

# Geometrische Genauigkeitsstudie im Rahmen des DGPF-Projekts zur Evaluierung digitaler Kamerasysteme

RICHARD LADSTÄDTER<sup>1</sup> & VIKTOR KAUFMANN<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Das Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie an der Technischen Universität Graz nahm innerhalb der Arbeitsgruppe „Geometrische Genauigkeit und Auflösungsvermögen“ (Leitung und Koordination: Dr. Karsten Jacobsen, Leibniz Universität Hannover) an dem DGPF-Projekt „Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamerasysteme“ teil. Die Passpunktmessung und automatisierte Aerotriangulation wurde mit der ISAT-Software von Intergraph durchgeführt. Der Bündelausgleich und die Genauigkeitsanalyse erfolgte dann mit der institutseigenen Software PhoBA. Dieser Beitrag präsentiert erste Ergebnisse dieser Auswertungen, wobei bis zum jetzigen Zeitpunkt nur die Kamerasysteme RMK-Top15 und DigiCAM-quattro analysiert werden konnten (Stand: März 2009).*

## 1 Einleitung

Im Zuge des DGPF-Projekts „Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamerasysteme“ wurden im Sommer 2008 mit mehreren Kamerasystemen über dem Testgebiet Vaihingen/Enz bei Stuttgart Testprojekte geflogen. Neben großformatigen Flächenkameras (UltraCamX, DMC), Zeilenkameras (ADS 40, JAS-150) nahmen auch Mittelformatkameras (DigiCAM-quattro, AIC-x4) und eine analoge Filmkamera (RMK-Top15) an diesem umfassenden Vergleich teil (vgl. CRAMER et al. 2009).

### 1.1 Verwendete Datensätze

Wie aus Tab. 1 ersichtlich wurden zunächst drei Datensätze (UltraCamX, DMC und DigiCAM-quattro) von der Projektleitung angefordert. Aufgrund der verzögerten Datenfreigabe der UltraCam- und DMC-Daten (15.12.) wurde schließlich am 3.12. auf beide Datensätze vorläufig verzichtet und stattdessen der RMK-Top15-Datensatz angefordert. Die beiden Datensätze RMK und DigiCAM wurden schließlich am 10.12.2008 auf externer Festplatte geliefert. Das Projekt konnte damit erst Mitte Dezember in Angriff genommen werden. Die Auswertung der Datensätze der UltraCamX, DMC und Rolleimetric wird daher zu einem späteren Zeitpunkt nachgeholt.

Kamerasystem	Hersteller	Flugfirma	Flugtag	Bestellung	Lieferung
UltraCamX	Vexcel Imaging	Bsf Swissphoto	11.9.2008	1.9.2008	-
DMC	Intergraph/ZI	RWE Power	24.7 / 6.8.2008	1.9.2008	-
DigiCAM	IGI	Geoplana	6.8.2008	1.9.2008	10.12.2008
RMK-Top15	Intergraph/ZI	RWE Power	24.7 / 6.8.2008	3.12.2008	10.12.2008
AIC-x4	Rolleimetric	Vulcan Air	19.9.2008	3.12.2008	-

Tab. 1: Übersicht über die angeforderten Datensätze

1) Dr. Richard Ladstädter, Laboratoriumstrasse 29b, 8053 Graz,

E-Mail: [richard.ladstaedter@alumni.TUGraz.at](mailto:richard.ladstaedter@alumni.TUGraz.at)

2) Dr. Viktor Kaufmann, Technische Universität Graz, Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie,

Steyrergasse 30/I, 8010 Graz; E-Mail: [viktor.kaufmann@tugraz.at](mailto:viktor.kaufmann@tugraz.at)

## 1.2 Verwendete Software

Für die Passpunktmessung und die automatisierte Messung der Verknüpfungspunkte kam für beide Auswertungen (RMK, DigiCAM) die Software ISAT (ImageStation Automatic Triangulation v5.3.1.0) von Z/I Imaging zum Einsatz. Für die eigentliche Bündelausgleichung und die Genauigkeitsanalyse wurde das Programm PhoBA (Photogrammetric Bundle Adjustment) v1.2 eingesetzt (siehe Abb. 1), da es für die gegenständliche Aufgabenstellung einen besser geeigneten Satz zusätzlicher Parameter (wie z.B. radialsymmetrische Verzeichnungsparameter) und umfangreichere Analysemöglichkeiten als ISAT aufweist. Der Export aus ISAT nach PhoBA erfolgte über die BINGO-Schnittstelle.

