

BINGO: Ein Bündelprogramm zur Simultanausgleichung für  
 Ingenieuranwendungen - Möglichkeiten und praktische  
 Ergebnisse -  
 BINGO: A Program for Bundle Adjustment for Engineering  
 Applications - Possibilities, Facilities and Practical  
 Results -  
 Erwin Kruck  
 Institute for Photogrammetry and Engineering Surveys  
 University of Hannover  
 Federal Republik of Germany  
 Commission V

### Abstract

To use bundle adjustment for engineering applications the mathematical model has been extended by functions of normal geodetic measurements. Also special circumstances of taking images enable the formulation of additional equations, for instance, when stator data for an exposure flight are available or a stereometric camera was used to take photographs. Data like these may improve the results of a bundle adjustment considerably. A rigorous adjustment of all measurements will facilitate the error detection, particularly for geodetic measurements. A new method for sorting and solving the normal equation system will enable the simultaneous processing of geodetic and photogrammetric measurements without disadvantages for the calculation efficiency.

### 1. Einführung

Ein universelles Programm zur Ausgleichung kombinierter photogrammetrisch-geodätischer Netze kann die Einsatzmöglichkeiten der Photogrammetrie besonders im Nahbereich erheblich verbessern. Durch eine konsequente Nutzung aller Informationen, die sich z.B. aus der Aufnahmedisposition, aus den verwendeten Kammern oder aus dem Objekt selbst ergeben, kann dabei durch einen entsprechenden funktionalen Ansatz die Überbestimmung des Netzes verbessert bzw. der Aufwand zur Bestimmung von Paßpunkten verringert werden. Die gemeinsame Ausgleichung aller Meßinformationen berücksichtigt die (ansonsten vernachlässigte) Korrelation zwischen den Paßpunkten, verbessert die innere Zuverlässigkeit des Netzes und erleichtert somit die Suche nach kleinen groben Datenfehlern und steigert die Genauigkeit der Resultate. Daß bei so vielen Vorteilen nicht regelmäßig eine kombinierte Ausgleichung durchgeführt wird, liegt wohl nur daran, daß entsprechende Programme rar sind.

Mit BINGO (Bündelausgleichung für Ingenieurobjekte) wird ein operationelles Programm verfügbar, das ein umfangreiches funktionales Modell realisiert.

### 2. Funktionales Modell

#### 2.1 Kollinearitätsgleichungen und zusätzliche Parameter

Die Bildmessungen werden wie üblich durch die Kollinearitätsgleichungen in die Ausgleichung eingeführt. Da ein Bezug zwischen den Orientierungswinkeln der Aufnahme und geodätisch gemessenen Orientierungswinkeln hergestellt werden soll, muß der Ansatz für den terrestrischen Aufnahme-fall lauten:

$$X_i - X_0 = \lambda_i \cdot R_\phi \cdot R_\omega \cdot R_\kappa \cdot (x'_i - x'_H) \quad (1)$$

mit

$X_i$	Ortsvektor eines Objektpunktes
$X_0$	Ortsvektor des Projektionszentrums
$\lambda_i$	Maßstabsfaktor des Objektpunktes
$R_\phi \cdot R_\omega \cdot R_\kappa$	Drehmatrix vom Objektraum in den Bildraum
$x'_i$	Bildkoordinaten des Objektpunktes $(x', c, z')^T$
$x'_H$	Ablage des Hauptpunktes vom Schnittpunkt der Rahmenmarkenverbindungslinien

Für den Luftbildaufnahme-fall ist ein gesonderter Ansatz mit anderen Drehmatrizen und anderem Bildvektor erforderlich. BINGO unterscheidet daher zwischen terrestrischen Aufnahmen und Luftbildern. Eine ausführliche Darstellung dieser Gleichungen ist z.B. bei E. Kruck /1983/ gegeben. Punkte unterschiedlicher Ansprechgenauigkeit (z.B. signalisierte Punkte, natürliche Punkte) können zu Gruppen zusammengefaßt und mit unterschiedlichen Gewichten versehen werden.

Die Berücksichtigung systematischer Bildfehler ist durch einen 24-Parameter-Ansatz nach Jacobsen /1980/ gegeben. Die nichtrelevanten Parameter werden dabei vom Programm BINGO erkannt und automatisch eliminiert.

