

KOMBINIERTE AUSGLEICHUNG MIT VARIANZKOMPONENTENSCHÄTZUNG
UND SIMULTANKALIBRIERUNG

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

KOMBINIERTE AUSGLEICHUNG MIT VARIANZKOMPONENTENSCHÄTZUNG UND SIMULTANKALIBRIERUNG

E. Kruck
Universität Hannover

EINFÜHRUNG

Ingenieuranwendungen der Photogrammetrie erfordern in besonderem Maße eine sorgfältige Kontrolle darüber, ob das gewählte mathematische Modell der Ausgleichung hinreichend gut mit der Wirklichkeit übereinstimmt. Wie noch gezeigt wird, ist die einzige Möglichkeit einer vollständigen Kontrolle durch einen Verarbeitungsprozeß gegeben, in dem geodätische und photogrammetrische Beobachtungen gemeinsam ausgeglichen werden (kombinierte Ausgleichung /Ebner 1984/). In diesem Prozeß ist auch die Geometrie der photogrammetrischen Abbildung und Koordinatengewinnung - gegebenenfalls unter Einbeziehung von Vorinformationen - mit zu bestimmen. Eine solche Simultankalibrierung /Wester-Ebbinghaus 1985/ erfaßt den Zustand des photogrammetrischen Systems bestehend aus Atmosphäre, Kamera, Film - einschließlich Verarbeitungsprozeß - und Meßsystem zum aktuellen Zeitpunkt der Benutzung.

Besonders bei größeren Blöcken beeinflußt das stochastische Modell mit dem Ansatz der Standardabweichungen a priori und den daraus resultierenden Beobachtungsgewichten das Ausgleichungsergebnis deutlich.

Mit Hilfe der Varianzkomponentenschätzung lassen sich die empirischen Standardabweichungen a priori und a posteriori gruppenweise in Einklang bringen. Am Beispiel eines Netzes zur Überwachung von Böschungsbewegungen der Rheinischen Braunkohlenwerke AG in Köln werden Probleme aufgezeigt und die Möglichkeiten eines modernen photogrammetrisch-geodätischen Ausgleichungsprogramms vorgestellt.

VARIANZKOMPONENTENSCHÄTZUNG

Einen guten Überblick über die Methoden zur Varianzkomponentenschätzung gibt z.B. Welsch /1980/. Die hier verwendete Methode beruht auf einem Vorschlag von Förstner /1979/. Um dem Leser das Nachschlagen zu ersparen, werden hier kurz die Prinzipien wiedergegeben:

Die empirische Standardabweichung einer Ausgleichung berechnet sich aus

$$s_o^2 = \mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} / r \quad (1)$$

$$r = n - u \quad (2)$$

wobei r die Anzahl der Freiheitsgrade des Netzes darstellt. Entsprechend kann für eine Gruppe von Beobachtungen - z.B. für alle Strecken - angesetzt werden:

$$s_{oG}^2 = \mathbf{v}_G^T \mathbf{P}_G \mathbf{v}_G / r_G \quad (3)$$

r_G berechnet sich dabei aus der Summe der Redundanzanteile für die Beobachtungen dieser Gruppe:

$$r_G = \sum r_i \quad (4)$$

mit

$$r = \text{diag}((Q_{11} - AN^{-1}A^T)P_{11}) . \quad (5)$$

Wenn unabhängige Beobachtungen vorliegen, wird von dem Matrizenprodukt $AN^{-1}A^T$ nur die Diagonale benötigt. In diesem Fall ist es nur erforderlich, von N^{-1} diejenigen Elemente zu kennen, die auch in der Normalgleichungsmatrix N von Null verschieden sind. Die für große Blöcke unmögliche vollständige Inversion der Normalgleichungsmatrix kann so vermieden werden.

Für jede Gruppe wird die nach (3) berechnete Standardabweichung s_{OG} a posteriori verglichen mit dem Ansatz s_{OG} a priori. Bei hinreichender Überbestimmung wird s_{OG} a priori solange verändert, bis Übereinstimmung erreicht ist.

$$\frac{s_{OG} \text{ a priori}}{s_{OG} \text{ a posteriori}} \Rightarrow 1.0 \quad (6)$$

Obwohl es sich hierbei um eine Näherungsmethode handelt, ist die Schätzung im Konvergenzpunkt (Quotient = 1.0) erwartungstreu.

Durch eine zusätzliche Betrachtung der Häufigkeitsfunktionen der Verbesserungen v_G der Beobachtungsgruppen wird eine Trennung zwischen Gewichtsfehlern und Beobachtungsfehlern möglich.

BEOBACHTUNGSOBJEKT UND NETZANLAGE

Die in Abb.1 gezeigte etwa 5 km lange und bis zu 130 m hohe Endböschung eines Tagebaus wird regelmäßig dreimal im Jahr befliegen /Reichenbach u. Schäfer 1985/. Ein Teil des Vorgeländes und die benachbarte Kippe sind in die Überwachung einbezogen. Abb.1 zeigt die gewählte Bildfluganordnung der Epoche 3. Die Pfeile an den Enden der Bildstreifen sollen andeuten, daß jeder Streifen auch in Gegenrichtung befliegen wurde. Ein großräumiges Netz (Abb.2) mit Punkten außerhalb des Bereichs möglicher Bodenbewegungen wird in größeren Zeitabständen beobachtet und sichert die Vergleichbarkeit der verschiedenen Messungsepochen. Zeitgleich mit der jeweiligen Befliegung wird in jeder Epoche ein Verdichtungsnetz (Abb.3) beobachtet, das den photogrammetrischen Block stützt. Dieses Verdichtungsnetz ist an vier Punkten mit dem übergeordneten Netz verbunden. Beide geodätischen Netze sind als fast reine Streckennetze angelegt.

Die in Abb.1 gezeigte Befliegungsanordnung mit 20 % Quer- und 60 % Längsüberdeckung mit zusätzlichen Flugstreifen quer zur Flugrichtung und in Gegenrichtung ergibt eine vierfache Überdeckung des Gebietes mit Modellen. Diese Anordnung wurde

ab Epoche 6 geändert in eine Anordnung mit 60 % Längs- und Querüberdeckung und zusätzlicher Querbefliegung (Abb.4). Auch diese Anordnung ergibt eine vierfache Überdeckung des Gebietes mit Modellen. Für die nachfolgenden Betrachtungen werden hauptsächlich diese beiden Epochen 3 und 6 herangezogen. Sie unterscheiden sich auch hinsichtlich der Anzahl der gemessenen Höhenpaßpunkte und der Genauigkeit der Bildkoordinatenmessung. Außerdem enthält Epoche 6 ein zusätzliches Testfeld zur Kammerkalibrierung /Kupfer u.a. 1985/. Bei einer Flughöhe von etwa 1 100 m über NN und einer Weitwinkelkammer mit einer Brennweite von $c = 153 \text{ mm}$ beträgt der mittlere Bildmaßstab etwa $m_b = 7000$.