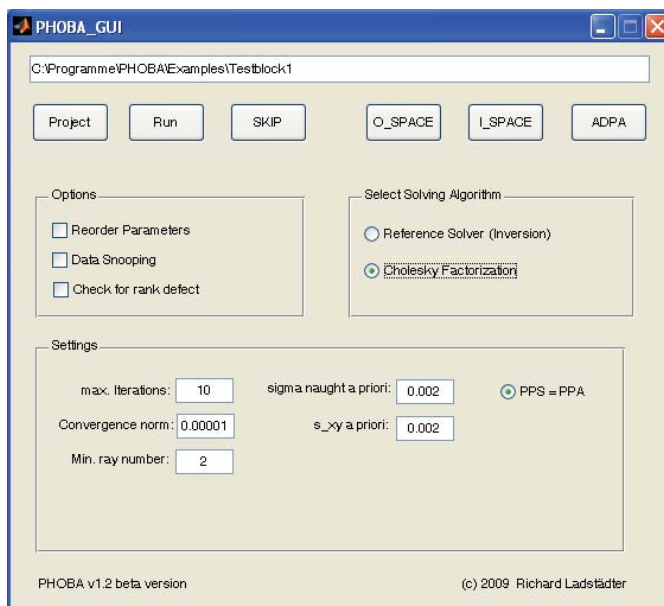


Abb. 1: Graphische Benutzeroberfläche der Bündelausgleichssoftware PhoBA

Die Software PhoBA wurde ursprünglich (2007 bis Herbst 2008) am Institut für Fernerkundung und Photogrammetrie in MATLAB entwickelt (LADSTÄDTER 2007) und lehnt sich im Datenformat und in der Rechentechnik stark an das Vorbild BINGO (GIP Aalen, Dr. E. Kruck) an. Der gewählte Lösungsansatz entspricht dem für BINGO entwickelten Algorithmus (KRUCK 1983). Damit lassen sich auch größere Bildblöcke (bis etwa 500 Bilder) im Hauptspeicher schnell und effizient lösen.

## 1.3 Vorverarbeitung der Bilddaten

Die Bilddaten der RMK (8bit) und DigiCAM (16bit) lagen im TIF-Format vor und enthielten bereits Bildpyramiden. Um eine optimale Bildqualität zu gewährleisten wurden die Bildpyramiden mit dem ISAT-Utility *mr\_file* neu berechnet. Die Pyramiden wurden mittels Gauss-Filter erstellt und mit LZW verlustfrei komprimiert. Die so erhaltene Datenmenge pro Bild wird dadurch bei der DigiCAM nur geringfügig größer (356MB) bzw. bei der RMK sogar etwas kleiner (1GB).

## 2 Photogrammetrische Auswertung

### 2.1 Analoge Kamera RMK-Top15 / Intergraph

Beide Teilprojekte (8cm und 20cm GSD) der RMK-Top15 konnten dank der gegebenen Näherungsorientierung problemlos in ISAT aufgesetzt werden. In ISAT wurden dann die vorgegebenen Pass- und Kontrollpunkte manuell eingemessen und anschließend die automatisierte Messung der Verknüpfungspunkte durchgeführt.

#### 2.1.1 Projektparameter

Der niedrige Flug (8cm GSD) umfasst 74 Bilder in fünf Längs- und zwei Querstreifen mit einer Längs- bzw. Querüberdeckung von 60% bzw. 70% (siehe Abb. 2, links). Das Filmmaterial vom Typ Agfa X-100 Colornegativ wurde mit 14µm Auflösung gescannt.