## 2.2 Geodätische Messungen im Objektraum

Jede einzelne Messung kann mit einem gesonderten Gewicht versehen in die Ausgleichung eingeführt werden. Das Gewicht wird aus den a priori Standardabweichungen der Beobachtungen bestimmt. Folgende Beobachtungsarten können verarbeitet werden:

- Koordinaten und Koordinatenunterschiede (auch separat für x, y und z)
- Horizontal- und Raumstrecken
- Azimute, Zenitdistanzen und Richtungssätze.

Für die Zenitdistanzen wird die Erdkrümmung und ein Refraktionskoeffizient von 0.13 berücksichtigt. Die Orientierungsunbekannten der Richtungssätze werden als zusätzliche Unbekannte in der Ausgleichung mitgeführt.

## 2.3 Beobachtungen und Bedingungen der äußeren Orientierung

In vielen praktischen Anwendungsfällen bietet die Aufnahmedisposition die Möglichkeit zur Formulierung zusätzlicher Gleichungen, die dann mit teils großem Gewinn an Genauigkeit und Zuverlässigkeit in die Ausgleichung einbezogen werden können. Da diese Zusatzinformationen ohne örtlichen Messungsaufwand gewonnen werden, andererseits aber den Aufwand zur Bestimmung von Paßpunkten vermindern können, ist ihre Berücksichtigung auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sehr interessant.

### 2.3.1 Zentrierung und Orientierung auf einem festen Standpunkt

Aufnahmen mit Phototheodoliten auf bekannten Standpunkten erlauben die Formulierung von Verknüpfungsgleichungen zwischen dem Standpunkt und dem Projektionszentrum. Ebenso können Beziehungen zwischen den Winkeln  $\phi$ ,  $\omega$  und  $\kappa$  der äußeren Orientierung und den Libellenachsen des Theodoliten angegeben werden. Diese Beziehungen sind ausführlich von B. Wrobel und K.-H. Ellenbeck /1976/ dargestellt worden. Für den Fall der sich in einem festen Punkt schneidenden Drehachsen (z.B. bei WILD P31 und JENOPTIK UMK mit Glasplatte) sind die Beziehungen

$$\mathbf{X}_{ST} = \mathbf{X}_O + \mathbf{R} \cdot \mathbf{e}' - \mathbf{i} \quad (2)$$

und

$$\varphi_{ST} = \varphi + \delta$$

mit

- $\mathbf{X}_{ST}$  Ortsvektor des Standpunktes
- $\mathbf{X}_O$  Ortsvektor des Projektionszentrums
- $\mathbf{e}'$  Exzentrizitätsvektor vom Projektionszentrum zum Schnittpunkt der Drehachsen
- $\mathbf{i}$  Höhe des Drehachsenschnittpunktes über dem Standpunkt
- $\varphi_{St}$  gemessene Winkel der äußeren Orientierung
- $\delta$  Winkel der Nichtparallelität zwischen Aufnahme-richtung und  $\varphi_{ST}$

in BINGO realisiert. In sehr vielen Fällen lassen sich diese Gleichungen auch für Aufnahmekammern mit Drehachsen, die sich nicht in einem festen Punkt schneiden, einsetzen. Es gibt dann jedoch - je nach Bauart - Beschränkungen für die Veränderung der Winkel  $\omega$  oder  $\kappa$ . Werden mehrere Bilder auf einem Standpunkt aufgenommen, ist es nicht erforderlich, die Vektoren  $\mathbf{e}'$  und  $\delta$  zu kennen, sondern es wird in der Ausgleichung nur die Konstanz dieser Werte gefordert.

### 2.3.2 Stereoaufnahmebedingungen

Die festen Beziehungen bei synchron ausgelösten Aufnahmen mit Stereokammern ermöglichen anhand von (2) und (3) die Formulierung der relativen Beziehungen eines Stereobildpaares:

$$\mathbf{X}_{O,A} + \mathbf{R}_A \cdot \mathbf{e}'_A = \mathbf{X}_{O,B} + \mathbf{R}_B \cdot \mathbf{e}'_B \quad (4)$$

$$\varphi_A + \delta_A = \varphi_B + \delta_B \quad (5)$$

Pro Bildpaar können somit 6 Gleichungen aufgestellt werden. Die Zuverlässigkeit der Messungen kann auf diese Weise deutlich verbessert werden, wie M. Behmann /1981/ nachweist. Ein Ansatz nach G. Hell /1979/, der neben der Konstanz der relativen Winkelbeziehungen nur die Berücksichtigung der Basislänge zulässt, ist dagegen weniger effektiv. Die linearen Beziehungen für (4) und (5) sind bei E. Kruck /1983/ hergeleitet.

