

## Addendum

# Das DGPF-Projekt zur Evaluierung digitaler photogrammetrischer Kamerasysteme

**MICHAEL CRAMER<sup>1</sup>, HERBERT KRAUß<sup>2</sup>, KARSTEN JACOBSEN<sup>3</sup>, MARIA VON SCHÖNERMARK<sup>4</sup>,  
NORBERT HAALA<sup>5</sup> & VOLKER SPRECKELS<sup>6</sup>**

*Ergänzung zum Beitrag im Konferenzband*

*In Ergänzung zu dem bereits im Tagungsband publizierten Bericht mit den dort vorgestellten Ergebnissen sollen hier Resultate der Untersuchungen zur Absolutgenauigkeit an unabhängigen Kontrollpunkten nachgereicht werden. Bisher sind nur innere Genauigkeiten angegeben worden. Um eine in sich geschlossene Darstellung zu erhalten wird das bereits im Tagungsband publizierte Kapitel 5 des Berichts an dieser Stelle in ergänzter Version vollständig aufgeführt.*

## 5 Sollorientierung für die Höhenmodellgenerierung

Die Arbeitsgebiete Höhenmodelle / Stereoplotting und in gewissem Maße auch Untersuchungen im Bereich Radiometrie (BRDF-Analysen) setzen auf orientierten Bilddaten auf. Die Georeferenzierung und umfassende Analyse der geometrischen Genauigkeit im Rahmen der AT ist der Schwerpunkt des Arbeitspakets Geometrie (siehe oben). Um aber auch für die DHM-Generierung möglichst bald mit den praktischen Auswertungen beginnen zu können, andererseits aber auch die Vergleichbarkeit der später von unterschiedlichen Institutionen generierten Produkte zu ermöglichen, ist für alle Datensätze eine Soll-Orientierung zur Verfügung zu stellen. Sie beruht auf einer Aerotriangulation mit manuell und automatisch gemessenen Punkten unter Verwendung aller Passinformationen im Objektraum. Selbstkalibrierung wird mit den klassischen Parametersätzen realisiert. In wie fern andere wie z.B. sensor-spezifisch angepasste Auswertemodelle bessere Ergebnisse liefern, wird in den Arbeiten des Auswerteschwerpunkts Geometrie untersucht.

---

<sup>1</sup> M. Cramer, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart, E-Mail: michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de

<sup>2</sup> H. Krauß, RWE Power AG, Abt. PBT-P Geobasisdaten/Photogrammetrie, Stüttgenweg 2, 50935 Köln, E-Mail: herbert.krauss@rwe.com

<sup>3</sup> K. Jacobsen, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Leibniz Universität Hannover, Nienburger Str. 1, 30167 Hannover, Email: jacobsen@ipi.uni-hannover.de

<sup>4</sup> M. von Schönemark, Institut für Raumfahrtsysteme, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, E-Mail: schoenermark@irs.uni-stuttgart.de

<sup>5</sup> N. Haala, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart, E-Mail: norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de

<sup>6</sup> V. Spreckels, RAG AG Deutsche Steinkohle, Geschäftsbereich Geoinformation / Vermessung BG G, Shamrockring 1, 44623 Herne, Email: volker.spreckels@rag.de

Aufgrund fehlender standardisierter Schnittstellen können die in der AT bestimmten Zusatzkorrekturen vielfach nicht von den nachfolgenden Programmen übernommen werden. Einige AT-Programme erlauben die Erzeugung von Korrekturgittern, mit denen dann in der vorgesehenen Prozesskette weiter gearbeitet werden kann. Der Übergang in andere Softwarepakete ist meistens nicht vorgesehen. Alternativ besteht die Möglichkeit unter Anwendung der geschätzten Zusatzparameter neue Ausgangsbilder durch Resampling zu generieren, die dann quasi ideale fehlerfreie Bilder repräsentieren. Ein derartiger Ansatz wird z.B. im Nahbereich oder seitens Intergraph für die Berücksichtigung der Kollokationsgitter-Korrekturen in DMC-Bildern angewandt, erscheint hier aber aufgrund der Menge an Bilddaten zum jetzigen Zeitpunkt als nicht praktikabel.