Der hohe Flug (20cm GSD) hingegen umfasst nur 47 Bilder in drei Längs- und zwei Querstreifen bei gleicher Längs- und Querüberdeckung (siehe Abb. 2, rechts). Das Filmmaterial vom Typ Kodak MS 14443 Color Infrared wurde ebenfalls mit 14µm Auflösung gescannt. Beide Projekte enthalten 77 Kontrollpunkte aber eine unterschiedliche Passpunktanzahl (61 bzw. 110 Passpunkte).

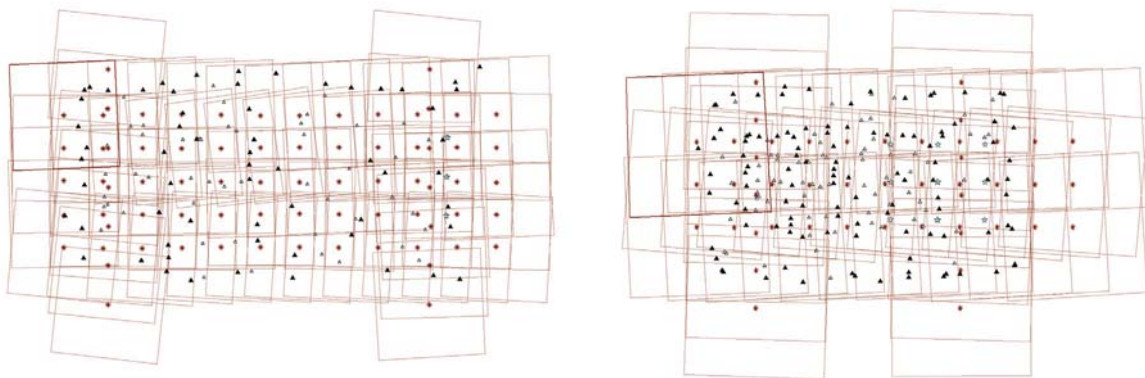


Abb. 2: Blockkonfiguration für den 8cm-Flug (links) bzw. 20cm-Flug der RMK-Top15

#### 2.1.2 Passpunktmessung

Aufgrund der höheren Auflösung konnten die Passpunkte im 8cm-Projekt gut und zuverlässig eingemessen werden (vgl. Pkt. 2474 in Abb. 3 links und Abb. 4 links). Die Mehrzahl der Punkte ist aufgrund der weißen Markierung sehr gut erkennbar (vgl. Abb. 3, rechts). Insgesamt konnten mit ISAT 59 Pass- und 56 Kontrollpunkte im 8cm-Projekt eingemessen werden.

Aufgrund des „Kornrauschens“ und der relativ geringen Auflösung waren die Passpunkte im 20cm-Projekt teilweise wesentlich schlechter zu identifizieren (vgl. Abb. 4, links). Auch kontrastreiche Punkte (vgl. Abb. 4, rechts) weisen keine scharfen Konturen auf. Dennoch konnten 82 Pass- und 67 Kontrollpunkte gemessen werden.



Abb. 3: Sichtbarkeit der Passpunkte (RMK-Top15, 8cm GSD)

