

Automatic Computation of Initial Approximations for Bundle Block Adjustment with Program RELAX

Dr. Erwin Kruck



GIP Gesellschaft für Industriephotoграмmetrie mbH
Leibnizstr. 28, D-73431 Aalen, Germany

and

Stefanie Trippler



GESELLSCHAFT FÜR TECHNISCHE
PHOTOGRAMMETRIE m.b.H.

Abstract

The new possibilities of digital photography and digital image processing increases the acceptance of photogrammetric methods in the industrial business significantly, as the time-consuming film development processes are not necessary anymore. The perceptible growth potential justifies enormous investments in this field. An important precondition for the use of photogrammetry is furthermore the simplification and automatization of photo orientation and image restitution.

This publication presents for the first time the program RELAX, which estimates automatically the initial approximations of photo orientation data for terrestrial photography as well as for aerial applications. The program is part of the bundle adjustment program BINGO and is used since already 7 years. Now it has been completely revised and enhanced and is thereby making an important contribution to the automatic photo orientation.

This new program version includes the method of "limited balanced adjustment". The new method reduces the influence of faulty measurements to the adjustment results considerably. The excellent practical results confirm the efficiency of this new method.

1. Einführung

Für die photogrammetrische Praxis hat die Bündelausgleichung in den vergangenen 15 Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen. Die Gründe waren eine verbesserte und erschwinglichere Rechnerhardware sowie der zunehmende praktische Einsatz analytischer Plotter, die eine flexible Messung der Bildkoordinaten und die Rückführung der Ergebnisse in die Modellorientierung gestatten. Damit war der Einsatz der Bündelausgleichung deutlich kostengünstiger als herkömmliche Orientierungsmethoden. Neue Technologien, wie z. B. der Einsatz von GPS zur Bestimmung der Projektionszentren, verstärken noch die Bedeutung dieser Programme.

In der Praxis werden Bündelprogramme in sicher über 90% der Anwendungen für Luftbildphotoграмmetrie eingesetzt, aber auch für terrestrische Aufgaben erfolgt ein operationeller Einsatz. Dies geschieht z.B. in der Automobilindustrie, im Anlagenbau, der Kraftwerksüberwachung und in der Architektur. In Bereichen, in denen die Arbeiten nicht von Vermessungsingenieuren ausgeführt werden, sondern wie z.B. in der Automobilindustrie von Maschinenbauern, sind besonders hohe Anforderungen an die Software zu stellen, da der Ablauf weitestgehend automatisch erfolgen muß. Die zunehmend auch praktische Bedeutung der digitalen Photoграмmetrie in der Industrie sowie das gewaltige Aufgabenpotential in diesem

Bereich unterstreichen dabei die Forderung nach automatischen Abläufen.

Während die Bündelausgleichungsprogramme für diese Aufgaben gut gerüstet sind, ist die Bestimmung der Näherungsorientierungen insbesondere für terrestrische Anwendungen immer noch ein Diskussionspunkt. Als Beitrag zu dieser Diskussion soll hier erstmals ein Programm öffentlich vorgestellt werden, daß seit Jahren im praktischen Einsatz ist und die Näherungsorientierungen automatisch berechnet.

Beim Einsatz dieses Programms hatten sich in den vergangenen Jahren Anfälligkeiten gegen grobe Datenfehler - insbesondere Punktverwechslungen - gezeigt. Sie konnten die automatische Berechnung so stark stören, daß manuelle Eingriffe erforderlich waren. Das Programm wurde daher kürzlich vollständig überarbeitet und bezüglich seiner mathematischen Ansätze an allen entscheidenden Stellen mit robusten Algorithmen zur Suche und Elimination grober Fehler ausgestattet.

Hierbei ist insbesondere eine völlig neue relative Orientierung zu nennen, bei der die Unbekannten mit einer begrenzt balancierten Ausgleichung ermittelt werden.