### 2.3.3 Koordinatenunterschiede zwischen Aufnahmezentren

In besonderen Fällen können direkt Koordinatenunterschiede zwischen den Aufnahmezentren gemessen sein, wie folgende zwei praktisch durchgeführte Beispiele zeigen:

- Nivellement zwischen zwei für die Aufnahme vorbereiteten Stationen mit aufgebautem Dreifuß. Der gemessene Höhenunterschied entspricht bei identischen Orientierungswinkel  $\omega$  und  $\kappa$  dem Höhenunterschied der Projektionszentren.
- Bei der Aufnahme kleiner Objekte kann die Kammer fest auf einen Schlitten (mit Maßstab) montiert werden, der nur in einer Richtung beweglich ist. Wählt man das Koordinatensystem so, daß die Koordinatenrichtung  $x$  parallel zur Bewegungsrichtung des Schlittens verläuft, so erhält man für alle zugehörigen Aufnahmen die Koordinatenunterschiede  $\Delta y = \Delta z = 0$  und  $\Delta x = x_{i+1} - x_i$ .

Eine weitere mögliche Anwendung ist die Berücksichtigung von Stoskopdaten in der Aerotriangulation.

### 2.4 Daten der Kammerkalibrierung

Die Kammerdaten  $e'$  und  $\delta$  sowie die Kammerkonstante und die Hauptpunktslage werden - soweit erforderlich - als Unbekannte in die Ausgleichung eingeführt. Liegen Kalibrierungsdaten für diese Unbekannten vor, so können Beobachtungsgleichungen aufgestellt und mit einem der Genauigkeit entsprechenden Gewicht in die Ausgleichung eingeführt werden.

## 3. Programmaufbau und Programmfunktionen

Für die Datenvorverarbeitung konnten wesentliche Bestandteile des Programmpaketes BLUH (Blockausgleichungsprogramm der Universität Hannover) /K. Jacobsen 1980/ genutzt werden. Das Programm BLO001 bearbeitet und sortiert die Bildmessungen, und das Programm TEOR berechnet die Näherungswerte der Bildorientierungen für Luftbilder (Abb. 1). Die iterative Ausgleichung wird in BINGO durchgeführt.

Trotz der umfangreichen Verarbeitungsmöglichkeiten mit BINGO war eine wesentliche Forderung, die Eingabe der Daten einfach und übersichtlich zu halten und umfangreiche Plausibilitätskontrollen für die eingegebenen Daten auszuführen, damit auch ein weniger geübter Anwender keine verfälschten Ergebnisse aufgrund unkorrekter Eingabe erhalten kann. Die Eingabesätze (z.B. Lochkarten) sind daher mit Schlüsselworten versehen worden, die das Programm interpretiert. Eine bestimmte Reihenfolge für die Eingabesätze ist nicht vorgeschrieben. Aufgrund der besonderen Rechner-situation im RRZN (Regionales Rechenzentrum für Niedersachsen) ist BINGO als Batch-Programm angelegt. Programmiersprache ist Fortran 5. Das Programm ist unter Berücksichtigung der strukturierten Programmierung entwickelt und besitzt einen modularen Aufbau mit 32 Unterprogrammen. Daher ist das Programm auch auf kleineren Rechnern lauffähig. Ausgleichungsprinzip ist die Methode der kleinsten Quadrate. Zur Gleichungslösung wird eine neue Methode auf der Grundlage einer direkten Cholesky-Faktorisierung angewendet /E. Kruck 1984/, die auch für sehr große Blöcke die Berechnung wichtiger Teile der Inversen der Normalgleichungsmatrix und die Berechnung der Redundanzanteile für alle Beobachtungen zuläßt.

