiffige gotische Michaeliskirche in Lüneburg zeigte bereits während ihrer Bauzeit 1376-1418 Bergsenkungsschäden, da sie am Rande des Aussolungsberreichs der Lüneburger Saline errichtet wurde. Der weitere Salzabbau und die daraus resultierenden Bodensenkungen verursachten schwere Schäden an dem Bauwerk. Lange nach Ende des Salzabbaus wurde die Kirche vor 14 Jahren völlig renoviert und die Säulen, die inzwischen teilweise bis zu 80 cm aus dem Lot stehen, untereinander und mit dem Außenmauerwerk durch Zuganker verbunden. Weitere Bodenbewegungen haben jedoch inzwischen neue Schäden auftreten lassen, die u.a. zu Durchbiegungen der Zuganker führten und das Einziehen eines Sicherungsnetzes im gesamten Kirchenraum erforderlich machten. Um für zukünftige Baumaßnahmen qualitativ und quantitativ genaue Angaben über die Bewegungen zu erhalten, wurde der Innenraum der Kirche durch repräsentative Punkte photogrammetrisch erfaßt. Da gleichmäßige Setzungen keine Schäden verursachen, ist die Wiederholungsmessung, die im Sommer dieses Jahres erfolgen wird, nur mit diesem lokalen Netz zu vergleichen. Ein Anschluß an ein übergeordnetes "festes" Punktfeld war somit nicht notwendig. Wegen der geforderten hohen **Genauigkeit von ± 1 mm** für die Punktbestimmung wäre ein solcher Anschluß auch nicht realisierbar gewesen, da aufgrund der natürlichen Auslaugung des Salzstockes generell Bodenbewegungen auftreten und somit "feste" Punkte weiträumig nicht vorhanden sind.

MESSUNGSANORDNUNG

Die photogrammetrische Erfassung des 55 m langen und 26 m breiten Innenraumes erforderte viele Aufnahmen, da die 15 m hohen Säulen einen Durchmesser von 2,40 m aufweisen und somit zu starken Verdeckungen führen (Abb.1). An jeder Säule sowie an den Außenmauern auf Höhe der Säulen (Abb.2) wurden je drei selbstgefertigte Signale in verschiedenen Höhen (1,5 m, 7,5 m, 15 m) dauerhaft montiert. Als Aufnahmekammer wurde eine UMK 10/1318 FF eingesetzt. Die Mehrfachaufnahmen pro Standpunkt dienen neben der stärkeren Verknüpfung gleichzeitig der Kammerkalibrierung /Wester-Ebbinghaus 1985b/. Die meisten Aufnahmen sind dabei um 30 gon nach oben geneigt (Abb.1). Im Hochaltarraum wurden zusätzlich zwei Aufnahmen um 80 gon nach oben geneigt. 6 Aufnahmen senkrecht nach oben im Mittelschiff verstärken den Zusammenschluß beider Seiten über die oberen Punkte an den Säulen.

Alle Aufnahmen wurden mit Zwangszentrierung und mit eingespielten Libellen ausgeführt. Die mit Zieltafeln signalisierten Stative sind dabei jeweils in den benachbarten Aufnahmen abgebildet und verstärken den Zusammenhalt des Blockes. Zur Stützung des Bildverbandes wurde ein geodätisches Netz in Form einer Raute angelegt (Abb.3).