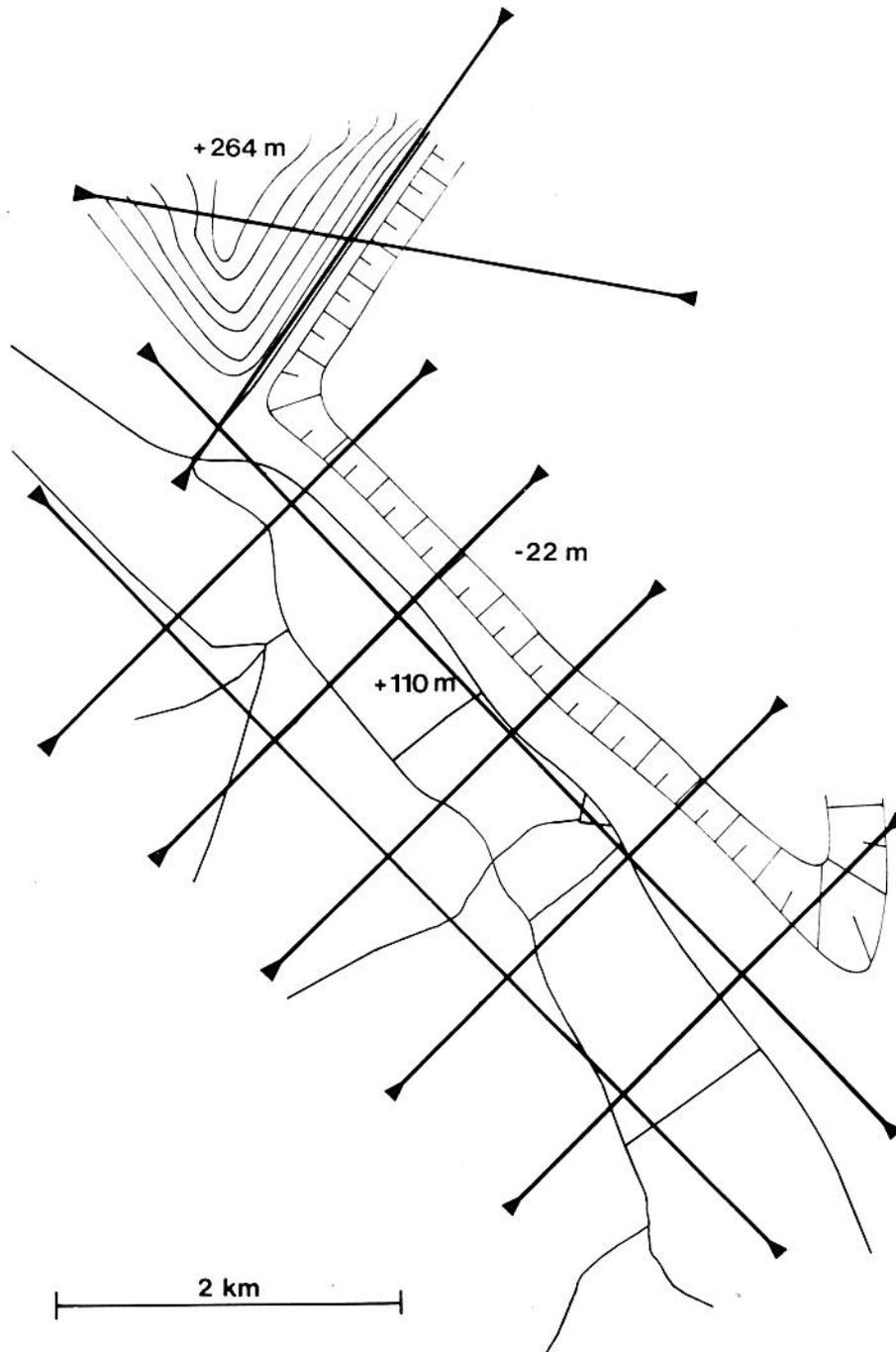


Abb.1: Beobachtungsgebiet mit Bildflugstreifen

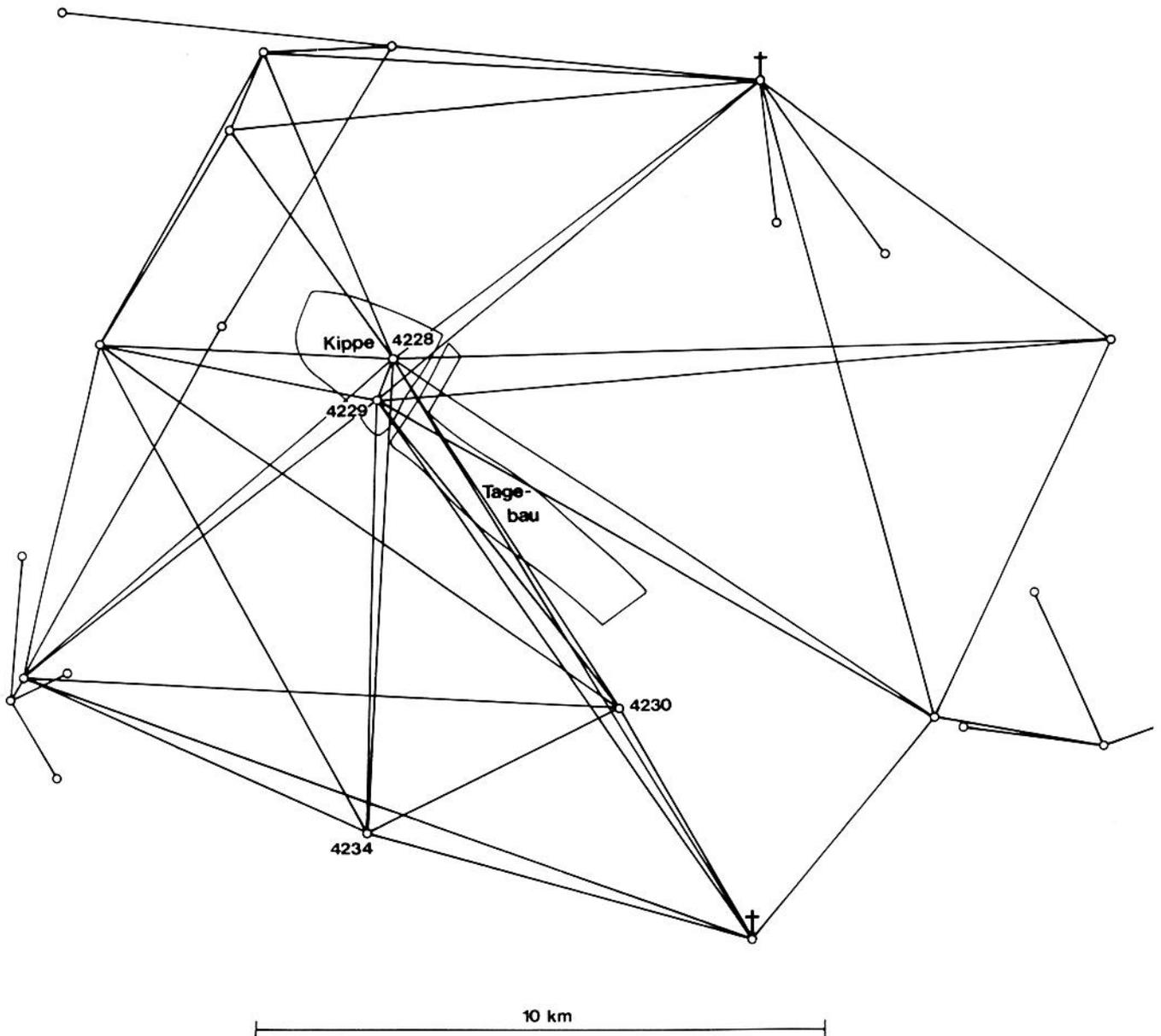


Abb.2: Übergeordnetes Netz mit Punkten außerhalb des Bereichs möglicher Bodenbewegungen

AUSGLEICHUNG

Die geodätischen Messungen wurden bei den Rheinischen Braunkohlenwerken AG in einem ersten Schritt für sich ausgeglichen und die so gewonnenen Koordinaten als Paßpunkte in das Bündelausgleichungsprogramm PAT B eingeführt. Dabei traten in Epoche 3 Spannungen an den Paßpunkten bis zu 6 cm auf. Diese Spannungen stehen im Widerspruch zur sehr genauen Messung der genannten geodätischen Netze.

Daraufhin wurde in Hannover eine Ausgleichung mit **BINGO** (Bündelausgleichung für Ingenieurobjekte) /Kruck 1983/ durchgeführt. Einige wichtige Leistungsmerkmale des Programmsystems BINGO sind im Anhang kurz genannt. Alle geodätischen Meßinformationen der beiden in Abb.2 und 3 gezeigten Netze und die Bildmessungen von 107 Meßbildern wurden mit simultaner Kammerkalibrierung gemeinsam ausgeglichen (siehe auch /Zinndorf 1985/). Nach dieser Ausgleichung betrugen die größten Verbesserungen

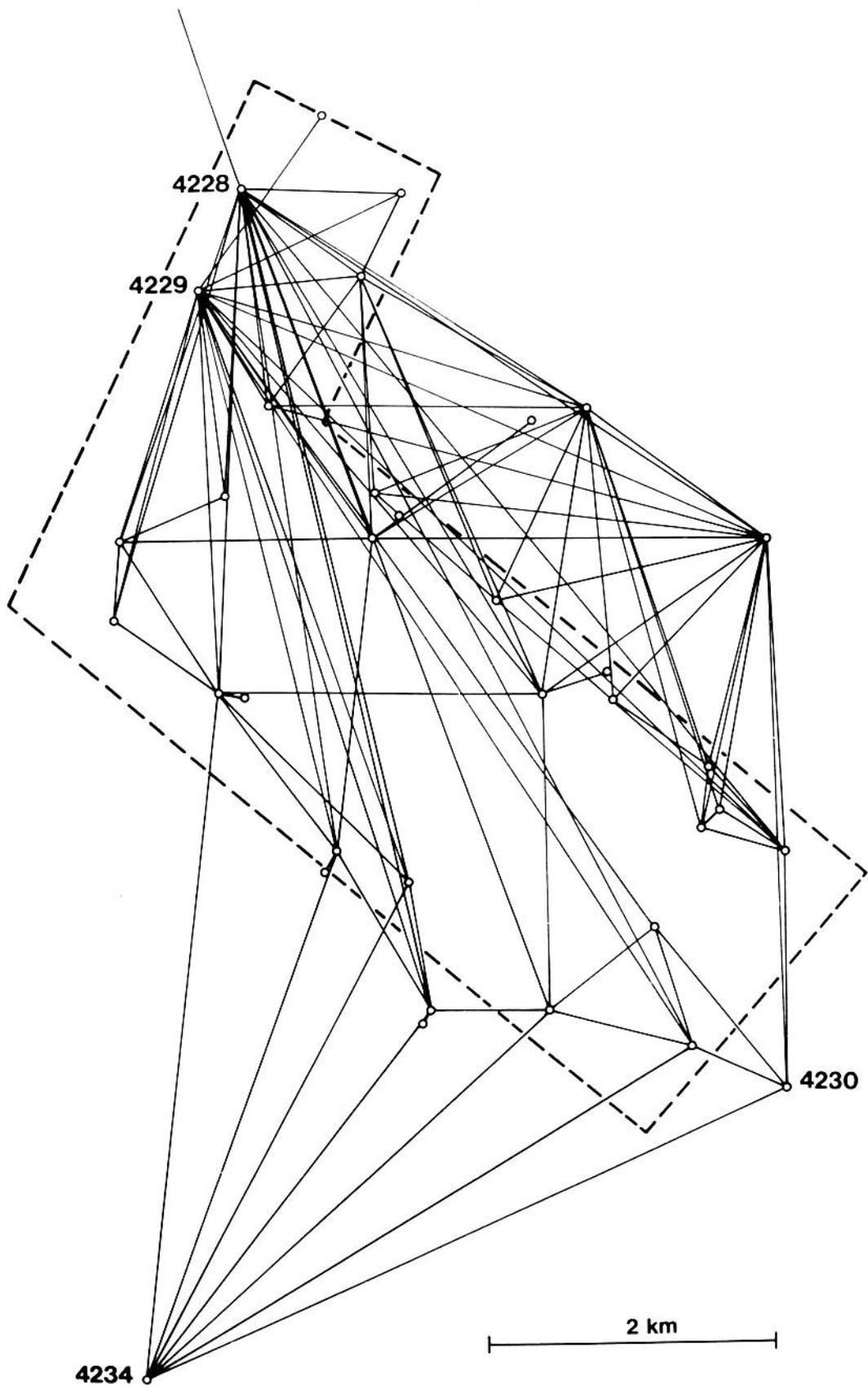


Abb.3: Verdichtungsnetz zur Stützung des photogrammetrischen Blocks

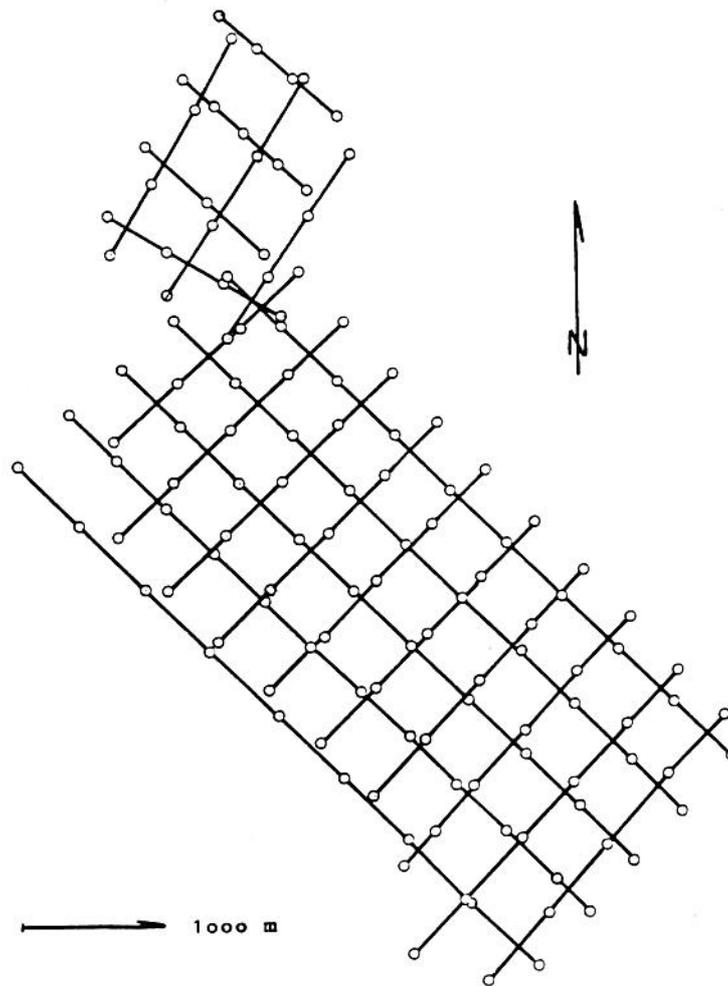


Abb.4: Bildfluganordnung für Epoche 6 mit 60 % Längs- und Querüberdeckung mit zusätzlicher Querbefliegung

an zwei Strecken noch 2,5 cm. Alle anderen Streckenverbesserungen waren deutlich kleiner. Die Kontrolle der Gewichtsansätze geschah mit Hilfe der Varianzkomponentenschätzung. Sie konvergierte für die 161 Strecken bei einem Wert von $s_0 = \pm 8$ mm. Die angegebene Streckenmeßgenauigkeit lag bei ± 5 mm. Wie die Rückfrage ergab, sollte dieser Wert von ± 5 mm für eine aus Hin- und Rückmessung gemittelte Strecke gelten. Da in BINGO die Einzelbeobachtungen zur Ausgleichung kamen, wäre danach $\pm 5 \text{ mm} \cdot \sqrt{2} = \pm 7$ mm anzusetzen. Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem berechneten Wert von ± 8 mm überein.

Weiter wurde die Varianzkomponentenschätzung benutzt, um ein Gewichtsverhältnis zwischen signalisierten und natürlichen Punkten zu ermitteln. Bei einem s_0 für signalisierte Punkte von $\pm 5,1 \mu\text{m}$ ergab sich hier für natürliche Punkte ein $s_0 = \pm 6,9 \mu\text{m}$, also ein Faktor von 1,35. Die Koordinaten der Punkte erhielten durch den veränderten Gewichtsansatz neue Werte, die von den vorherigen bis zur Größenordnung der eigenen Standardabweichungen differieren.

Ab Epoche 6 gilt nicht nur eine veränderte Aufnahmedisposition, aufgrund des Einsatzes eines genauen Monokomparators PK1 sind auch die Bildkoordinaten sehr viel genauer bestimmt als in Epoche 3 (siehe auch Tab.2). Nach der Ausgleichung gilt für die Bildmessungen ein $s_0 = \pm 2,5 \mu\text{m}$. Die Genauigkeit der Lagekoordinaten der Punkte liegt im Bereich $m_x, m_y = \pm 7$ mm. Dabei kamen 15 zusätzliche Parameter in Ansatz (Tab.2), die vom Programm BINGO aus dem möglichen Satz von 24 Parametern

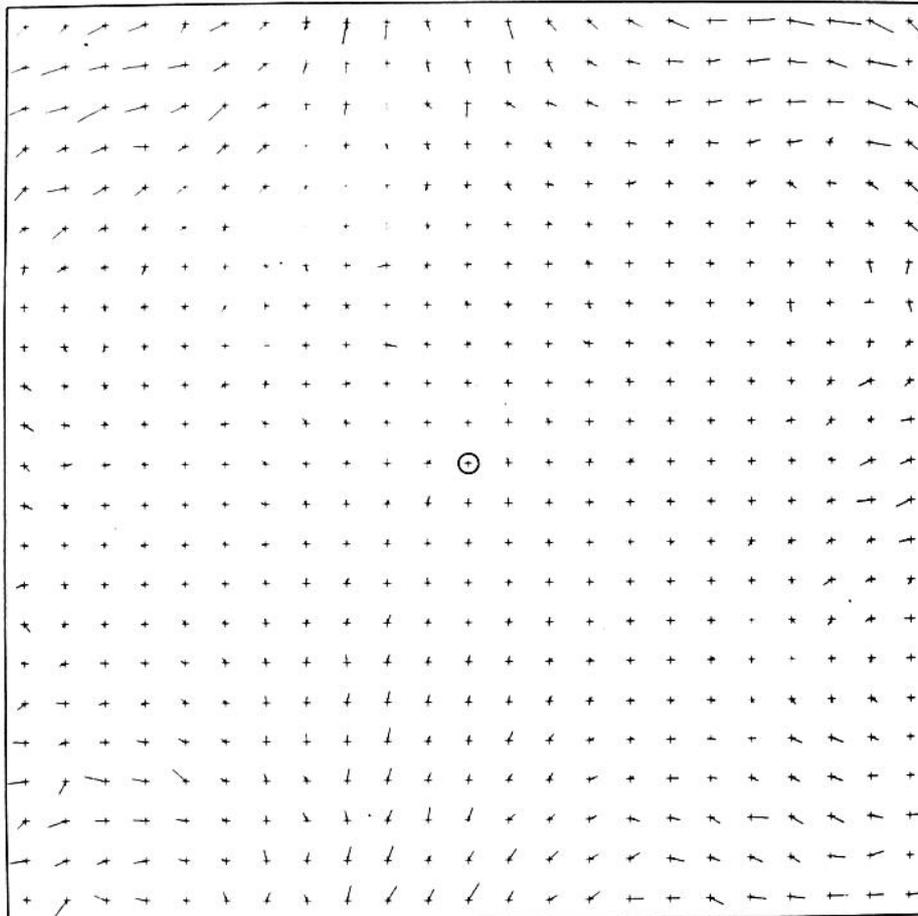


Abb.5: Auswirkung der zusätzlichen Parameter auf das Bild (Epoche 6)

ausgewählt wurden /Jacobsen 1982, Kruck 1984/. Einschließlich der Werte für Kammerunbekannte und Hauptpunktlage wurden somit für die Aufnahmekammer 18 zusätzliche Unbekannte mitgeführt. Eine Betrachtung der Korrelationskoeffizienten zwischen Hauptpunktlage und Kammerkonstanten einerseits und der zusätzlichen Parameter andererseits zeigt fast völlig Unabhängigkeit dieser Unbekannten. Zwei Testrechnungen mit dem gesamten Block untermauern diese Unabhängigkeit numerisch: In einer Berechnung wurden keine zusätzlichen Parameter mitgeführt, in der anderen Kammerkonstante und Hauptpunktlage nicht als Unbekannte eingeführt. Die Ergebnisse der Ausgleichungen bestätigen die Unabhängigkeit: Die Werte der zusätzlichen Parameter bzw. der Kammerkonstanten und Hauptpunktlage bleiben unverändert gegenüber dem Ansatz mit 18 Kammerunbekannten.

Stärkeren Veränderungen dagegen sind die Koordinaten der Objektpunkte unterworfen /Sasse 1984/. Obwohl wegen der vorkorrigierten Bildkoordinaten die Auswirkungen der zusätzlichen Parameter auf das Bild relativ klein sind (Abb.5), bewirkt insbesondere das Fortlassen dieser zusätzlichen Parameter stärkere systematische Koordinatenänderungen in der kritischen Richtung der zu kontrollierenden Bodenbewegungen.

Da sich ähnliche Koordinatenänderungen auch bei Variation anderer Blockparameter zeigten, war eine Ursachenforschung für diese Effekte angebracht.

EIGENWERTANALYSE

Eine Eigenwertanalyse mit dem Hannoverschen Netzausgleichungsprogramm **HANNA** /Funke, G. und Weise, W. 1982/ zeigt hier deutlich die Probleme des Netzes. In diese Analyse wurden nur die geodätischen Netzbeobachtungen einbezogen (Abb.2 und 3). Der Vektor zum wesentlichen Eigenwert zeigt eine Tendenz zur Drehbewegung des inneren eingehängten Netzteils, gegen die äußeren Netzpunkte (Abb.6). Besonders deutlich wird diese Tendenz im östlichen Teil des Netzes. Dabei weisen die Vektoren in die kritische Richtung der zu kontrollierenden Bodenbewegungen. Eine zusätzliche Netzversteifung durch weitere Strecken im Osten des Netzes könnte Abhilfe schaffen. Wegen schwieriger topographischer Verhältnisse ist diese Versteifung bisher unterblieben.

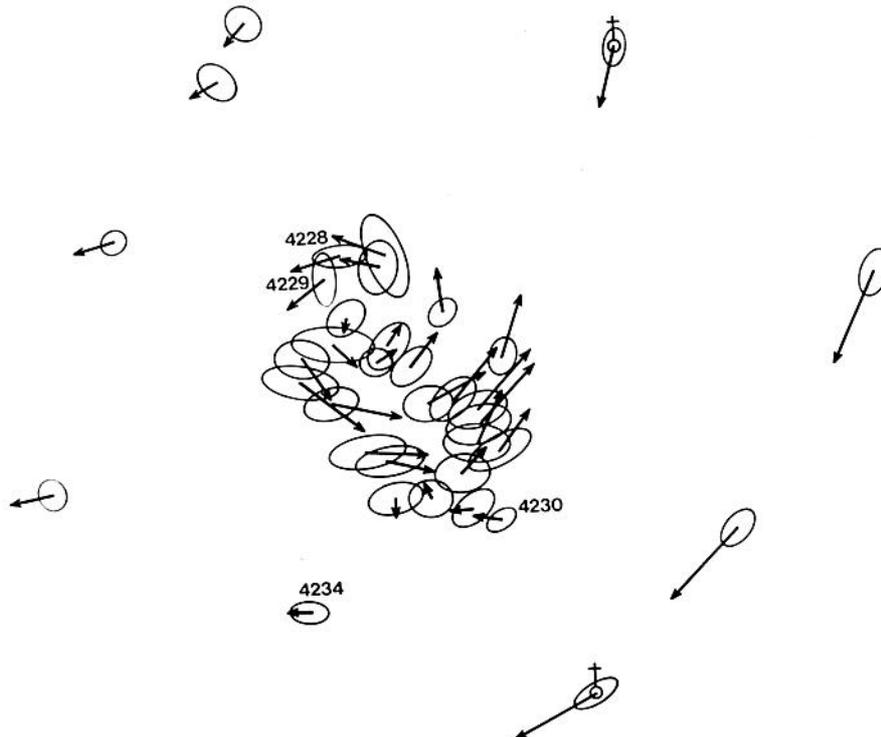


Abb.6: Vektoren zum wesentlichen Eigenwert für das Geodätische Netz, berechnet mit **HANNA**

TESTFELDKALIBRIERUNG

In Epoche 6 ist versuchsweise zusätzlich ein kleines Gebiet am Hang in einer Höhe von etwa 550 ü.NN separat befliegen worden, um die Aufnahmekammer zu kalibrieren. Bei Geländehöhen von -22 bis +120 m ü.NN beträgt der mittlere Bildmaßstab 1:3300 und der Höhenunterschied 25 % der Flughöhe. Der Block enthält 33 Punkte und 14 Bilder. Von den 33 Punkten sind 18 in der Höhe durch Nivellement bestimmt. Weiter liegen 11 Raumstrecken, 11 Zenitdistanzen und 6 Richtungssätze mit 2 Zielen vor. Viele Punkte sind in allen Bildern angemessen. Die Anzahl der Unbekannten beträgt 202, die der Beobachtungen 745. Insgesamt liegt also eine gute Überbestimmung vor und die Konfiguration ist für eine Kalibrierung günstig. Rangdefekte der Normalgleichung werden durch eine minimale Lagerung vermieden. Die gemeinsame Ausgleichung aller Beobachtungen des Testfeldes ergab die in Tabelle 2 dargestellten Kammerdaten. Eine differenzierte Betrachtung der Ergebnisse der Testfeldauswertung erfolgt im nächsten Abschnitt.

	Befliegung am	Flugzeug	Kammer	Kassette	Bildmaßstab 1:	Bilder	Laborkalibrierung vom
Epoche 3	23.4.83	Partenavia PN 68 (2-motorig)	RMK A 15/23 127 763	ohne FMC*	7 000	107	15.3.83
Epoche 6	14.4.84	"	"	"	"	134	"
Epoche 6 Testfeld	"	"	"	"	3 300	14	"
Epoche 7	18.8.84	Cessna C 207 (1-motorig)	RMK A 15/23 134 651	mit FMC*	7 000	140	19.6.84
Epoche 8	7.12.84	"	"	"	"	"	"

* FMC: Bildwanderungskompensation

Tabelle 1: Daten zu den Befliegungen

lfd. Nr.		Höhenpaßpunkte	Meßgerät	S ₀ a post.	c [mm]	x' _H [µm]	y' _H [µm]	S _c [µm]	S _{x'_H} [µm]	S _{y'_H} [µm]	zus. Parameter
1	Laborkalib. Kam.127 763				152,712	0	8				
2	Epoche 3	51	CPM1	5,1	152,707	21	3	26.7	4.0	3.9	11
3	Epoche 3 Simulation -	51		2,5	-	-	-	17.8	2.0	1.8	-
4	Epoche 6	208	PK 1	2,5	152,697	-8	-21	8.8	1.3	1.4	16
5	Testfeldkalib.	18	PK 1	2,4	152,726	-19	-18	21.0	2.7	2.7	10
6	Epoche 6 incl. Testfeld			2,5	152,692	-10	-20	7.6	1.2	1.2	16
7	Laborkalib. Kam.134 651				153,485	-1	-6				
8	Epoche 7	246	PK 1	3,3	153,494	-2	-3	8.2	1.8	1.7	13
9	Epoche 8	269	PK 1	4,1	153,461	9	-13	9.9	2.4	2.4	4 Gruppen 9,10, 6,7

Tabelle 2: Ergebnisse der Kalibrierungen

GEGENÜBERSTELLUNG DER KALIBRIERUNGSERGEBNISSE

In Tabelle 1 sind die für die nachfolgenden Vergleiche relevanten Daten zusammengestellt. Die Ergebnisse der interessantesten Rechenläufe mit Simultankalibrierung zeigt Tabelle 2. Kammerkonstante und Hauptpunktslage wurde in allen Rechenläufen als beobachtete Unbekannte berücksichtigt. Die Standardabweichungen a priori sind jedoch in allen Berechnungen mit $\pm 500 \mu\text{m}$ für die Kammerkonstante und $\pm 100 \mu\text{m}$ für die Komponenten des Hauptpunktes so hoch angesetzt, daß sie auf das Ausgleichsergebnis praktisch keinen Einfluß mehr nehmen. Die Kammerunbekannten sind somit als freie Unbekannte anzusehen, die nur aus dem Block heraus bestimmt werden. Dieser Ansatz ist für die hier durchgeführten Untersuchungen sinnvoll. Für praktische Anwendungen dagegen sollten die Kammerdaten mit einer der Kalibrierungsgenauigkeit entsprechenden Standardabweichung a priori in der Ausgleichung berücksichtigt werden.

Wie Tabelle 2 zeigt, unterscheiden sich die Abweichungen der in der Simultankalibrierung ermittelten Werte für die Hauptpunktslage in den meisten Epochen signifikant von den Laborkalibrierungen. Die Kammerkonstanten hingegen stimmen im Rahmen der Standardabweichung mit der zugehörigen Laborkalibrierung überein. Die Abweichungen gegenüber diesen Werten deuten nicht unbedingt auf eine Veränderung der Kammer hin, sondern werden verursacht durch die unterschiedlichen Bedingungen zwischen Labor und Befliegung (Refraktion, Aufhängung etc.). Aus diesem Grunde sollten Kammerkonstante und Hauptpunktslage immer dann als beobachtete Unbekannte mitgeführt werden, wenn sie das Ausgleichsergebnis beeinflussen könnten. Dies ist regelmäßig zu vermuten, wenn größere Höhenunterschiede oder starke Bildneigungen gegeben sind.

Für Epoche 3 erfolgte die Messung der Bildkoordinaten mit etwas geringerer Genauigkeit als in den anderen Epochen. Die Standardabweichungen für Kammerkonstante und Hauptpunktslage liegen sehr deutlich über denen von Epoche 6 (Tab.2, lfd.Nr.2). Um den Einfluß der weniger genauen Bildkoordinatenmessung in Epoche 3 zu eliminieren, wurde in einer Simulationsrechnung mit **BINGO** für die Bildmessungen eine Genauigkeit von $s_0 = \pm 2,5 \mu\text{m}$ unterstellt (Tab.2, lfd.Nr.3). Die Standardabweichung für die Hauptpunktslage geht dabei um den gleichen Faktor (1/2) zurück wie das s_0 und erreicht damit etwa die Standardabweichungen der entsprechenden Unbekannten in Epoche 6 (Tab.2, lfd.Nr.4). Die Standardabweichung der Kammerkonstanten hingegen verringert sich nur um 1/3 und liegt immer noch doppelt so hoch, wie der vergleichbare Wert s_c in Epoche 6. Dieser Unterschied ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, daß die Anzahl der Höhenpaßpunkte in Epoche 6 viermal größer ist als in Epoche 3. Ein weiterer Einfluß ist eventuell durch die unterschiedliche Bildfluganordnung gegeben.

Obwohl in Epoche 6 keine signifikanten Unterschiede für c zwischen Simultan- und Testfeldkalibrierung (Tab.2, lfd.Nr.4 und 5) vorhanden sind, waren die Unterschiede Anlaß, alle Daten des Testfeldes gemeinsam mit dem gesamten Block auszugleichen (lfd. Nr.6). In dieser Ausgleichung zeigen sich Spannungen an zwei übergreifenden Strecken des Testfeldes von mehr als 3 cm. Abbildung 7 zeigt die Koordinatenunterschiede zwischen dieser gemeinsamen Ausgleichung (lfd.Nr.6) und der ursprünglichen Ausgleichung (lfd.Nr.4). Neben der lokalen Unruhe im Testfeld wird ein langsam

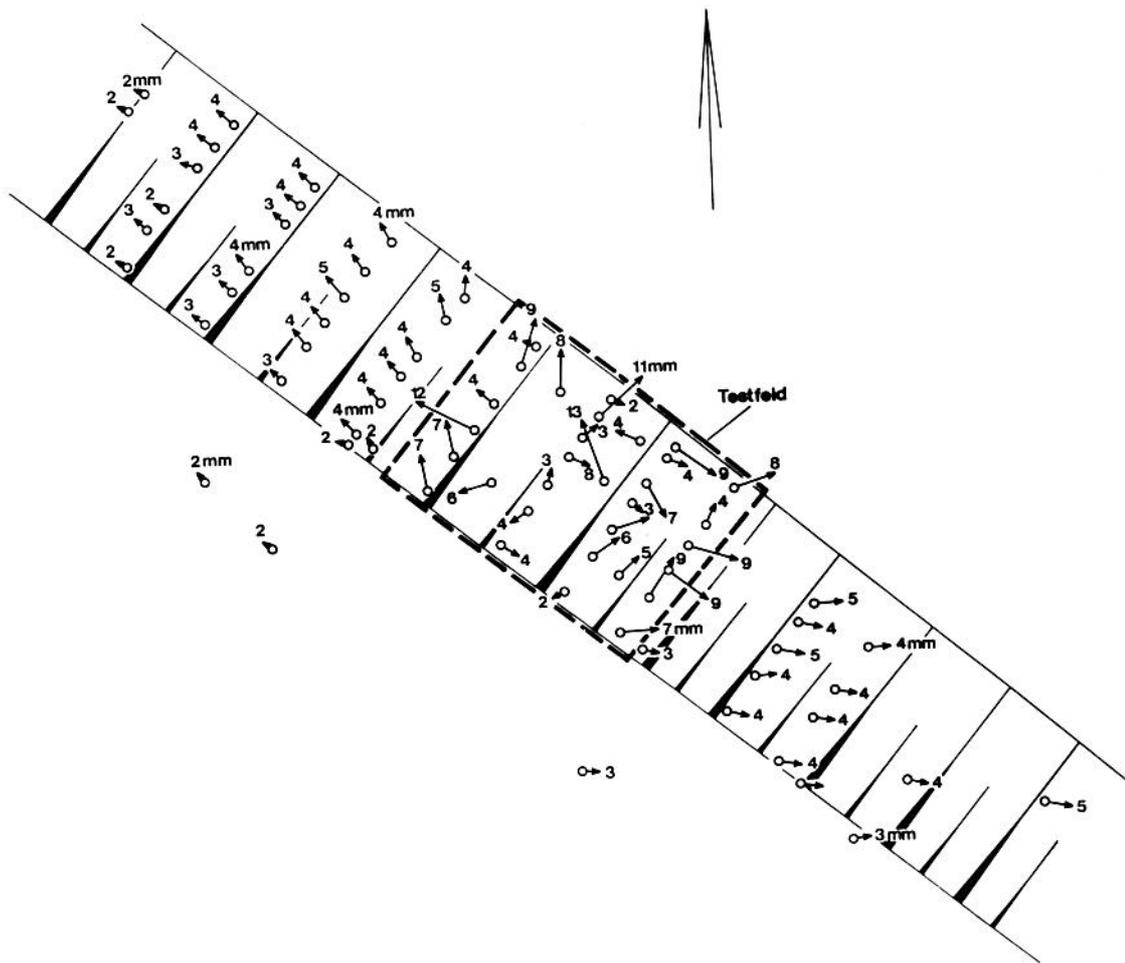


Abb.7: Spannungen im Bereich des Testfeldes

abklingender Verdrängungseffekt sichtbar, der Maßstabsprobleme aufzeigt. Da außerdem die Bestimmungsgenauigkeit der Kammerdaten durch die Testfeldkalibrierung im Vergleich zur Simultankalibrierung deutlich schlechter ist, muß insgesamt der Schluß gezogen werden, daß bei den vorliegenden topographischen Gegebenheiten eine Testfeldkalibrierung gegenüber einer Simultankalibrierung keine Vorteile bietet. Zusätzliche Kapazitäten sollten daher eher zur Bestimmung von Höhenpaßpunkten genutzt werden.

In Epoche 7 und 8 kam neben einer anderen Kammer gleichen Typs auch eine Filmkassette mit Bildwanderungskompensation (FMC) zum Einsatz. Die Häufigkeitsfunktion der Verbesserungen der Bildkoordinaten zeigt deutlich weniger Ausreißer als die der vorherigen Epochen. Daraus kann auf eine bessere Einstellbarkeit der Punkte geschlossen werden. Gleichzeitig kam auch ein anderes, einmotoriges Flugzeug zum Einsatz. Die geringere Genauigkeit der Bildmessungen ist vermutlich auf eine ungünstigere Abgasführung bei Maschinen dieses Typs zurückzuführen. Durch erwärmte Luft, die in die Nähe der Aufnahmeöffnung gelangen kann, sind zeitlich variable lokale Refraktionen zu befürchten /Kupfer 1971/. Eine Befliegung mit einer zweimotorigen Maschine und FMC-Kassette ist für eine der nächsten Epochen zu wünschen. Dann nämlich kann die sehr interessante Frage geklärt werden, ob durch die neue

Kassette die an sich schon ausgezeichnete Genauigkeit $s_0 = \pm 2,5 \mu\text{m}$ noch zu verbessern ist.

VERFEINERUNG DES STOCHASTISCHEN ANSATZES

Wie Untersuchungen am vorliegenden Datenmaterial gezeigt haben, können auch kleinere Gewichtsänderungen deutliche Koordinatenänderungen bewirken. Daher scheint eine Untersuchung zur Schätzung einer Gewichtsfunktion für Bildmessungen in Abhängigkeit vom Bildradius sinnvoll.

Während die innere Genauigkeit sich durch eine Schätzung aus Doppelmessungen ergibt, sind alle äußeren Einflüsse nur durch eine Varianzkomponentenschätzung zu erfassen. Die Untersuchung wurde exemplarisch an Epoche 6 vorgenommen /Sasse 1984/. Nach verschiedenen anderen Versuchen wurde eine überlagerte e-Funktion zur Darstellung der Gewichtsfunktion angesetzt.

$$s_x, s_y = a \cdot e^{-b \cdot r'} + c \cdot e^{d \cdot r'}$$

Sämtliche Verbesserungen der Bildmessungen, eingeordnet in 4 Gruppen verschiedener Bildradien, dienen zur Schätzung der Koeffizienten a bis d dieser Funktion. Die Schätzung konvergierte nach dem zweiten Durchlauf. Abbildung 8 zeigt die Gruppen, deren Grenzen so gewählt sind, daß in allen Gruppen die Summe der Redundanzen etwa gleich ist. Die Standardabweichungen von Gruppe 1 zu denen in Gruppe 4 verhalten sich im Mittel wie 0,83 zu 1,38. Die Änderungen der Lagekoordinaten der Punkte betragen durchschnittlich etwa 4 mm, bei einer Streuung zwischen 2 und 6 mm. Bei der Genauigkeit der Koordinaten von etwa $\pm 7 \text{ mm}$ liegen diese Werte zwar innerhalb des Rauschens, bei einer weniger starken Blockverknüpfung sind jedoch durchaus größere Änderungen zu erwarten.

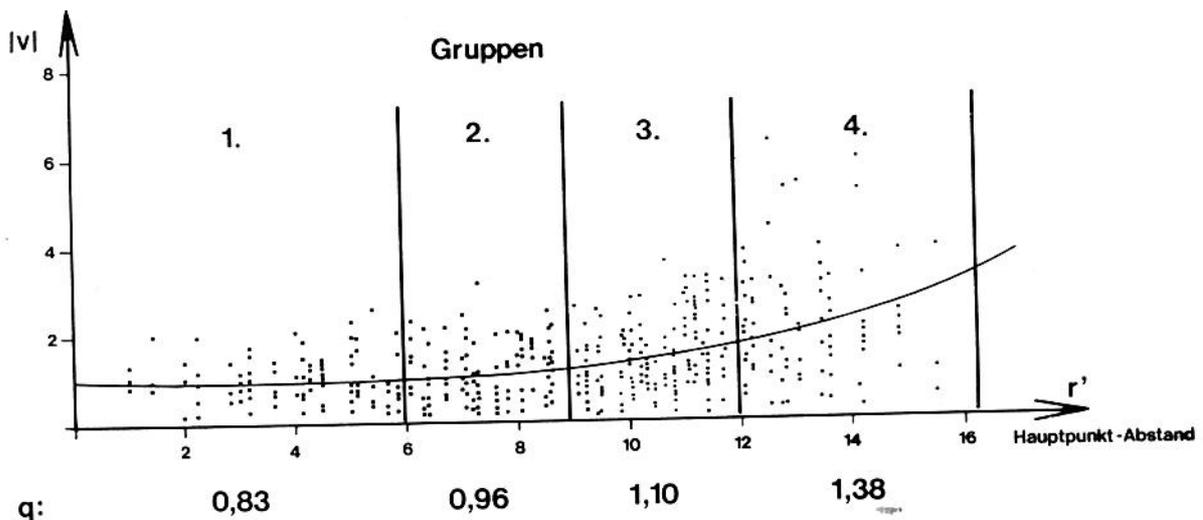


Abb.8: Geschätzte Varianzfunktion

Es wird deshalb angeregt zu untersuchen, ob für jeden Kammertyp eine radiale Gewichtsfunktion angegeben werden kann. Diese Funktion könnte zu den Kalibrierinformationen zählen und würde bei hochgenauen Punktbestimmungen zur Verfeinerung des stochastischen Ansatzes beitragen.

SCHLUSSBEMERKUNGEN

Bei räumlich gestaffelten Aufnahmeobjekten oder bei größeren Bildneigungen ist eine simultane Kalibrierung der Aufnahmekammer unbedingt zu empfehlen. Dabei sollten vorhandene Daten einer Laborkalibrierung als beobachtete Unbekannte mit einer der Kalibriergenauigkeit entsprechenden Standardabweichung in die Ausgleichung einfließen. Andernfalls können die Ausgleichungsergebnisse verfälscht werden, ohne daß dies durch größere Standardabweichungen oder Verbesserungen erkennbar wäre.

Die kombinierte Ausgleichung bietet durch das einwandfreie funktionale Modell die besten Möglichkeiten zur Kontrolle des Gesamtnetzes. Auch eine Bündelausgleichung, die die Kovarianzen der Paßpunkte berücksichtigt, ist nicht so streng, weil die Varianzkomponenten für die ursprünglichen geodätischen Messungen nicht aus dem Gesamtnetz geschätzt werden können.

LITERATUR

- Ebner, H.: Combined Adjustment of Photogrammetric and Non-Photogrammetric Information. Invited Paper, ISPRS Congress, Commission III, Rio de Janeiro, 1984
- Förstner, W.: Konvergenzbeschleunigung bei der a posteriori Varianzschätzung, Zeitschrift für Vermessungswesen 104, 1979.
- Funcke, G. und Weise, W.: A Contribution to the Treatment of Defects in Large Geodetic Networks. Beitrag in Reihe B der Deutschen Geodätischen Kommission, Nr.258/VIII, München 1982.
- Jacobsen, K.: Programmgesteuerte Auswahl zusätzlicher Parameter. Bildmessung und Luftbildwesen 6, S.213-217, 1982.
- Kruck, E.: Lösung großer Gelichungssysteme für photogrammetrische Blockausgleichungen mit erweitertem funktionalem Modell. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr.128. Dissertation 1983.
- Kruck, E.: BINGO: Ein Bündelprogramm zur Simultanausgleichung für Ingenieur Anwendungen - Möglichkeiten und praktische Ergebnisse. Presented Paper, ISPRS Congress, Commission II, Rio de Janeiro, 1984.
- Kupfer, G.: Zur Geometrie des Luftbildes. Deutsche Geodätische Kommission Reihe C, Nr.170, München 1971.
- Kupfer, G.; Zinndorf, S., Schäfer, W. und Rössmann, H.: Praktische Systemkalibrierung im Feld. In diesem Heft.
- Reichenbach, K. und Schaefer, W.: Photogrammetrische Präzisions-Punktbestimmung zur Erfassung von Bodenbewegungen - Ergebnisse eines Entwicklungsvorhabens und weitere Praxiserfahrungen. Markscheidewesen 92(1985), Heft 3, in Vorbereitung.
- Sasse, V.: Untersuchungen zur kombinierten Ausgleichung für den Tagebau Hambach. Diplomarbeit, 1984.
- 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, Konrad Wittwer Verlag, 1980.
- Wester-Ebbinghaus, W.: Verfahren zur Feldkalibrierung von photogrammetrischen Aufnahmen im Nahbereich. Beitrag in diesem Heft.
- Zinndorf, S.: Parameterschätzung bei hybriden Beobachtungen unter Einschluß der Systemkalibrierung. Beitrag in diesem Heft.

ANHANG

BINGO

Ein operationelles Programmsystem für Aerotriangulation und Nahbereichs-photogrammetrie

Eine kombinierte Ausgleichung photogrammetrischer und geodätischer Messungen wird erforderlich, wenn an eine Punktbestimmung hohe Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanforderungen gestellt sind. Besonders in der großmaßstäbigen Nahbereichs-photogrammetrie wird die hohe Genauigkeit von photogrammetrischen Punktbestimmungen oft durch Ungenauigkeiten in den Paßpunkten gestört. Nur eine kombinierte Ausgleichung, in der alle Messungselemente gemeinsam verarbeitet werden, kann diese Probleme lösen. Zusätzlich können in der terrestrischen Photogrammetrie besondere Aufnahmeumstände zur Versteifung des Netzes in die Ausgleichung eingeführt werden.

Das Programmsystem **BINGO** verarbeitet folgende Messungen und Bedingungen:

- Bildmessungen aus terrestrischen Aufnahmen und Luftbildern
- Bedingungen zwischen Aufnahmen mit Stereokammern
- Zentrierung von Mehrfachaufnahmen auf einem Standpunkt oder auf Paßpunkten
- Orientierungsdaten der Bilder
- Kammerkonstante und Hauptpunktslage
- Paßpunkte (auch separat in x, y oder z)
- Koordinatenunterschiede in x, y und z
- Horizontal- und Raumstrecken
- Richtungssätze, Zenitdistanzen und Azimute
- Ebenen, Geraden und Lotlinien, parallel zu den Koordinatenachsen.

Für alle Beobachtungen können separate Gewichte durch Angabe von Standardabweichungen a priori angesetzt werden. Bei der Simultankalibrierung sind Kammerkonstante, Hauptpunktslage und 24 zusätzliche Parameter eingeschlossen. Redundante zusätzliche Parameter werden vom Programm automatisch eliminiert. Auch für große Blöcke mit mehr als 10 000 Unbekannten kann die Standardabweichung für alle Unbekannten berechnet werden. Die Fehlersuche ist mit Baardas Data-Snooping für alle Beobachtungen möglich.

Zur Prüfung des stochastischen Modells berechnet **BINGO** für alle Beobachtungsgruppen Varianzen a posteriori und vergleicht diese mit den Varianzen a priori (Varianzkomponentenschätzung). Auf diese Weise ist die Trennung zwischen Daten- und Modellfehlern möglich.

Zur Netzoptimierung sind Simulationsrechnungen geodätisch-photogrammetrischer Netze ohne reelle Messungen möglich.

Ein neuer Algorithmus zum Ordnen und Lösen der Normalgleichung kann den Rechenaufwand kombinierter Netze erheblich reduzieren. Diese neue Methode ist sehr effektiv, besonders dann, wenn Rechner mit besonderen Hardwareeinrichtungen zur schnellen Vektorverarbeitung zur Verfügung stehen, da der neue Algorithmus besonders gut für Vektorrechner geeignet ist.

Programmiersprache: FORTRAN 77