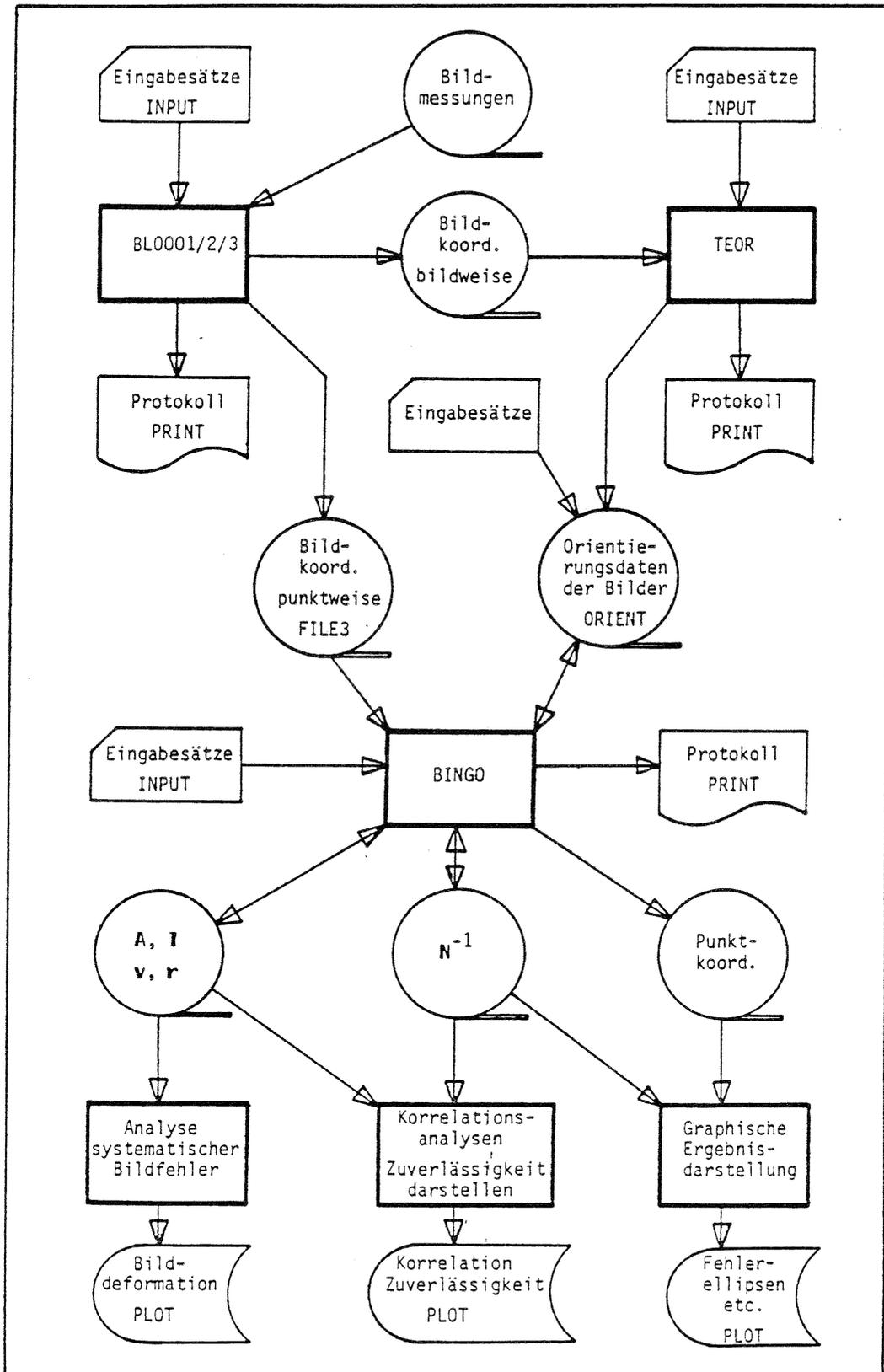


Abb. 1: BLUH/BINGO Datenflußplan

Damit wird die Suche nach kleinen groben Datenfehlern erleichtert (Data Snooping /W. Baarda 1968/) und eine Abschätzung der Relation der Gewichte der unterschiedlichen Datengruppen ermöglicht (a posteriori Varianzschätzung /W. Welsch 1980/). BINGO bietet diese Möglichkeiten optional.