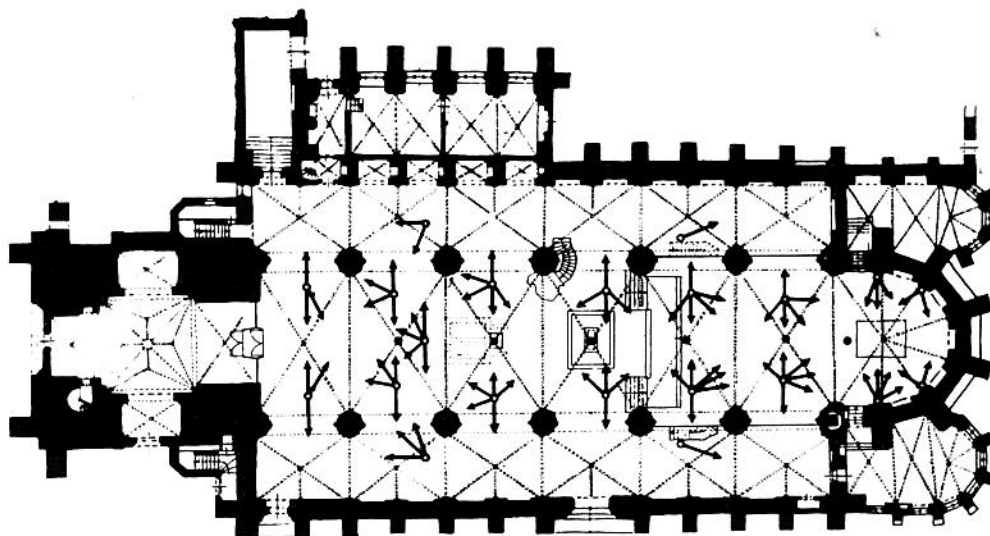


Abb.1: Aufnahmedisposition

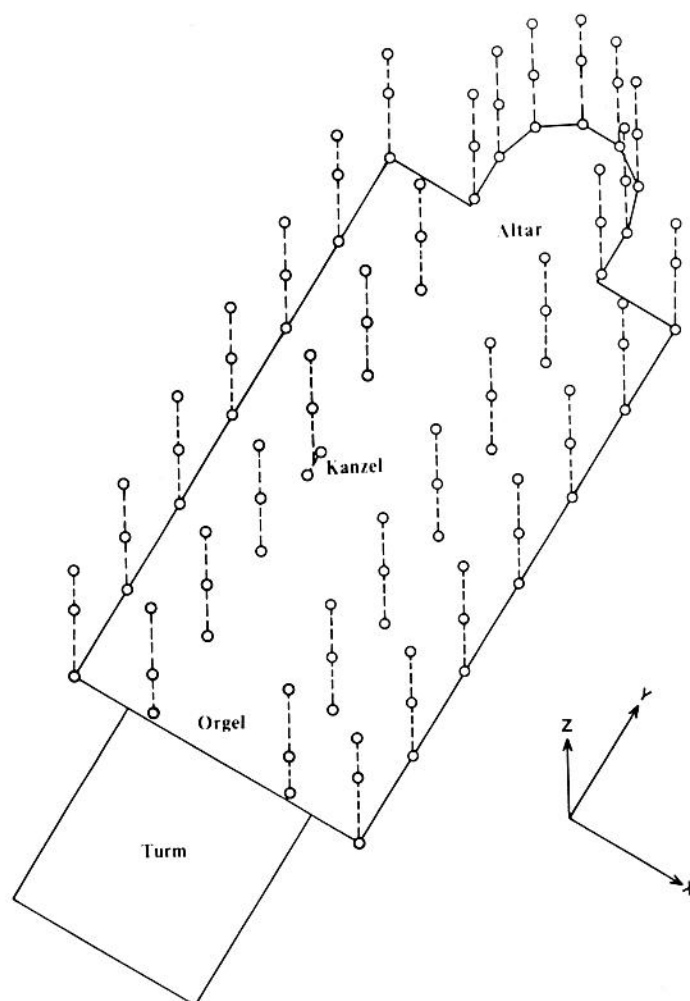


Abb.2: Punktverteilung

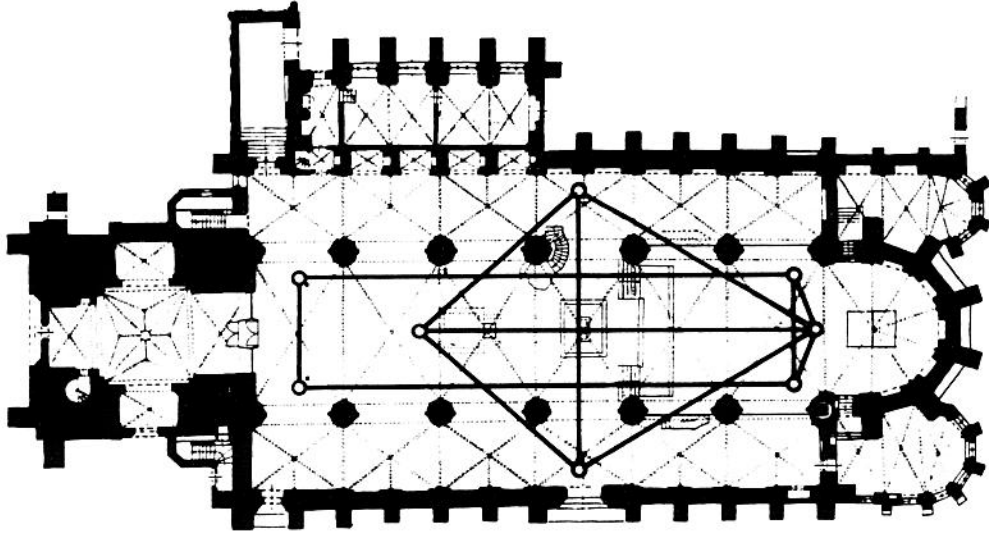


Abb.3: Geodätisches Netz

Mit diesen Rautenpunkten sind 8 signalisierte Punkte des photogrammetrischen Netzes in den Kirchenecken durch räumliche Vorwärtsschnitte verbunden. Des weiteren sind fünf Standpunkte der zwangszentrierten photogrammetrischen Aufnahmen an dieses Netz angeschlossen. Drei lokale Höhennetze sehr hoher Genauigkeit sichern die Horizontierung des Netzes. Ein Anschluß an Normalnull gibt den Höhenbezug. Die Streckenmessung erfolgte mit Invardrähten ohne Teilung /Gerigk 1970/, die Richtungsmessung mit zwei Zeiss-Elta-2-Stationen mit der dabei üblichen Stehachsfehlerkorrektur.

BILDMESSUNG

Die Messung der Bildkoordinaten der UMK-Aufnahmen erfolgte am ZEISS-Planicom C100, wobei nur ein Bildträger benutzt und alle Bilder an gleicher Position mit gleicher Orientierung in diesem Bildträger eingelegt wurden. Mit dieser Vorgehensweise wird die Kalibrierung des photogrammetrischen Aufnahme- und Auswertesystems in der Ausgleichung erleichtert. Ein in Hannover entwickeltes Meßprogramm B159 /Jacobsen 1984/ steuerte den Meßprozeß und beschleunigte die Auswertung durch automatisches Anfahren der Punkte beim zweiten Messungsdurchgang. Zusätzlich berücksichtigt dieses Programm eine verfeinerte Kalibrierung der Geometrie des Planicom durch Off-Line-Korrektur der Bildkoordinaten.

AUSWERTUNG UND ERGEBNISSE

Insgesamt standen zur Bestimmung der Objektpunkte und sonstigen Systemunbekannten folgende Meßinformationen zur Verfügung:

- Photogrammetrische Beobachtungen und Bedingungen:
 - 83 Meßbilder mit 884 Punktmessungen
 - Standpunktzentrierung bei Mehrfachaufnahmen