2. Übersicht über das Programm RELAX-B

Seit 7 Jahren wird das Programm RELAX (**REL**ative orientation and computation of initial **APPROX**imations) als Bestandteil des Bündelausgleichungsprogramms BINGO in der Praxis eingesetzt. Grundlage für die Entwicklung dieses Programms war der Gedanke, daß die Geometrie eines Netzes eindeutig bestimmt sein muß, wenn eine Blockausgleichung gerechnet werden kann. Wenn aber die Geometrie bestimmt ist, muß es einen Weg geben, die Näherungswerte der Unbekannten des Systems automatisch zu bestimmen. Diese Aufgabe bearbeitet das Programm RELAX-B, wobei das jetzt angehängte „B“ auf die balancierte Ausgleichung hindeutet.

Nachfolgend wird ein Überblick über die einzelnen Bearbeitungsschritte gegeben, die das Programm automatisch, also ohne Benutzereingriffe, ausführt:

- Bestimmen einer optimalen Bearbeitungsreihenfolge mit Hilfe des Graphen zwischen allen Bildern
- Erkennen und Bearbeiten von Teilblöcken
- Relative Orientierung benachbarter Bilder und Verbinden dieser Bilder zu (Teil-) Blöcken

- Erkennen und Eliminieren von Datenfehlern
- Vorausgleichung der Punktkoordinaten mit Vorwärtsstrahlen
- Transformation aller Teilblöcke in ein einheitliches Bezugssystem.

Die Näherungswerte für Punktkoordinaten und Bildorientierungen werden also unabhängig von der Blockkonfiguration und den Aufnahmerichtungen vollständig automatisch gewonnen. Einige Parameter erlauben dabei, diesen Prozeß zu beeinflussen.

Das Programm besteht aus 10400 FORTRAN-Statements und kann hier nicht in vollem Umfang beschrieben werden. Die wichtigsten Merkmale sollen jedoch erläutert werden. Abbildung 1 zeigt schematisch und stark vereinfacht den Programmablauf.

3. Orientierungsreihenfolge

Zu Beginn der Bearbeitung wird der Graph des Blockes ermittelt. D.h., es wird für jedes Bild festgestellt, ob und wie viele gemeinsame Punkte es mit allen anderen Bildern des Verbandes hat. Für das Bildpaar mit den meisten gemeinsamen Punkten wird als erstes durch eine relative Orientierung ein Modell gebildet.

Ausgehend von diesem Modell wird anschließend an das linke oder rechte Bild das nächste Bild als Folgebild herangerechnet. Auswahlkriterium ist dabei jeweils die höchstmögliche Anzahl von gemeinsamen Punkten zwischen den Bildern. Die Anzahl der Verknüpfungspunkte liefert der vorab berechnete Graph.

Bildpaare mit vielen gemeinsamen Punkten sollen dabei bevorzugt zur relativen Orientierung herangezogen werden. Deshalb wird vor dem Start der relativen Orientierungen aus dem Graphen der Median der Anzahl der gemeinsamen Bildpunkte berechnet (Median des Graphen). Alle Bildpaare deren gemeinsame Punktanzahl größer ist als der Median, werden vorzugsweise zur Orientierung zugelassen. Die weiteren Bildpaare werden erst dann zur Orientierung benutzt, wenn sie nicht anders an den Block heranorientiert werden können.

Zusätzlich kann durch einen Parameter MINCO (MINimum number of COnections) die Mindestanzahl gemeinsamer Punkte für die relative Orientierung von 6 auf einen höheren Wert gesetzt werden. Dies ist immer dann sinnvoll, wenn bei stark verknüpften Bildverbänden ansonsten die Gefahr besteht, daß Bilder mit nur geringer Überdeckung relativ orientiert werden. In

diesen Fällen kommt es sonst häufig vor, daß bereits bei 20% Überdeckung eine relative Orientierung durchgeführt wird, weil mehr als 6 Punkte in diesem schmalen Streifen liegen. Um auch hier dem Benutzer die Entscheidung abzunehmen, ist

geplant, ein Bild in Segmente aufzuteilen und zu verlangen, daß eine Mindestanzahl von Segmenten mit Punkten belegt ist. Im Sinne einer Automatisierung ist dies eine Erleichterung für den Benutzer.