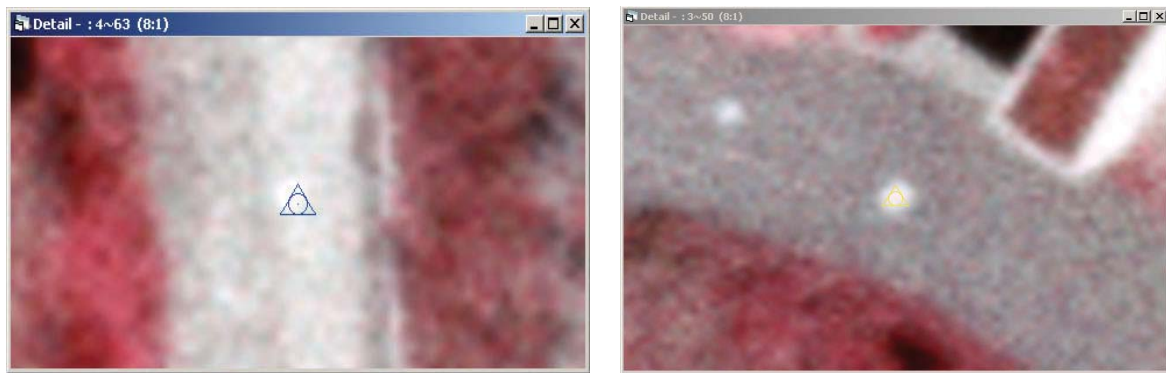


Abb. 4: Sichtbarkeit der Passpunkte (RMK-Top15, 20cm GSD)

### 2.1.3 Automatisierte Messung der Verknüpfungspunkte

Die automatisierte Messung der Verknüpfungspunkte war mit ISAT problemlos möglich und ergab im Mittel 140 Punkte pro Bild (8cm GSD) bzw. 250 Punkte pro Bild (20cm GSD). Nach einer ersten Triangulation in ISAT wurden die Projekte im BINGO-Format exportiert und mit dem Bündelausgleichsprogramm PhoBA weiter analysiert.

## 2.2 DigiCAM-quattro / IGI

Aufgrund der im Folgenden beschriebenen Probleme mit der automatischen Tiepoint-Messung wurde bis zum jetzigen Zeitpunkt nur das 20cm-Projekt der DigiCAM-quattro trianguliert. Für die näherungsweise Orientierung der insgesamt 188 Bilder wurden direkt die GPS/IMU-Daten verwendet. Durch die sehr gute Genauigkeit dieser Daten wurde die Passpunktmessung wesentlich erleichtert.

### 2.2.1 Projektparameter

Der hohe Flug (20cm GSD) umfasst 47 Aufnahmen (188 Bilder) in drei Längs- und zwei Querstreifen bei 60% Längs- und 70% Querüberdeckung (siehe Abb. 5). Das Projekt enthält 77 Kontrollpunkte und 110 Passpunkte.

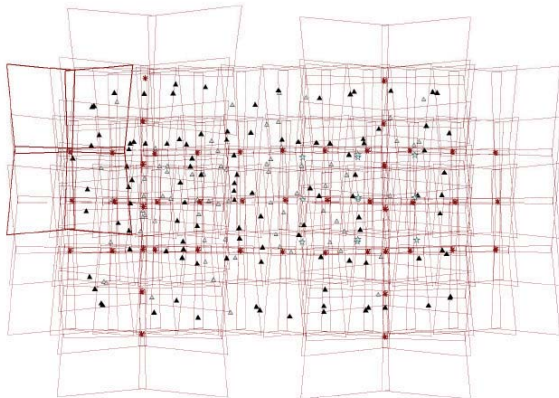


Abb. 5: Blockkonfiguration für den 20cm-Flug (DigiCAM-quattro)

### 2.2.2 Passpunktmessung

Trotz des teilweise etwas unscharfen Bildmaterials konnten fast alle Passpunkte bzw. Kontrollpunkte erfolgreich eingemessen werden. Dabei war die Farbtiefe von 16bit in kontrastarmen Bereichen sehr hilfreich, da durch Histogramm-Anpassung auch schwer sichtbare Punkte noch sichtbar gemacht werden konnten (siehe Abb. 6).