#### 4. Anwendungsbeispiele

##### 4.1 Bündelblock Hamburg Hauptbahnhof

Zwei praktische Beispiele sollen kurz die Einsatzmöglichkeiten von BINGO für die Nahbereichsphotogrammetrie aufzeigen. Der Block 'Hamburg Hauptbahnhof' erfaßt einen Teil der historischen Fassade des Bahnhofes. Ziel dieser Aufnahmen war eine Fassadenkartierung im Maßstab 1 : 25 als Arbeitsgrundlage für Umbauarbeiten. Durch eine Bündeltriangulation erfolgte eine Paßpunktverdichtung. Jede der in Abb. 2 gezeigten 12 Aufnahmen wurde doppelt ausgeführt. Die Aufnahmerichtungen wurden zur Genauigkeitssteigerung dabei jeweils um einige wenige gon in  $\phi$  verdreht.

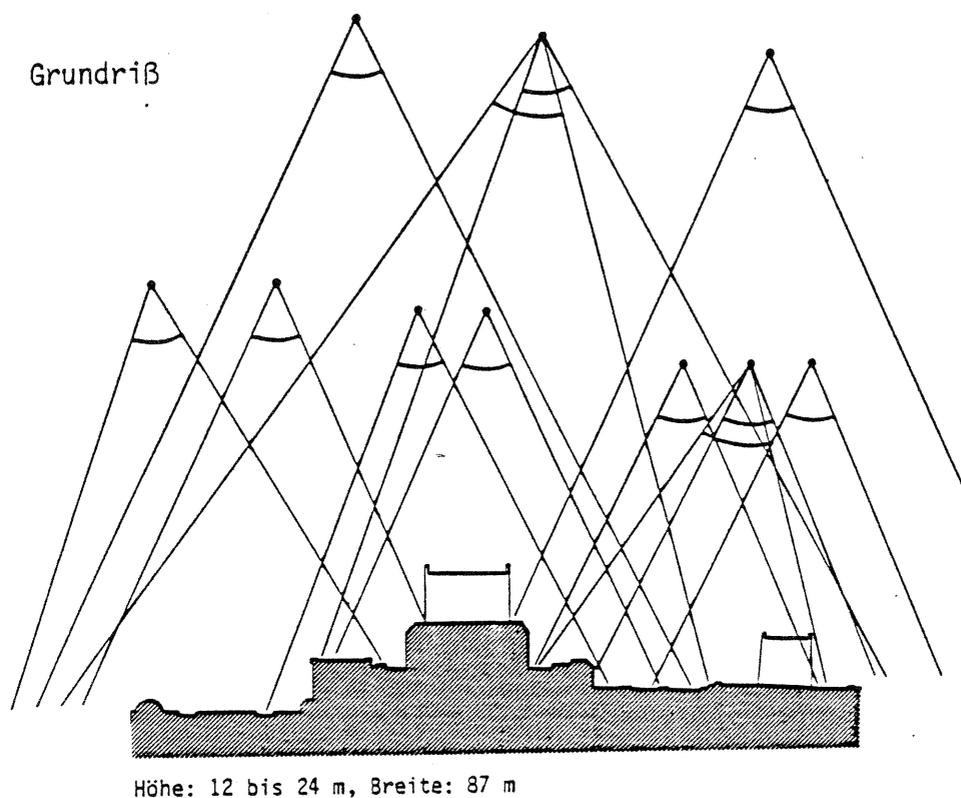


Abb. 2: Aufnahmedisposition 'Hamburg Hauptbahnhof'

Bei dieser Aufnahmeanordnung bietet sich eine Verknüpfung der doppelt aufgenommenen Bilder mit einem (hier unbekanntem) Standpunkt an. Bei zwei Standpunkten (siehe Abb. 2) konnten je 4 Aufnahmen durch Gleichung (2) in Beziehung gesetzt werden. Bei allen Bildern wurde die Libelle des PHOTHEO 19/1318 von JENOPTIK für den Winkel  $\omega$  eingespielt, und bei 16 Aufnahmen auch für den Winkel  $\kappa$ . 8 Aufnahmen wurden mit versetztem Hauptpunkt ausgeführt, so daß zwei verschiedene Kammern zu berücksichtigen sind.

An Beobachtungsgleichungen werden gewonnen:

- 16 + 24 Winkelbeobachtungen  $\omega$  und  $\kappa$  nach (3)
- 24 x 3 Standpunktzentrierungen nach (2)
- 2 x 6 Kalibrierungsgleichungen (Kapitel 2.4)

Folgende Unbekannte treten zusätzlich auf:

- 2 x 6 Kammerunbekannte  $e'$  und  $\delta$

Insgesamt wurden somit für 438 Unbekannte 82 Freiheitsgrade gewonnen.