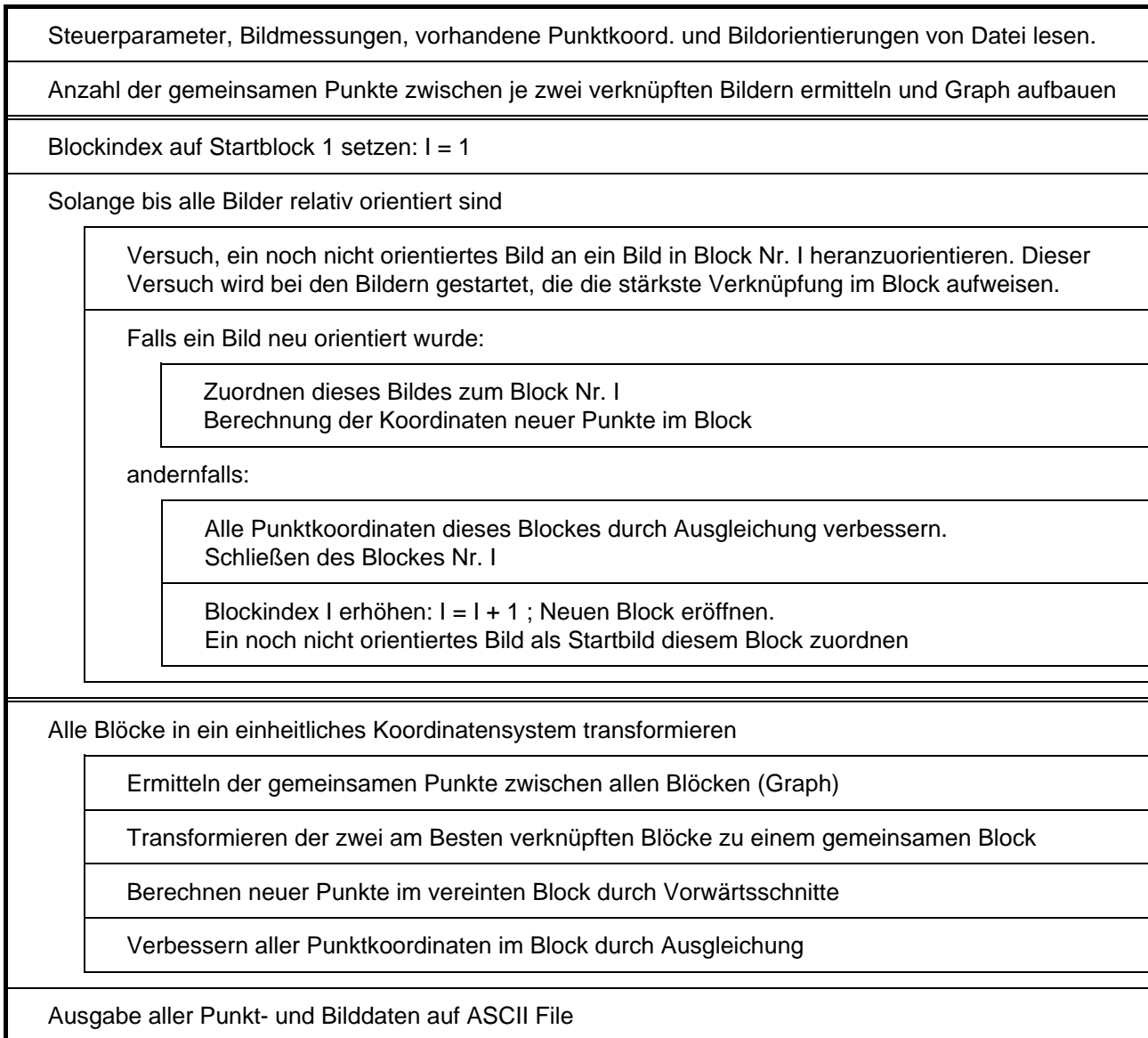


Abb. 1 Schematischer Programmablauf von RELAX-B

Die Orientierungsreihenfolge wird hier also jeweils dynamisch festgelegt und kann so dem jeweiligen Fortschritt der Orientierung optimal angepaßt werden. Eine vorausberechnete Orientierungsreihenfolge würde sicher in vielen Fällen gestört werden, da manche Orientierungen aufgrund zu vieler grober Fehler gar nicht möglich sind.