- in Nachbarbilder abgebildete Standpunkte
- Orientierungswinkel ω und κ (wegen eingespielter Libellen)
- Richtungsunterschiede ϕ bei mehreren Aufnahmen auf einem Standpunkt (Teilkreis abgelesen)
- Geodätische Meßinformationen:
 - 8 Schrägstrecken (Invardraht)
 - Höhenunterschied der Zwangszentrierung (± 0.2 mm)
 - Anschluß an NN
 - 8 Richtungssätze mit Stehachsfehlerkorrektur
 - 16 Zenitdistanzen.

Diese Meßinformationen wurden gemeinsam mit dem Programmsystem BINGO /Kruck 1984/ ausgeglichen.

Trotz sorgfältigen Einspielens der Libellen bei der photogrammetrischen Aufnahme waren die gewonnenen Neigungswinkel wegen zu großer Spannungen aus der Ausgleichung zu entfernen. Eine plausible Erklärung für diesen Umstand kann bisher nicht angegeben werden.

Die Zentrierungsgleichungen in der Form /Kruck 1983/

$$X_{ST} = X_O + R \cdot e' - i$$

- X_{ST} : Ortsvektor des Standpunktes
- X_O : Ortsvektor des Projektionszentrums
- R : Drehmatrix des Bildes: $R = R_\phi \cdot R_\omega \cdot R_\kappa$
- e' : Ortsvektor des Drehzentrums; definiert im Bildraum; tritt als zusätzliche Kammerunbekannte auf
- i : Instrumentenhöhe

verbinden mehrere Aufnahmen mit einem Standpunkt. Einen ähnlichen Ansatz benutzt Wester-Ebbinghaus/1985a/. Die im Programmsystem BINGO eingesetzte Methode der Varianzkomponentenschätzung /Kruck 1985/ konvergierte für diese Zentrierungen bei 0,6 mm; d.h. die Stabilität der Zwangszentrierung einer UMK FF auf dem zugehörigen Stativ ist mit ± 0.6 mm Abweichung von der Mittellage anzusetzen. Wegen des hohen Gewichtes der UMK ist dieses als ein gutes Ergebnis anzusehen.

Tabelle 1 zeigt die Anzahl der Gleichungen und die durchschnittliche Redundanz für jede Beobachtungsgruppe. Für die Bildmessungen wurde eine empirische Varianz von $s_o = \pm 2.8 \mu\text{m}$ ermittelt.