#### 4.2 Block 'Kühlturm'

Ein weiteres interessantes Beispiel stellt die kombinierte Ausgleichung für einen Kühlturm dar. Die erste Ausgleichung zur Formkontrolle dieses 162 m hohen Naturzug-Stahlbeton-Kühlturms wurde durch Paßpunkte gestützt /E. Kruck, B. Wrobel 1982/. Hier wird beispielhaft die Ausgleichung der photogrammetrischen Beobachtungen gemeinsam mit dem eigens für diesen Vermessungszweck angelegten Kühlturmnetz gezeigt. Abbildung 3 zeigt das Grundnetz mit dem angeschlossenen Ringpolygon und dem Kühlturm in der Mitte.

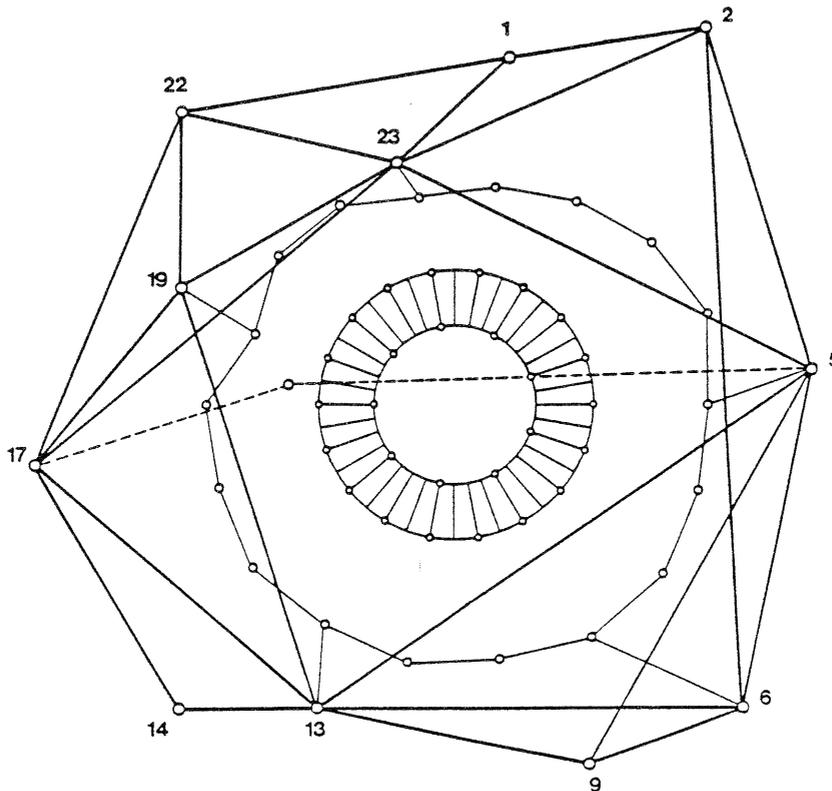


Abb. 3: Kühlturmnetz

Die Beobachtungen der Paßpunkte am Kühlturm sind in dieser Abbildung nicht dargestellt. Abbildung 4 zeigt die Aufnahmedisposition. Es wurden 18 Bildstreifen mit je 6 Aufnahmen rund um den Kühlturm geflogen.

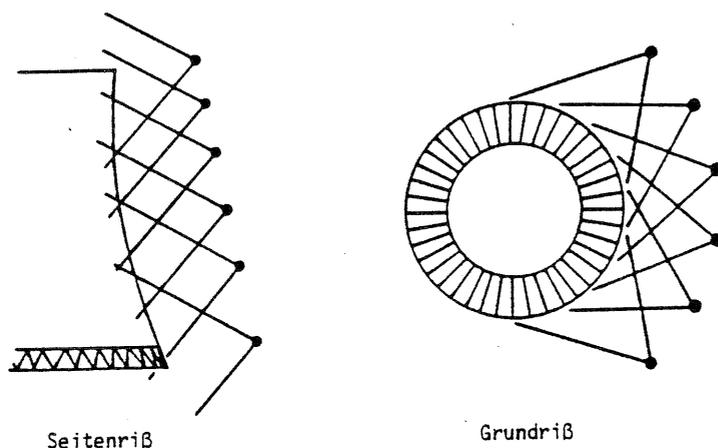


Abb. 4: Aufnahmedisposition 'Kühlturm'