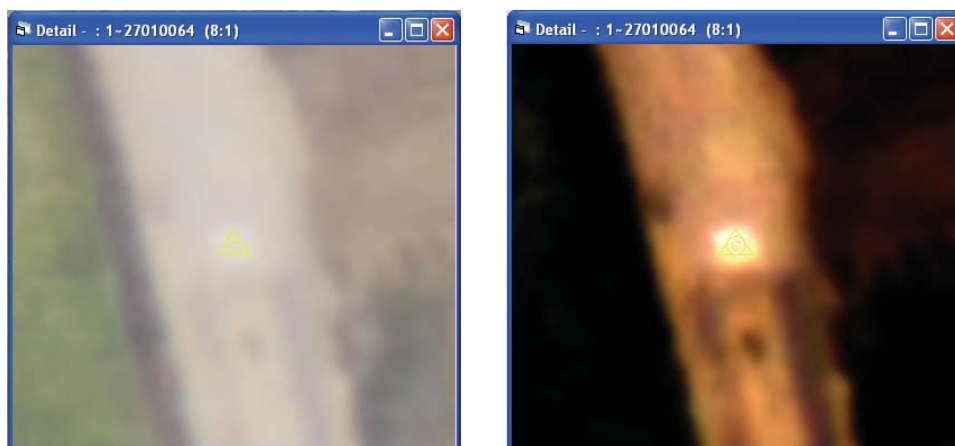


Abb. 6: Sichtbarkeit der Passpunkte (DigiCAM-quattro, 20cm) vor und nach Histogramm-Stretch (rechts)

### 2.2.3 Manuelle Messung der Verknüpfungspunkte

Leider war die automatisierte Messung der Verknüpfungspunkte in ISAT nicht möglich. Der Grund liegt in der Matching-Strategie von ISAT, die von Normalfallaufnahmen und gleichmäßiger Überlappung im Streifen ausgeht. Auch zahlreiche Experimente mit Ummummerungen der Streifen bzw. Bilder brachten keinen Erfolg. Aus diesem Grund musste auf eine sehr zeitintensive manuelle Messung der Verknüpfungspunkte zurückgegriffen werden. Zu diesem Zweck wurde ein regelmäßiges Raster von (Pseudo-) Kontrollpunkten über das gesamte Gebiet gelegt. In den Bildern wurde dann jeweils ein markantes Feature in der Nähe

dieses Punktes ausgewählt und in allen betroffenen Bildern manuell mit LSM-Unterstützung eingemessen. Insgesamt wurden so in ca. 25 Arbeitsstunden 205 Verknüpfungspunkte generiert.

### 2.3 Bündelausgleich mit PhoBA

Nach dem Datenexport der drei Projekte wurden entsprechende Bündelausgleiche mit dem Programm PhoBA durchgeführt. Folgende a priori Genauigkeiten wurden angenommen:

- Bildmessung:  $\pm 5\mu\text{m}$  (RMK) bzw.  $\pm 3\mu\text{m}$  (DigiCAM)
- Passpunkte:  $\pm 2\text{cm}$  (Lage),  $\pm 3\text{cm}$  (Höhe)
- GPS-Daten:  $\pm 10\text{cm}$  (Lage),  $\pm 10\text{cm}$  (Höhe)
- IMU-Daten:  $\pm 1\text{mgon}$

Für die Selbstkalibrierung wurde ein Subset des Brown'schen Parametersatzes gewählt:

1. Brennweitenkorrektur
2. Hauptpunkt  $x_0, y_0$
3. balancierte radialsymmetrische Verzeichnung, Koeffizienten  $A_1$  und  $A_2$

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Analoge Kamera RMK-Top15

Die beiden RMK-Top15-Projekte weisen eine hohe Redundanz (11600 bzw. 17000) und eine sehr gute innere Genauigkeit auf (siehe Tab. 2). Der mittlere Gewichtseinheitsfehler a posteriori ( $\sigma_0$ ) lag bei 5.0. Aufgrund der wesentlich höheren durchschnittlichen Strahlenanzahl sind die Kontrollpunkte um 50% genauer als die automatisch gemessenen Verknüpfungspunkte.