Optional können bestimmte Punktnummernbereiche und bestimmte Bilder ausgewählt oder ganz ausgeschlossen werden.

4. Blockbearbeitung

Das Programm unterteilt die Daten in einzelne Blöcke, die zusammenhängend bearbeitet werden. Zu einem Block gehören alle Bildorientierungen, die sich sinnvoll aneinander orientieren lassen. Bei Luftbildverbänden können dies z.B. die einzelnen Flugstreifen sein. Weiter gehören alle Punkte zu dem Block, die in diesen Bildern gemessen sind. Alle Daten eines Blockes sind in einem einheitlichen Koordinatensystem berech-

net. Ein Parameter CLIP (Abschneiden) steuert dabei die Blockbildung.

CLIP=0 : Die Bilder bilden einen unregelmäßigen Verband. Alle Möglichkeiten zur Berechnung von relativen Orientierungen sollen genutzt werden.

CLIP>0 : Hier ist CLIP eine höchstzulässige Bildnummerdifferenz. Bilder, deren Nummern sich um mehr als den Betrag CLIP unterscheiden, werden nicht durch eine relative Orientierung miteinander verbunden.

Dieser Parameter soll für Luftbildverbände, bei denen die Bilder im Streifen fortlaufend numeriert sind, auf Eins gesetzt sein, da so eine optimale Fehlererkennung gesichert ist:

- Fehler im Streifen erkennt und beseitigt die relative Orientierung.
- Fehler quer zum Streifen werden später bei der Transformation der Blöcke aufgedeckt.
- Ist dieselbe Punktnummer für verschiedene Punkte in unterschiedlichen Teilen des Blockes benutzt, wird dies ebenfalls bei der Transformation aufgedeckt.

Der erste Block enthält dabei alle Orientierungsdaten und Punktkoordinaten, die bereits beim Programmstart bekannt sind. Jeder weitere Block enthält eine zusammenhängende Menge von Bildorientierungen und Punktkoordinaten, die im Laufe der Berechnungen entstehen. Die Koordinatensysteme dieser weiteren Blöcke haben im jeweils ersten Modell des Blockes ihren Ursprung.

Kann kein weiteres Bild an einen Block heranorientiert werden, so wird ein neuer Block angelegt, solange es noch Bilder ohne Orientierung gibt.

5. Relative Orientierung

Bisher wurde für die relative Orientierung ein Algorithmus nach Van Den Hout und Stefanovic /1976/ eingesetzt. Diese Methode zeichnet sich dadurch aus, daß Bildpaare völlig beliebiger Aufnahmeorientierungen orientiert werden können, ohne daß Näherungswerte der Orientierung bekannt sind. Außerdem ist die Lösung aufgrund der linearen Ansätze wenig empfindlich gegen einzelne grobe Fehler. Diese an sich idealen Voraussetzungen werden leider durch drei Merkmale gestört, die in der Praxis oft in einfachsten Fällen zu einem Versagen der Orientierung und zu falschen Ergebnissen führen:

- Die Lösung ist aufgrund schlechter Konditionierung oft schwierig.
- Grenzwerte zur Akzeptanz des Ergebnisses sind sehr stark von den Parametern der Orientierung abhängig.
- Zur Bestimmung der Basiskomponenten muß eine Wurzel gezogen werden. Die Ermittlung des richtigen Vorzeichens ist dabei sehr schwierig.

Aus diesen Gründen wurde ein neuer Algorithmus gesucht. Zunächst wurde ein erst vor wenigen Jahren neu publizierter Algorithmus nachprogrammiert. Die versprochenen guten Resultate stellten sich jedoch nicht ein.