Daher wurde letztlich folgender Ansatz für die Erzeugung der Soll-Orientierung umgesetzt: Zunächst wird eine Aerotriangulation mit Zusatzparametern (hier 44 Parametermodell nach Grün) unter Verwendung aller Passpunkte gerechnet. In dieser AT werden die signifikanten Zusatzparameter und die ausgeglichenen Objektpunkte berechnet. In einem zweiten Schritt wird dann eine AT gerechnet, die keine Zusatzparameter mehr ansetzt, aber um den Einfluss der Zusatzparameter korrigierte Bildkoordinaten verwendet. Als Passpunkte werden alle Passpunkte und ausgeglichenen Objektpunkte aus dem ersten Lauf als feste Beobachtung verwendet. Die sich hier ergebenden Orientierungsparameter liefern die zu nutzende Soll-Orientierung für die bildbasierte Generierung der Höhendaten. Teilweise wird dieses Verfahren auch mit dem Begriff einer absoluten Orientierung bezeichnet.

Für die flächenhaft aufzeichnenden Systeme DMC, DigiCAM und Ultracam-X wurde diese Soll-Orientierung vom ifp generiert. Die Bildblöcke GSD 20cm und GSD 8cm wurden jeweils getrennt behandelt. Berücksichtigt sind für jedes Kamerasystem die Geometriestreifen in Ost-West Flugrichtung und die beiden Querstreifen am Blockanfang und -ende gemäß Planungen. Die Tabelle 2 fasst die wesentlichen Ergebnisse der Ausgleichen zusammen. Angegeben sind jeweils die Ergebnisse der Ausgleichen, die unter Verwendung aller Passpunkte die signifikanten Parameter des 44-Parameter Korrekturpolynoms und die ausgeglichenen Geländekoordinaten der Objektpunkte liefert. Die Passpunkte sind mit einer Genauigkeit von 2cm eingeführt worden. Insgesamt stehen in Vaihingen/Enz ca. 180 signalisierte und über statische GPS-Messungen koordinierte Objektpunkte als Passpunkte zur Verfügung. Die durch die Gruppe der signifikant geschätzten Parameter erfassten maximalen Korrekturen an den 25 gleichmäßig verteilten Gitterpunkten im Bild sind angegeben. Da bei den Auswertungen der DigiCAM quattro Kamera jedes der 4 Teilbilder als Einzelbild betrachtet wurde, ist für jeden Kamerakopf ein eigenes Korrekturpolynom eingeführt worden. Die Angaben zur Redundanz, maximalen Verknüpfung und Anzahl der Blockpunkte erlauben eine Einschätzung der Blockgeometrie. Die größere Anzahl von Punkten und höhere Redundanz bei der DigiCAM wird durch die im Vergleich zu DMC und Ultracam-X deutlich kleineren Bildformate und damit größere Anzahl von Bildern verursacht. Zusätzlich beeinflussen auch die unterschiedlichen Überdeckungsverhältnisse der Bildblöcke die resultierende Anzahl von Verknüpfungen. Die GSD 20cm Blöcke wurden für alle hier untersuchten Digitalkamerasysteme mit 60% Längsüberdeckung geflogen, bei den GSD 8cm Flügen weisen Ultracam-X und DigiCAM-Bilder etwa 80% Längsüberdeckung, die DMC-Bilder aber nur 60% Längsüberdeckung auf. Im Falle der DigiCAM beziehen sich die Überdeckungsangaben auf die von den 4 Teilbildern abgedeckte

Gesamtfläche. Die Querüberdeckungen ergeben sich durch die unterschiedlichen Sensorformate ebenfalls leicht unterschiedlich, da in den Flugplanungen der Streifenabstand auf die Querausdehnung des Testfeldes angepasst wurde. Bei DMC und DigiCAM wurden RGB-Bilder (48 bit Grauwerttiefe) verwendet, für Ultracam-X standen PAN-Bilder (8 bit Grauwerttiefe) zur Verfügung.