Punktart	GSD 8cm			GSD 20cm		
	X [cm]	Y [cm]	Z [cm]	X [cm]	Y [cm]	Z [cm]
Verknüpf.punkte:	$\pm 2.0$	$\pm 2.2$	$\pm 4.5$	$\pm 4.8$	$\pm 5.1$	$\pm 10.6$
Passpunkte:	$\pm 1.2$	$\pm 1.2$	$\pm 2.0$	$\pm 1.6$	$\pm 1.6$	$\pm 2.5$
Kontrollpunkte:	$\pm 1.3$	$\pm 1.3$	$\pm 2.7$	$\pm 2.5$	$\pm 2.7$	$\pm 5.0$

Tab. 2: Geschätzte Varianzen der Objektpunkte (aus Qxx)

Die GPS-Residuen zeigen eine zufriedenstellende äußere Genauigkeit (siehe Tab. 3). Die a priori Genauigkeit der Passpunkte wird ebenfalls reproduziert. Die von der Projektleitung in Stuttgart berechneten Residuen der Kontrollpunkte ergeben (bereinigt um systematische Anteile) eine Genauigkeit von ca.  $\frac{1}{4}$  Pixel in der Lage und  $\frac{1}{2}$  Pixel in der Höhe.

RMS Restklaffen	GSD 8cm			GSD 20cm		
	X [cm]	Y [cm]	Z [cm]	X [cm]	Y [cm]	Z [cm]
GPS-Positionen:	$\pm 8.3$	$\pm 7.2$	$\pm 3.7$	$\pm 10.3$	$\pm 12.5$	$\pm 6.6$
Passpunkte:	$\pm 1.4$	$\pm 1.3$	$\pm 2.6$	$\pm 2.3$	$\pm 2.3$	$\pm 3.2$
Kontrollpunkte:	$\pm 2.1$	$\pm 2.0$	$\pm 4.4$	$\pm 3.8$	$\pm 4.0$	$\pm 10.3$

Tab. 3: Restklaffen der GPS-Positionen, Pass- und Kontrollpunkte

Die berechneten zusätzlichen Parameter sind in Tab. 4 angegeben. Die relativ großen Abweichungen der Brennweite bzw. des Hauptpunktes von der Kalibrierung lassen sich vermutlich auf Restfehler im GPS-Datums-Offset (Z-Komponente) bzw. der GPS-Antennenexzentrizität zurückführen. Die balancierte Verzeichnung ergibt innerhalb von 2/3 des maximalen Bildradius einen Maximalwert von nur 1µm (8cm GSD) bzw. 4µm (20cm GSD).

Parameter	GSD 8cm	GSD 20cm
c	153.948 mm ± 2.1 µm	153.938 mm ± 1.2 µm
x <sub>0</sub>	-0.005 mm ± 1.7 µm	-0.033 mm ± 1.1 µm
y <sub>0</sub>	0.014 mm ± 1.8 µm	0.021 mm ± 1.1 µm
A <sub>1</sub>	-6.616e-09 ± 6e-10	-9.801e-09 ± 5e-10
A <sub>2</sub>	3.120e-13 ± 3e-14	1.861e-13 ± 2e-14

Tab. 4: Zusätzliche Parameter der RMK-Top15

### 3.2 DigiCAM-quattro

Aufgrund der Probleme mit der automatischen Messung der Verknüpfungspunkte ist die Redundanz mit 4800 deutlich geringer als bei den RMK-Projekten. Der mittlere Gewichtseinheitsfehler a posteriori ( $\sigma_0$ ) lag bei 2.0. Die innere Genauigkeit der Objektpunkte ist in Tab. 5 angegeben:

Punktart	X [cm]	Y [cm]	Z [cm]
Verknüpfungspunkte:	± 3.8	± 4.3	± 11.5
Passpunkte:	± 1.2	± 1.2	± 1.9
Kontrollpunkte:	± 2.5	± 2.8	± 7.4

Tab. 5: Geschätzte Varianzen der Objektpunkte (aus Qxx)

Die von der Projektleitung in Stuttgart berechneten Residuen der Kontrollpunkte ergeben (bereinigt um systematische Anteile) ebenfalls eine Genauigkeit von ca. ¼ Pixel in der Lage und ½ Pixel in der Höhe, wobei die Lagegenauigkeit etwas schlechter und die Höhengenaueigkeit etwas besser als bei der RMK-Top15 ist (siehe Tab. 6).

RMS Restklaffen	X / φ	Y / ω	Z / κ
GPS-Positionen:	± 6.5 cm	± 5.4 cm	± 3.7 cm
IMU-Winkel:	± 0.3 mgon	± 0.4 mgon	± 0.5 mgon
Passpunkte:	± 1.2 cm	± 1.4 cm	± 5.8 cm
Kontrollpunkte:	± 4.9 cm	± 5.3 cm	± 7.5 cm

Tab. 6: Restklaffen der GPS/IMU-Messungen, Pass- und Kontrollpunkte

Die berechneten Parameter der inneren Orientierung (Brennweite und Hauptpunkt) stimmen sehr gut mit den von IGI angegebenen Werten überein (siehe Tab. 7). Die berechnete Verzeichnung der vier Kameraköpfe ist ebenfalls sehr klein (etwa 1µm). Da die Kalibrierwerte (vermutlich) aus einer Feldkalibrierung stammen, ist diese sehr gute Übereinstimmung durchaus plausibel.

Parameter	Kamera 124	Kamera 125	Kamera 126	Kamera 127
c	82.165 mm	81.988 mm	81.814 mm	81.782 mm
$x_0$	-0.250 mm	0.096 mm	-0.185 mm	0.160 mm
$y_0$	0.019 mm	0.143 mm	-0.009 mm	0.417 mm
$A_1$	-4.9228e-007	-7.210e-07	-6.934e-07	-4.909e-07
$A_2$	4.7457e-010	4.285e-10	8.225e-10	6.017e-10

Tab. 7: Zusätzliche Parameter der DigiCAM-quattro

## 4 Schlussfolgerungen

Die Verwendung physikalisch begründeter zusätzlicher Parameter nach Brown hat sich speziell bei den RMK-Top15-Projekten sehr bewährt. Eine deutliche systematische Aufwölbung des Blocks, die trotz Verwendung der zwölf Ebner-Parameter (EBNER 1976) in ISAT beobachtet werden kann, tritt dann nicht mehr auf. Da auch die unregelmäßigen Bildfehler durch Filmverzug (hier in der Größenordnung von  $5\mu\text{m}$ ) nicht modelliert werden können, haben die Ebner-Parameter bei der aus der automatisierten Bildmessung resultierenden hohen Punktdichte ihre Bedeutung weitgehend verloren.

Das Konzept der vier unabhängigen Kameraköpfe der DigiCam-quattro erlaubt zwar einerseits sehr gute Genauigkeiten, führt aber andererseits zu Problemen bei der Verwendung von Standard-Software für die automatische Triangulierung. Weiters muss damit gerechnet werden, dass Punkte in den schmalen Überlappungszonen der vier Teilbilder zu numerischen Problemen aufgrund der geringen Basis führen. Interessant wäre daher auch die Ableitung eines virtuellen Bildes aus den vier Teilbildern, was zwar geometrisch weniger korrekt wäre, aber das Handling innerhalb der automatisierten Aerotriangulation stark erleichtern würde.

## 5 Literaturverzeichnis

- BROWN, D., 1971: Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37 (8), 855-866.
- CRAMER, M., KRAUß, H., JACOBSEN, K., SCHÖNERMARK, M., HAALA, N. & SPRECKELS, V., 2009: Das DGPF-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme. In: Tagungsband 18 / 2009, Jahrestagung DGPF Jena, in diesem Band.
- EBNER, H., 1976: Self-calibrating block adjustment. *Congress of the International Society for Photogrammetry*, Invited Paper of Commission III, Helsinki, Finland, BuL 4/1976, S. 128-139.
- KRUCK, E., 1983: Lösung großer Gleichungssysteme für photogrammetrische Blockausgleichungen mit erweitertem funktionalen Modell. Diss., *Wiss. Arbeiten d. Univ. Hannover*, Band 128, 145 S.
- LADSTÄDTER, R., 2007: Das Programmpaket PhoBA: Dokumentation der MATLAB-Implementierung. Manual, 39 S.