Deshalb wurde dann ein altbekannter Algorithmus implementiert, basierend auf den üblichen Komplanaritätsbedingungen. Dieser Algorithmus ist recht stabil und hat einen relativ großen Konvergenzradius. Nachteilig ist jedoch die Empfindlichkeit gegen grobe Fehler, da die Lösung mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt wird. Selbst bei vielen (>20) gut verteilten Punkten kann ein einziger falscher Punkt das Ergebnis so stark verfälschen, daß der fehlerhafte Punkt auch mit Baarda's Data Snooping nicht gefunden werden kann.

Um hier Abhilfe zu schaffen wurde die Methode der kleinsten Quadrate modifiziert. Durch Variation der Gewichte wird dafür gesorgt, daß alle Beobachtungen einen gleich starken Einfluß auf das Ausgleichsergebnis haben. Fehlerhafte Punkte, die sonst oft einen sehr starken Einfluß auf das Ergebnis haben und daher als Hebelpunkte bezeichnet werden können, verlieren ihren starken Einfluß. Diese Methode wird als balancierte Ausgleichung bezeichnet. Die Gewichte werden dabei während der Iterationen aufgrund der Redundanzanteile der einzelnen Beobachtungen modifiziert.

Die ersten Erfahrungen mit diesem Verfahren haben gezeigt, daß es wegen der sich ändernden Geometrie zu Schwingeffekten bei der Gleichungslösung kommen kann, wenn grobe Datenfehler vorliegen. Daher wurde die Balancierung begrenzt, d.h. die Gewichte werden nicht um den errechneten Betrag verändert, sondern um einen kleineren. Die Begrenzung ist dabei von mehreren Parametern abhängig. Außerdem werden verbleibende Schwingeffekte analysiert und durch Modifikation der Lösung aufgefangen.

Nach dieser balancierten Ausgleichung können fehlerhafte Messungen zuverlässig aufgedeckt und beseitigt werden. Sie haben auf die nachfolgenden Operationen keinen Einfluß mehr.

Eine detaillierte Beschreibung dieser begrenzt balancierten Ausgleichung wird an anderer Stelle veröffentlicht werden. Für den theoretischen Hintergrund der balancierten Ausgleichung siehe z.B. Kampmann /1995, 1994/.

Die praktischen Erfahrungen mit dieser balancierten Orientierung können als sehr gut bezeichnet werden. Bei normal konfigurierten Bildverbänden mit flächendeckender Aufnahme kommt es nicht zu Ausfällen. Lediglich bei „wilden“ Konfigurationen, bei denen zwar eine vollständige, aber keine systematische Objekterfassung vorliegt, kann es gelegentlich zunächst zu einer falschen relativen Orientierung kommen. Solche falschen Ergebnisse werden jedoch in der nächsten Bearbeitungsstufe, der Maßstabsanpassung, aufgedeckt und beseitigt.

Nach der ersten Modellorientierung im Block müssen alle weiteren Modelle im Block im Folgebildanschluß orientiert werden. Dabei ist nach den fünf Parametern der relativen Orientierung noch der Maßstab zu bestimmen. Dieser wird als Median aus den aktuellen Modellpunkten und den bereits im Block vorhandenen Punkten bestimmt. Da der Median von einzelnen oder einigen wenigen falschen Punkten nicht oder nur geringfügig beeinflusst wird, lassen starke Abweichungen der Maßstäbe bei einzelnen Punkten den Schluß zu, daß der Punkt nicht identisch ist mit den bereits im Block vorhandenen Punkten. Weicht der Maßstab in vielen Punkten erheblich ab, ist die Orientierung des neu hinzugekommenen Bildes zu verwerfen.

Diese Methode führt zu einer sicheren Blockbildung. Alternativ könnte man auch Einzelmodelle orientieren und durch eine 3D-Transformation in den Block hineinrechnen (Fellbaum /1994/). Die hier gewählte Methode ist jedoch deutlich stabiler, da die Orientierung beider Bilder eines Modells konstant bleibt.

6. Transformation der Blöcke

Nachdem alle Bilder einem Block zugeordnet sind, beginnt die 3D-Transformation der einzelnen Blöcke. Dazu wird zunächst der Graph der Blockverknüpfungen aufgebaut und dann die Blöcke mit den meisten gemeinsamen Punkten verbunden, wobei jeweils der Block mit der höheren Nummer auf den mit der niedrigeren Nummer transformiert wird. Anschließend erfolgt eine Vorausgleichung der Objektpunkte aus allen beteiligten Bildstrahlen im Block. Dabei kommen auch neue Punkte zum Block hinzu, so daß der Graph aktualisiert werden muß. Anschließend

erfolgt die nächste Transformation, bis alle Daten in den Block Nr. 1 transformiert sind.

Bei diesen Transformationen sind Suche und Elimination grober Fehler ebenso eingeschlossen wie bei der Vorausgleichung der Objektpunkte mittels Vorwärtsschnitt. Dabei könnte jeweils auch wieder die balancierte Ausgleichung eingesetzt werden (geplant).

7. Ausgabe der Ergebnisse

Nach den Berechnungen werden Bildorientierungen und Punktkoordinaten auf ASCII-File ausgegeben. Da die Bilddrehungen programmintern nur mit Drehmatrizen dargestellt werden, ist für die Ausgabe eine Umrechnung in Drehwinkel erforderlich. Dabei wird automatisch zwischen terrestrischen Aufnahmen und Luftbildern unterschieden. Die Definition der Drehwinkel ist nachzulesen bei Kruck /1983/.

Weiter wird eine Liste der eliminierten Bildmessungen und Paß- bzw. Verknüpfungspunkten ausgegeben, die zur Berichtigung der Messungsdaten benutzt werden kann.

8. Praktische Erfahrungen mit terrestrischen Blöcken

Das überarbeitete und mit der balancierten Ausgleichung ausgestattete Programm wurde an 22 terrestrischen Blöcken erprobt. Die Blöcke waren im Originalzustand der Messungen und enthielten die in der Praxis aufgetretenen Fehler.

Zwei dieser Blöcke sind sehr klein. Sie haben nur 2 bzw. 5 Bilder. Datenfehler sind nicht enthalten. Die Orientierung mittels RELAX-B ist so gut, daß die nachfolgende Ausgleichung fast eingespart werden könnte.

17 dieser Blöcke haben je 20 bis 50 Bilder. Die Aufnahmen stammen aus der Automobilindustrie und aus dem Maschinenbau. In der Automobilindustrie sind die Bilder in Stereoanordnung aufgenommen und dienen einer nachfolgenden Auswertung der Fahrzeugoberfläche. Die Aufnahmen aus dem Maschinenbau erfassen unterschiedliche Objekte mit räumlicher Ausdehnung, die von mehr als einer Seite aufgenommen wurden. Die Anordnung dieser Aufnahmen ist regelmäßig. Zwei dieser 17 Blöcke wurden zur Kalibrierung einer Kamera angelegt. Bei diesen Blöcken kamen unterschiedlichste Kameras zum Einsatz: Digitale Kameras mit großem (UMK-Scan), mittlerem und kleinem Bildformat, sowie Film- und Plattenkameras unterschiedlicher Formate. Bei allen 17 Blöcken konnte RELAX-B

alle Bildorientierungen mit einem Versuch richtig bestimmen, d.h., die Beschaffung der Orientierungsdaten dauert auf einem modernen PC jeweils knapp eine Minute. Soweit Punkte nicht von RELAX-B als fehlerhaft erkannt wurden, war die Bereinigung im nachfolgenden BINGO-Lauf problemlos möglich.

Drei der 22 Blöcke sind etwas größer und haben 110, 150 und 220 Bilder. Der Block mit 110 Bildern stammt aus dem Schiffbau. Hier ist eine Bildnummer doppelt vergeben. Dies erkennt das Vorverarbeitungsprogramm BISO. Danach wurden mit RELAX-B die Näherungsorientierungen trotz einiger grober Fehler sehr gut bestimmt. Von den 20 im Block enthaltenen Datenfehlern wurden die 12 größten von RELAX-B gemeldet. Danach waren nur noch 8 kleinere Datenfehler in der Blockausgleichung zu beseitigen.

Die Blöcke mit 150 und 220 Bildern stammen aus dem Stahl- und Anlagenbau und dienen der Punktbestimmung. Sie sind mit Mittelformatkameras aufgenommen und sehr inhomogen. Die Aufnahmerichtungen zeigen aufgrund der örtlichen Gegebenheiten kreuz und quer durch den Raum und haben unterschiedlichste Bildmaßstäbe. Sowohl grobe Punktverwechslungen als auch Paßpunktfehler erschweren die Auswertung. Bei beiden Blöcken waren 6 bis 8 Stunden Arbeitszeit erforderlich, um mit Hilfe von RELAX-B und BINGO Orientierung und Blockausgleichung durchzuführen. Diese Arbeiten erfordern nach wie vor den einfühlsamen Photogrammeter und können - im Sinne einer vollständigen Automation - noch nicht vom photogrammetrischen Laien bearbeitet werden. Es ist dabei jedoch anzumerken, daß die Arbeiten mit der alten Version von RELAX etwa eine Woche in Anspruch genommen haben.

9. Praktische Erfahrungen mit Luftbildern

Weiter wurde das neue RELAX-B an 7 unterschiedlichen Luftbildblöcken erprobt. Die Anzahl der Bilder variiert dabei von 140 bis 650, die Querüberdeckungen sind 20, 30 und 60%. Der Block mit 30% Querüberdeckung ist über Watt-

gebiet geflogen und teilweise zunächst schwach verknüpft. Deshalb sind zusätzlich zwei Querstreifen und eine Hochbefliegung integriert.

Bei allen Blöcken rechnet RELAX-B die Näherungsorientierungen sofort nach Wahl der richtigen Parameter (MINCO, CLIP), bzw. deckt enthaltene grobe Fehler wie doppelt vergebene Punktnummern, Punktverwechslungen und Paßpunktfehler auf.

Von diesen 7 Blöcken liegen leider nur noch für drei die Messungen im fehlerbehafteten Originalzustand vor. Deshalb wurden verschiedene Fehler simuliert. Punkte wurden falsch numeriert, so daß dieselben Punktnummern in ganz unterschiedlichen Blockteilen auftreten. Weiter wurden Bildmessungen verfälscht und ein Paßpunktfehler von einem Kilometer bei mehreren Blöcken in der Blockmitte und am Blockrand eingeführt.

Bis auf eine Ausnahme wurden die Fehler identifiziert: Beim oben beschriebenen Watt-Block ist der 1-km-Paßpunktfehler in der Blockmitte nicht erkennbar. Die Blocktransformation zeigt zwar grobe Fehler, der falsche Punkt wird jedoch nicht identifiziert.

10. Zusammenfassung

Die durchgeführten grundlegenden Verbesserungen am Programm RELAX erhöhen die Zuverlässigkeit der berechneten Näherungsorientierungen ganz erheblich. Die Ergebnisse der praktischen Arbeiten belegen damit gleichzeitig die Effizienz der neu entwickelten mathematischen Ansätze. Sowohl bei Luftbildblöcken als auch bei terrestrischen Aufnahmen können, bei einigermaßen regelmäßiger Bildanordnung, sehr schnell die Fehler erkannt und die Näherungsorientierungen berechnet werden.

Gleichzeitig wurde sichtbar, daß die neue begrenzt balancierte Ausgleichung auch für die Blocktransformation und für die Ausgleichung der Punktkoordinaten aus Vorwärtsschnitten eingesetzt werden sollte. Hier bestehen weitere Möglichkeiten, das Programm im Sinne der geforderten Automatisierung weiterzuentwickeln.

References

Kampmann, G., Petri, M. und Spata, M.: Kombinatorische Norm-Schätzung bei 2D-Transformationen im nordrhein-westfälischen ALK-Vorverarbeitungsprogramm DIVA. NÖV Nachrichten aus dem öffentlichen Vermessungsdienst Nordrhein-Westfalen. Heft 2, 1994.

Kruck, E.: Lösung großer Gleichungssysteme für photogrammetrische Blockausgleichungen mit erweitertem funktionalen Modell. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 128. Dissertation 1983.

Van Den Hout, C.M.A., and Stefanovic, P.: Efficient analytical relative Orientation. Presented paper, ISP Commission III, Helsinki 1976.