Block	$\sigma_0$		# Block-punkte	Redun-danz	Max. Verknüp-fung	# sign. Zusatz-parameter	Max. Korrektur im Bild [ $\mu\text{m}$ ]	
	Bild [ $\mu\text{m}$ ]	Objekt [m]					DX	DY
DMC GSD 8cm	1,49	0,011	9651	80371	13	44	2,23	1,30
DMC GSD 20cm	1,98	0,036	5432	49366	12	10	5,39	3,54
Ultracam-X GSD 8cm	0,95	0,011	6049	109906	28	6	0,72	0,96
Ultracam-X GSD 20cm	1,07	0,031	4729	43932	12	4	0,49	1,13
DigiCAM quattro GSD 8cm	0,99	0,013	30872	629043	33	3 (1)	1,11	0,94
						9 (2)	1,59	2,32
						3 (3)	0,99	1,40
						4 (4)	1,83	1,51
DigiCAM quattro GSD 20cm	1,28	0,039	20501	192240	18	3 (1)	1,05	1,15
						10 (2)	1,89	2,45
						4 (3)	0,92	1,09
						6 (4)	2,15	1,23

Tabelle 2: Aerotriangulation mit 44 Parameter Modell nach Grün

Die gegebenen Werte für  $\sigma_0$  repräsentieren die Genauigkeit der Strahlenschnitte nach der Ausgleichung und sind somit ein Maß für die innere Systemgenauigkeit. Sie lassen zunächst noch keine Aussage über die Absolutgenauigkeit zu. Alle Kamerasysteme erzielten aber sehr ähnliche Werte. Die durch die zusätzlichen Parameter im Bildraum hervorgerufenen Korrekturen sind leicht unterschiedlich. Den größten Einfluss haben die Werte im Block DMC GSD 20cm. Die Korrekturen dort unterscheiden sich deutlich von den kleineren Korrekturen des DMC GSD 8cm Blocks. Diese Unterschiede waren aufgrund der Anwendung einer herstellerseitigen vorab durchgeführten Kollokationsgitterkorrektur auf die Bilder des DMC GSD 8cm Blocks zu erwarten. Die verbleibenden systematischen Effekte in den Bildern sind kleiner. Interessanterweise sind für den GSD 8cm Block im Vergleich zu den anderen Auswertungen deutlich mehr signifikante Zusatzparameter zur Bestimmung der Restsystematik notwendig, wobei die Bestimmbarkeit von signifikanten Termen immer auch stark abhängig von der individuellen Blockgeometrie ist. Insgesamt sind die Korrekturen für alle Systeme im deutlichen Sub-Pixelbereich.

Wie bereits zuvor beschrieben sind die hier bestimmten Korrekturen an den gemessenen Bildkoordinaten angebracht und als Grundlage für die Ausgleichung zur Schätzung der Soll-Orientierungselemente verwendet worden. Für den DMC-Datensatz wurde exemplarisch nachgewiesen, dass die DHM-Generierung unter Verwendung der auf den vorab korrigierten Bildkoordinaten basierenden Orientierungselementen zu besseren Ergebnissen führt, vor allem wenn wie beim DMC GSD 20cm Block durch die Zusatzparameter größere Effekte kompensiert werden.

Die bisherigen AT-Auswertungen lassen keine Bestimmung von Absolutgenauigkeiten im Objektraum zu, da bislang alle zur Verfügung stehenden signalisierten und koordinierten Objektpunkte als Passpunkte berücksichtigt wurden. Nachfolgend sind daher Auswertungen mit geringerer Passpunktanzahl vorgenommen worden. Für die GSD 20cm Blöcke wurden 70, für die GSD 8cm Blöcke 60 Passpunkte verwendet. Die Passpunkte sind in dichter Randbesetzung und 5 Vollpasspunktketten angeordnet. Bezogen auf die Blockgröße ergibt sich somit immer noch eine sehr dichte Passpunktverteilung. Da zudem die bereits um systematische Fehler korrigierten Bildkoordinaten als Beobachtungen eingeführt wurden (siehe vorangegangene Auswertungen in Tabelle 2), reflektieren die erzielten Genauigkeiten eine *Abschätzung des Sensorpotenzials unter optimalen Bedingungen* und sind vermutlich nur mit Einschränkungen auf spätere operationelle Bildflüge zu übertragen. Neben den Passpunkten und a priori korrigierten Bildkoordinaten wurden keine weiteren Beobachtungen (z.B. direkt beobachtete Orientierungselemente) oder unbekanntem Zusatzparameter in die AT eingeführt.

Die Tabellen 3 und 4 zeigen die Ergebnisse getrennt für die GSD 20cm bzw. GSD 8cm Blöcke. Angegeben sind jeweils die RMS-Werte aus den Kontrollpunktdifferenzen und die theoretische Genauigkeit (Std.Abw.) der Punktbestimmung aus der Ausgleichung. Die Resultate der drei untersuchten Digitalkameras werden den Resultaten aus den RMK-Top Flügen gegenübergestellt. Systemübergreifende Vergleiche sind aber nur bedingt möglich, da die unterschiedlichen Blockkonfigurationen und Aufnahmebedingungen der jeweiligen Flugtage immer zu berücksichtigen sind!

Block	Anzahl PP / KP	$\sigma_0$ [ $\mu\text{m}$ ]	RMS KP [m]			Std.Abw. [m]		
			$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\sigma X$	$\sigma Y$	$\sigma Z$
DMC 60 Bilder	70 / 114	1,96	0,033	0,036	0,077	0,019	0,022	0,056
Ultracam-X 52 Bilder	70 / 112	1,05	0,026	0,031	0,066	0,016	0,018	0,057
DigiCAM quattro 188 Bilder	70 / 116	1,28	0,038	0,045	0,093	0,023	0,026	0,090
RMK 47 Bilder	70 / 116	4,36	0,030	0,039	0,051	0,034	0,036	0,074

Tabelle 3: Absolutgenauigkeiten aus Kontrollpunkten (GSD 20cm Befliegungen)

Block	Anzahl PP / KP	$\sigma_0$ [ $\mu\text{m}$ ]	RMS KP [m]			Std.Abw. [m]		
			$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	$\sigma X$	$\sigma Y$	$\sigma Z$
DMC 136 Bilder	60 / 47	1,48	0,016	0,020	0,036	0,007	0,009	0,020
Ultracam-X 215 Bilder	60 / 50	0,95	0,013	0,016	0,042	0,007	0,008	0,022
DigiCAM quattro 784 Bilder	60 / 50	0,99	0,015	0,017	0,032	0,007	0,009	0,021
RMK 74 Bilder	60 / 48	4,11	0,015	0,017	0,033	0,014	0,015	0,030

Tabelle 4: Absolutgenauigkeiten aus Kontrollpunkten (GSD 8cm Befliegungen)

Bei den hier vorliegenden Blockgeometrien erreichen alle Digitalkameras sehr ähnliche Genauigkeiten, die auch sehr gut zu den Genauigkeiten der RMK-Auswertungen passen. Die Absolutgenauigkeit (RMS) in den horizontalen Komponenten liegt für GSD 20cm und GSD 8cm Bildverbände bezogen auf das Bodenpixel (GSD) im Bereich von  $\frac{1}{4}$  Pixel und besser. Für die Vertikalkomponente werden Genauigkeiten von  $\frac{1}{2}$  Pixel und besser erreicht. Drückt man die Genauigkeiten in Bezug auf die Flughöhe bzw. Pixelmessgenauigkeit im Bild aus, so ergeben sich andere Werte. Vergleicht man die RMS-Werte mit den theoretischen Genauigkeiten so sind für die Z-Koordinaten gute Übereinstimmungen zu beobachten. Im Falle der Horizontalkoordinaten ist die innere Genauigkeit knapp Faktor 2 besser als die äußere Genauigkeit. Dieses deutet auf kleine, nicht modellierte Restfehler hin, die aber auch aus der Ungenauigkeit der GPS-Referenzpunktmessungen (angenommene Genauigkeit besser 2cm) kommen. Vor allen Dingen für die GSD 8cm Auswertungen liegen die Genauigkeiten im Bereich der Pass- bzw. Kontrollpunktgenauigkeit. Die systematischen Fehler im Bildraum sind durch die signifikant geschätzten Terme des 44 Parametermodells für alle Kamerasysteme offensichtlich gut kontrollierbar. Da das 44 Parametermodell Bestandteil vieler AT-Programme ist, kann es für die pragmatische Auswertung von Bildern digitaler Kamerasysteme verwendet werden. Das heißt aber nicht unbedingt, dass dieser Parametersatz auch die optimale Lösung für Blockkonfigurationen mit geringerer Passpunktanzahl und ggf. zusätzliche GPS- oder GPS/inertial-Orientierungsdaten liefert. Ziel der Auswertungen sollte immer die Verwendung einer möglichst geringen Anzahl von Zusatzparametern sein; gerade ausreichend um die Systematik hinreichend zu modellieren ohne die Blockgeometrie unnötig zu belasten. Dieser Fragestellung wird im Auswerteteam Geometrie weiter nachgegangen werden.