Die in die Ausgleichung eingeführten Beobachtungen für die 6 Kammerunbekannten e' , c' , x_H^1 und z_H^1 sind aufgrund des niedrig angesetzten Gewichts völlig redundant; ihre Werte sind wegen der gewählten Aufnahmeanordnung sehr gut durch den Block bestimmt (siehe Tab.2). Auch eine Berechnung ohne die Gleichungen für die Standpunktzentrierung ändert daran kaum etwas (Tab.2).

Die große Zahl von 21 Gleichungen für Paßpunkte resultiert hauptsächlich aus 6 zusätzlich eingeführten Hilfspunkten für die lokalen Höhennetze und die Höhenpaßpunkte, deren Lagekoordinaten durch zusätzliche Gleichungen festgehalten sind.

Tab.1: Redundanzen der einzelnen Beobachtungsgruppen

	Anzahl Gleichungen	Redundanz	durchschnittl. Redundanz
Bildkoordinaten	1768	994.2	0.56
Kammerdaten	6	6.0	1.00
Paßpunktkoordinaten	21	4.1	0.20
Koordinatenunterschiede u. Strecken	67	47.0	0.70
Richtungssätze	46	20.7	0.45
Zenitdistanzen	16	5.3	0.33
Standpunktzentrierungen	219	126.7	0.58

Tab.2: Daten der Aufnahmekammer für Fokuseinstellung 12 m

	Werks- angabe	Simultankalibrierung	
		mit Standpunktzentrierung	ohne Standpunktzentrierung
c' [mm]	100,23	100,237 5	100,236 8
x'_H	0,00	0,024 7	0,024 5
z'_H	0,00	0,004 7	0,004 1
$s_{c'}$ [μm]		\pm 1,4	\pm 1,6
$s_{x'_H}$		\pm 1,7	\pm 1,8
$s_{z'_H}$		\pm 1,8	\pm 2,0
$e_{x'}$ [m]		0,000 8	
$e_{y'}$		-0,058 2	
$e_{z'}$		0,000 0	
$s_{e_{x'}}$ [mm]		\pm 0,1	
$s_{e_{y'}}$		\pm 0,2	
$s_{e_{z'}}$		\pm 0,1	
zusätzliche Parameter		8	6

Die etwas niedrigeren Redundanzanteile für die Richtungen und Zenitdistanzen verdeutlichen, daß gerade diese Beobachtungen mit besonderer Sorgfalt auszuführen sind.

SCHLUSSBEMERKUNGEN

Durch die hier angewendete Simultankalibrierung wird - anders als bei einer Testfeldkalibrierung - das gesamte photogrammetrische System bestehend aus Kamera, photographischem Schichtträger einschließlich Entwicklungsprozeß und das Meßsystem kalibriert. Alle Kammerunbekannten konnten sehr genau bestimmt werden.

Eine photogrammetrische Aufnahme mit mehreren gegeneinander verschwenkten Bildern auf den einzelnen Standpunkten und zusätzlicher Berücksichtigung der Verknüpfungsgleichungen für die Standpunktzentrierung versteift den gesamten Block und ermöglicht eine simultane Kalibrierung der Kammer mit sehr hoher Genauigkeit.

Die Messung der nächsten Epoche wird klären, ob dieses schöne Bauwerk durch weitere Schäden bedroht ist und gezielt Maßnahmen zur Stabilisierung ergiffen werden müssen.

LITERATUR

Jacobsen, K.: Data Collection for Bundle Block Adjustment on Analytical Plotters. Presented Paper, ISPRS, Kommission III, Rio de Janeiro 1984.

Gerigk, H.U.: Längenmessung mit Drähten ohne Teilung. WA TUH Nr.40. Dissertation 1970.

Kruck, E.: Lösung großer Gleichungssysteme für photogrammetrische Blockausgleichungen mit erweitertem funktionalen Modell. WA TUH Nr.128. Dissertation 1983.

Kruck, E.: BINGO: Ein Bündelprogramm zur Simultanausgleichung für Ingenieur- anwendungen - Möglichkeiten und praktische Ergebnisse. Presented Paper, ISPRS, Kommission V, Rio de Janeiro 1984.

Kruck, E.: Kombinierte Ausgleichung mit Varianzkomponentenschätzung und Simultankalibrierung. Bonn 1985, Beitrag in diesem Heft.

Wester-Ebbinghaus, W.: Bündeltriangulation mit gemeinsamer Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Beobachtungen. Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 3 1985, S. 101-111.

Wester-Ebbinghaus, W.: Verfahren zur Feldkalibrierung von photogrammetrischen Aufnahmekammern im Nahbereich. Bonn 1985, Beitrag in diesem Heft.

WA TUH: Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover