

Untersuchung der DMC II 140

KARSTEN JACOBSEN

Zusammenfassung: Die großformatige Flächenkamera DMC II 140 wurde auf ihre geometrischen Eigenschaften untersucht. Mit den neu entwickelten DALSA-CCDs mit 140 Megapixel und 252 Megapixel ist es erstmalig nicht erforderlich, mit einem System von Teilkamerabildern ein großes virtuelles Bild zusammzusetzen. Durch den Entfall der Zusammenfügung gibt es auch keine entsprechende Fehlerquelle. Andererseits stellt ein CCD von 87mm x 81mm sehr hohe Ansprüche an die Ebenheit oder Kenntnis der Ebenheitsabweichung. Bildflüge mit der DMC II 140 über dem Testgebiet Aalen in drei verschiedenen Flughöhen, entsprechend 5,7cm, 9,5cm und 20,2cm Objektpixelgröße, wurden analysiert. Es zeigten sich überraschend kleine systematische Bildfehler, die deutlich unter denen entsprechender digitaler Systemkameras sind. Ohne die radialsymmetrischen Komponenten liegen sie bei maximalen 0,11 Pixeln und im Quadratmittel unter 0,03 Pixel. Entsprechend fällt auch die Genauigkeit unabhängiger Vergleichspunkte aus.

Stichworte: digitale Kamera, Geometrie, Selbstkalibrierung, DMC II 140

1 Einleitung

Als die digitalen Flächenkameras auf den Markt kamen, wurde der Ersatz des analogen Bildes durch einen einzigen CCD-Chip als Traum der Photogrammeter bezeichnet. Stattdessen konnte die erforderliche Anzahl von Pixeln nur durch eine Kombination von Teilkameras erreicht werden. Anfangs wurde auch der Informationsgehalt analoger Luftbilder überschätzt. Es wurde von einer Bildauflösung von 40 Linienpaaren/mm ausgegangen und von erforderlichen 2 Pixeln je Linienpaar, was 18400 x 18400 Pixeln für ein Standardluftbildfoto entspricht. Dabei wurde übersehen, dass für einen Vergleich originaler digitaler Bilder mit gescannten Fotos der bessere Kontrast der digitalen Bilder und das Bildrauschen der Fotos, verursacht durch das Filmkorn, sowie der Informationsverlust durch das Scannen der Fotos zu berücksichtigen ist.

Durch Vergleich von Kartenerstellungen mit Bildern der DMC, UltraCam und gescannten Luftbildern von den gleichen Gebieten und unterschiedlich großen Objektpixeln ergab sich, dass gescannte Luftbilder lediglich einen Informationsgehalt von 8520 x 8520 Pixeln haben (Jacobsen 2009). Das bedeutet nicht, dass Luftbildfotos mit 27µm Pixelgröße gescannt werden sollten, sondern, dass 18µm Pixelgröße ausreichen und die gescannten Bilder einen linear 1,5-fach geringeren Informationsgehalt haben als original digitale Luftbilder mit gleicher Objektpixelgröße. Mit den großformatigen CCDs von DALSA gibt es jetzt Sensoren, die den Informationsgehalt der Luftbildfotos deutlich überschreiten.

Die bisherigen Systemkameras DMC und UltraCam setzten die panchromatischen Teilbilder zu einem virtuellen Bild zusammen. Mit den vier leicht konvergent aufgenommenen DMC-Teilbildern ist dieses kein Problem da jede leicht überlappende Bildkombination durch Bündelausgleichung räumlich zusammengesetzt werden kann. Bei der UltraCam ist es sehr viel schwerer, die neun CCDs der vier Teilkameras zu einem virtuellen Bild zusammzusetzen, eine

dreidimensionale Lösung ist nicht möglich. Erst mit dem „monolythic stitching“, bei dem die neun panchromatischen Teilbilder auf das niedriger aufgelöste Bild der Teilkamera für das grüne Spektrum entzerrt werden (Ladstätter u.a. 2010), wurden die geometrischen Probleme der UltraCam verbessert. Allerdings ist die Entzerrung auf das niedriger aufgelöste Multispektralbild auch nicht optimal, es widerspricht auch dem „syntopischen“ Mode, bei dem die panchromatischen in Flugrichtung versetzten Teilkameras zeitversetzt ausgelöst werden um exakt das gleiche Projektionszentrum zu erhalten (Leberl & Gruber 2003). In der Praxis führt der syntopische Mode allerdings nicht einmal theoretisch zu einer Verbesserung der Geometrie, sondern kann bei rauen Flugbedingungen nur zu Problemen führen.

2 DMC II

Die Intergraph Z/I Imaging DMC II hat statt vier panchromatischer Teilkameras nur noch eine panchromatische Teilkamera mit einem großen CCD-Chip. Nach wie vor sind zusätzlich vier multispektrale Teilkameras vorhanden, die wie die panchromatische Kamera eine elektronische Forwärtsbewegungskompensation mittels TDI (transfer delay and integration) haben. DALSA stellt ein CCD mit 140 Megapixeln und ein CCD mit 252 Megapixeln her. Um den vollen Bereich des 252 Megapixel CCDs nutzen zu können ist eine neue Kameraoptik erforderlich, die im Frühjahr 2011 einsatzbereit sein soll. Dementsprechend werden drei verschiedene DMC II angeboten:

Tab. 1: Technische Daten der DMC II-Versionen

	Pixel	c [mm]	Pixel- größe	Aufnahme -intervall	b/h (p=60%)	GSD aus h=1000m	Pan / MS
DMC II 140	12096 x 11200	92	7,2µm	2 sec	0,35	7,8cm	1:2,0
DMC II 230	15104 x 14400	92	5,6µm	1,7 sec	0,35	6,1cm	1:2,5
DMC II 250	17216 x 14656	112	5,6µm	1,7 sec	0,29	5,0 cm	1:3.2

3 Testflüge mit der DMC II 140

Das geometrische Potenzial der DMC II 140 wurde mittels dreier Testflüge über dem Testfeld Aalen untersucht. Das Testfeld hat 71 Passpunkte, die eine Standardabweichung aller drei Koordinatenkomponenten von 2cm bis 3cm haben.

Tab. 2: Flüge über Testfeld Aalen

GSD	hg	Bilder	p	q	Kreuz	PP	VP	Bildpunkte	Punkte/Bild
5,7cm	730m	144	65%	65%	Ja	9	37	33457	232
9,5cm	1210m	68	65%	65%	Ja	7	26	16646	245
20,2cm	2585m	36	80%	80%	ja	6	19	9828	273

p = Längsüberdeckung, q = Querüberdeckung, Kreuz = Kreuzbefliegung, PP = Anzahl der Passpunkte, VP = Anzahl der unabhängigen Vergleichspunkte

Die Befliegungen erfolgten mit der nicht optimalen Sonnenhöhe von 20° bis 25°. In einigen Bereichen störten noch vorhandene Schneereste.

Es erfolgte eine automatische Aerotriangulation mit ISAT, wobei die Pass- und Vergleichspunkte in dem ersten Bild in dem sie auftraten, manuell gemessen wurden, in den anderen Bildern wurden sie mittels der so gewonnen Bildchips automatisch identifiziert.

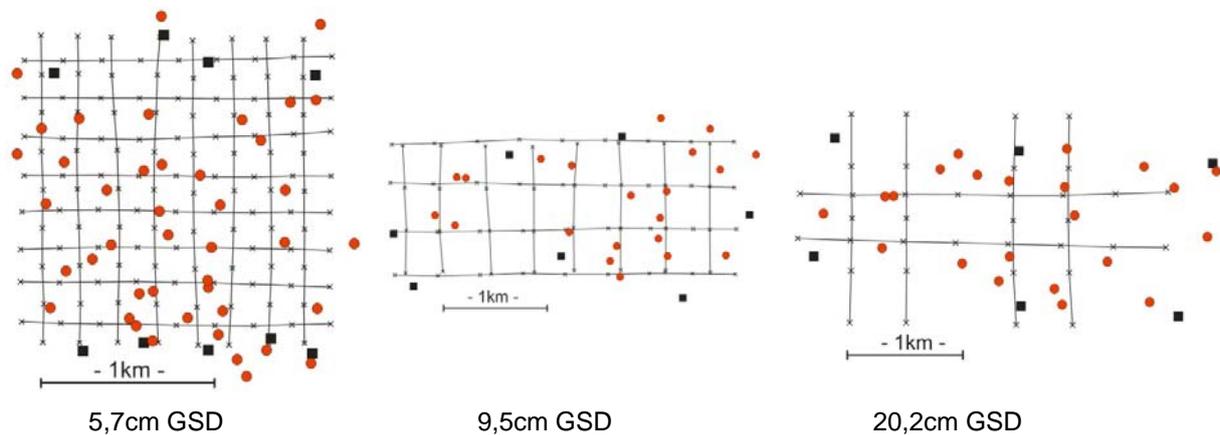


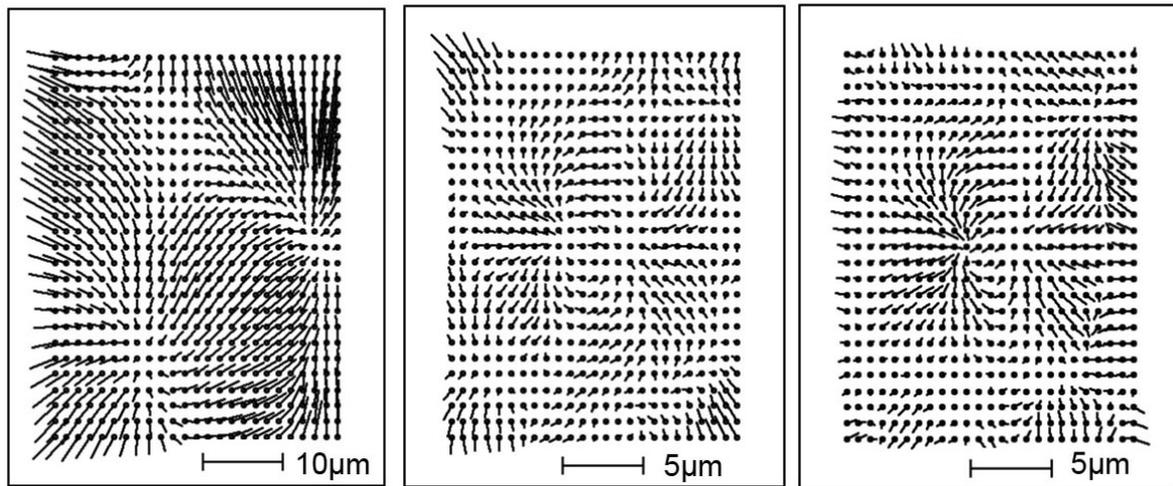
Abb. 1: Flugachsen der Bildflüge, schwarze Punkte = Passpunkte, rote Punkte = Vergleichspunkte

4 Bildgeometrie

Die Bildgeometrie kann durch eine Laborkalibrierung bestimmt werden, das entspricht jedoch nicht den Bildflugbedingungen, aus diesem Grund ist eine Testbefliegung vorzuziehen. Durch Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung kann die Bildgeometrie bestimmt werden, das setzt allerdings voraus, dass die zusätzlichen Parameter in der Lage sind, die spezielle Bildgeometrie zu modellieren. Sind in einem Block genügend Bildpunkte vorhanden, lassen sich die systematischen Bildfehler und / oder die verbliebenen systematischen Bildfehler durch Analyse der Residuen analysieren. Unter systematischen Bildfehlern ist der geometrische Unterschied zwischen der tatsächlichen Bildgeometrie und dem mathematischen Modell der Zentralperspektive zu verstehen – es handelt sich somit weniger um einen Bildfehler, als um einen Fehler des mathematischen Modells. Die Bezeichnung „systematisch“ bedeutet, dass der Bildfehler mindestens über einen ausreichenden Zeitraum unverändert ist. Im Rahmen des DGPF-Projekts: Evaluierung digitaler Kamerasysteme (Jacobsen u.a. 2010) wurde untersucht, ob sich die systematischen Bildfehler innerhalb eines Bildfluges verändern. In keinem Fall konnten signifikante Änderungen der Bildgeometrie nachgewiesen werden.