Die kombinierte Ausgleichung umfaßt:

- 52 Strecken
- 220 Richtungen in 41 Richtungssätzen
- 88 Zenitdistanzen
- 31 Nivellierte Höhenunterschiede
- 6 Koordinaten (Punkte 5 und 17)
- 8341 Bildkoordinatenpaare  $x'$ ,  $z'$
  
- 648 Orientierungsunbekannte der 108 Bilder
- 1998 Koordinatenunbekannte für 666 Punkte
- 41 Orientierungsunbekannte der Richtungssätze
- 6 Kammerunbekannte (Kammerkonstante, Hauptpunkt und drei zusätzliche Parameter)

Die Genauigkeit bei der vorangegangenen Ausgleichung mit Paßpunkten zeigte einen Genauigkeitsabfall vom unteren zum oberen Kühlturmrand von 2,4 auf 4 mm. Bei der kombinierten Ausgleichung ist die Genauigkeit über den gesamten Bereich homogen und beträgt 2,4 mm.

Abbildung 5 zeigt die Matrizenstruktur der Normalgleichungsmatrix, die bei ringförmiger Numerierung der Bilder und Anwendung der neuen Ordnungsprinzipien /E. Kruck 1984/ entsteht. Deutlich wird die Verknüpfung der Ringe untereinander durch die parallel zur Diagonalen verlaufenden Bänder dargestellt.

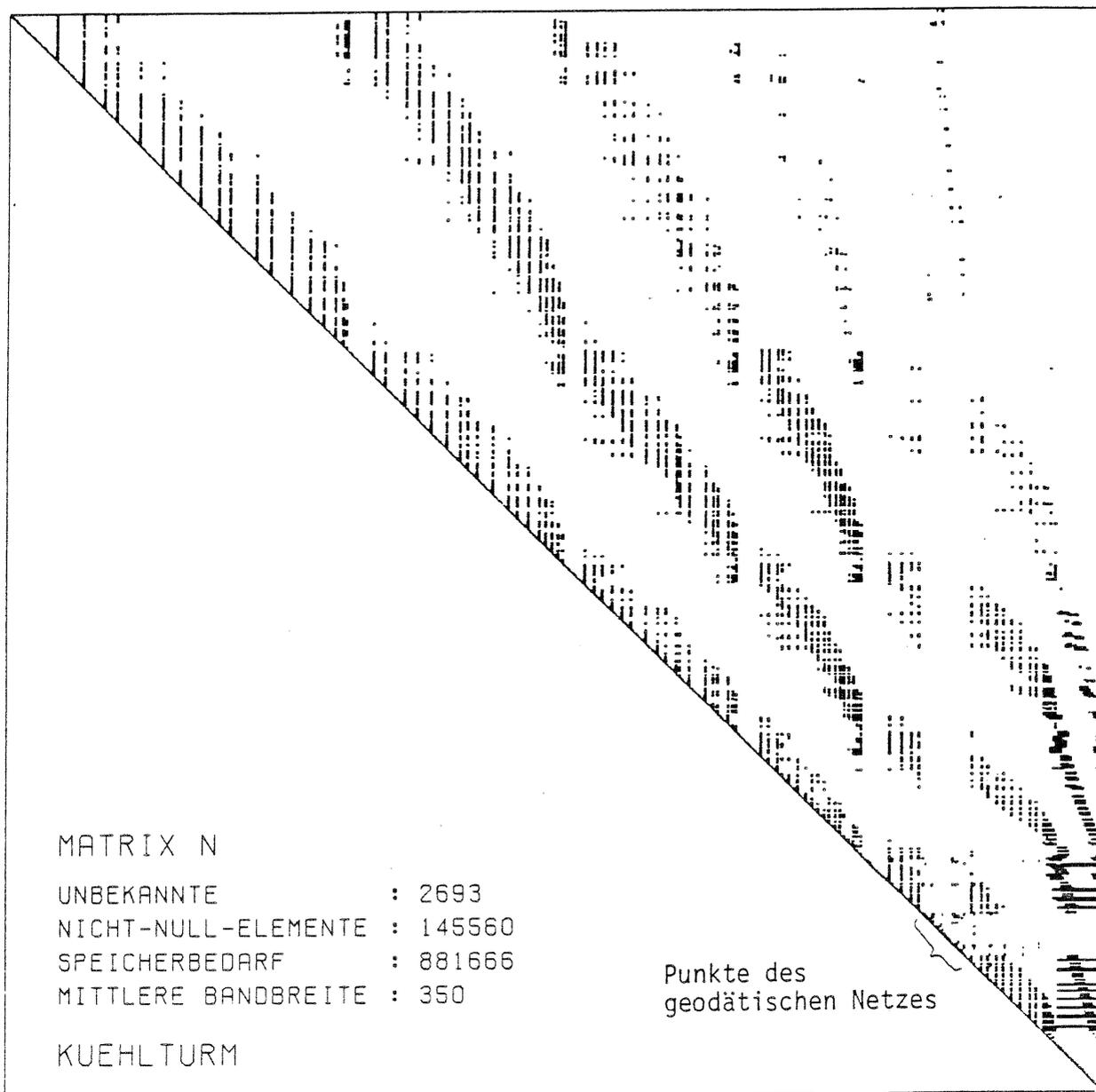


Abb. 5: Matrizenstruktur der Normalgleichungsmatrix für den Block 'Kühlturm'

##### 5. Schlußbemerkungen und Ausblick

Obwohl BINGO ursprünglich für die Nahbereichsphotogrammetrie entwickelt wurde, stellt es heute gleichzeitig ein operationelles Programm zur Ausgleichung großer Standard-Luftbildverbände dar und bietet darüber hinaus - auch für Blöcke mit 10 000 und mehr Unbekannten - die Möglichkeit zur Berechnung von Teilen der Inversen der Normalgleichungsmatrix und der Redundanzanteile für alle Beobachtungen, ohne die Rechenzeit sehr stark zu erhöhen.

Durch die Anwendung der neuen Verarbeitungsprinzipien bei der Gleichungslösung erreicht das Programm auf Vektorrechnern sehr hohe Rechengeschwindigkeiten. Der modulare Aufbau ermöglicht den Einsatz auf kleineren

Rechnern. Derzeit wird die Implementierung auf HP 1000- und PDP 11/23-Rechnern vorbereitet. Durch einen Datenaustausch mit der Grundsoftware, die mit den genannten Rechnern einen analytischen Plotter steuern (ZEISS: Planicomp, KERN: DSR 1) könnten die gewonnenen Orientierungsdaten direkt für weitere Auswertungen genutzt werden.

Um weitere Anwendungsmöglichkeiten zu schaffen, ist die Erweiterung des Programms vorgesehen. Es sollen Winkel-, Geraden- und Ebenenbedingungen eingeführt werden.

### Literatur

- Behmann, M.: Bündelblockausgleichung mit den Bedingungen einer Stereomeßkamera zur Aufmessung von Fassaden. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Hannover 1981
- Hell, G.: Terrestrische Bildtriangulation mit Berücksichtigung zusätzlicher Beobachtungen. DGK Reihe C, Nr. 252, München 1979
- Jacobsen, K.: Vorschläge zur Konzeption und zur Bearbeitung von Bündelblockausgleichungen. WA TUH Nr. 102, Hannover 1980
- Kruck, E.: Lösung großer Gleichungssysteme für photogrammetrische Blockausgleichungen mit erweitertem funktionalen Modell. WA TUH Nr. 128, Hannover 1983
- Kruck, E.: Ordnungs- und Lösungsmethode für die Simultanausgleichung großer photogrammetrisch-geodätischer Netze. Presented Paper, ISPRS, Commission III, Rio de Janeiro 1984
- Kruck, E. u. Wrobel, B.: Photogrammetrische Formkontrolle von Kühltürmen. Presented Paper FIG - Commission 6, Budapest 1982
- Welsch, W.: A Posteriori Varianzschätzung im erweiterten Ausgleichungsmodell nach der Methode der kleinsten Quadrate. Beitrag in: Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung. Herausgeber H. Pelzer. Wittwer Verlag, Stuttgart 1980
- Wrobel, B. u. Ellenbeck, K.-H.: Terrestrisch-photogrammetrische Punktbestimmung durch Simultanausgleichung gemessener Orientierungsdaten und Bildkoordinaten in der Bündelblockausgleichung. Presented Paper, ISP Commission V, Helsinki 1976

### Abkürzungen

- DGK Deutsche Geodätische Kommission
- WA TUH Wissenschaftliche Arbeiten der Universität Hannover