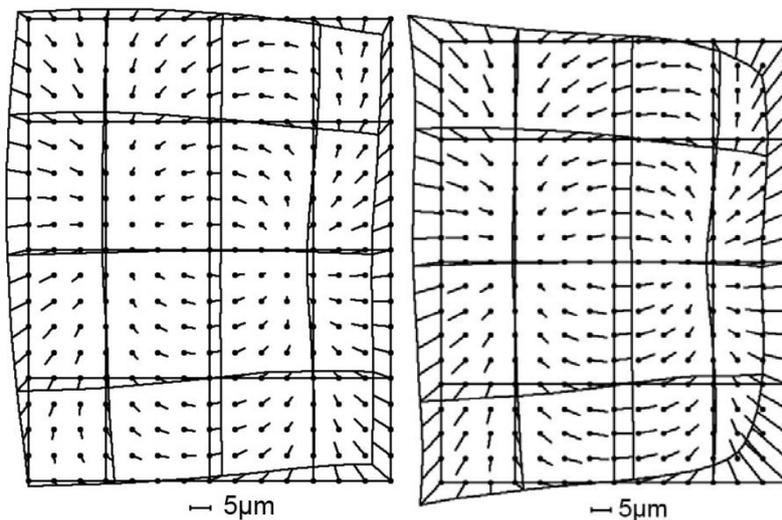
Es gibt eine Reihe von Parameteransätzen für die Selbstkalibrierung. Der von Brown (1971) entwickelte Ansatz ist im Wesentlichen physikalisch begründet. Er wird noch heute vorwiegend für Nahbereichsaufnahmen eingesetzt. Von Nachteil ist, dass die zusätzlichen Parameter teilweise sehr stark korreliert sind. Ebner (1976) entwickelte einen mathematisch begründeten Ansatz, der die systematischen Bildfehler in einem Raster von 9 Bildpunkten (Gruberpunkte) beseitigt. Dieser Ansatz hat sich als für digitale Kameras nicht ausreichend erwiesen (Jacobsen u.a. 2010). Grün (1976) erweiterte diesen Ansatz auf ein Raster von 25 Bildpunkten, was 44 statt

12 zusätzliche Parameter erfordert. Dieser Ansatz hat sich für digitale Luftbilder als besser geeignet erwiesen, erfordert jedoch zu viele Parameter. Jacobsen (2007 u. 2008) verwendet einen hauptsächlich physikalisch begründeten Ansatz von 12 zusätzlichen Parametern, der noch um kameraspezifische Parameter, die die spezielle Kamerageometrie der DMC und der UltraCam berücksichtigen, erweitert ist. Außerdem wurde dieser Ansatz um acht zusätzliche Parameter (81 bis 88) ergänzt, die in der Lage sind, die häufig bei digitalen Kameras mit einem CCD auftretenden Deformationen der Bildecken zu erfassen (Jacobsen u.a. 2010).



a: ohne Selbstkalibrierung b: zusätzliche Parameter 1-12 c: zus. Parameter 1-12, 81-88

Abb. 1: Mittelformatkamera - systematische Bildfehler die nicht durch die Blockausgleichung erfasst wurden



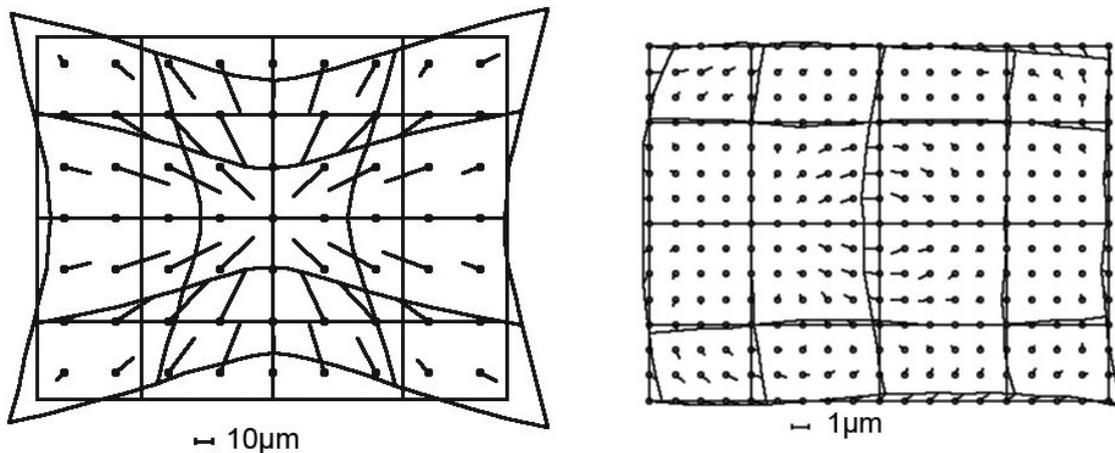
a: zusätzliche Parameter 1 – 12 b: zus. Parameter 1-12, 81-88

Abb. 2: Mittelformatkamera - systematische Bildfehler bestimmt durch Blockausgleichung mit Selbstkalibrierung

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen typische Eigenschaften einer digitalen Mittelformatkamera mit einem CCD-Array von 5412 x 7216 Pixeln je 6,8µm Größe. Abbildung 1a zeigt die aus den

Residuen einer Blockausgleichung, ohne Selbstkalibrierung, gewonnenen Information über die nicht erfassten systematischen Bildfehler. Dazu wurden alle Residuen (verbliebene Bildkoordinatenfehler) aller Bilder dieser Kamera im Bildraum überlagert und in 25 x 25 Teilbildflächen gemittelt. Da mit dieser Kamera 13527 Bildpunkte erfasst wurden, sind im Mittel in einer Teilfläche der überlagerten Bilder 21,6 Residuen vorhanden, die bei der Mittelbildung der Residuen in den einzelnen Teilflächen zu einer ausreichenden Reduzierung des zufälligen Fehleranteils führen und die systematischen Fehleranteile klar zeigen, bestätigt durch die Korrelation benachbarter Residuen.

Durch Blockausgleichung mit den 12 Standardparametern des Programms BLUH wurden die in Abbildung 2a gezeigten systematischen Bildfehler ermittelt, die mit der Tendenz der in Abbildung 1a gezeigten Systematik gut übereinstimmt. Nach Ausgleichung mit den Standardparametern verbleiben aber noch die in Abbildung 1b dargestellten, nicht erfassten Systematiken; diese sind typisch für digitale Kameras, die nur ein CCD-Array haben. Zu erklären sind derartige systematische Fehler der Bildecken durch eine nicht ausreichende Ebenheit des verwendeten CCDs. Für ihre Erfassung wurden in BLUH die speziellen zusätzlichen Parameter 81 bis 88 (Jacobsen u.a. 2010) eingeführt. Werden diese Parameter in der Blockausgleichung berücksichtigt, ändern sich die systematischen Bildfehler auf die in Abbildung 2b gezeigte Form und stimmen besser mit den in Abbildung 1a gezeigten nicht erfassten systematischen Bildfehlern überein, außerdem reduzieren sich die verbliebenen, nicht erfassten systematischen Bildfehler (Abb. 1c) deutlich.



a: Gesamtbetrag der systematische Bildfehler

b: Systematische Bildfehler ohne radialsymmetrische Komponenten

Abb. 3: Systematische Bildfehler einer digitalen Kleinbildkamera mit 5.7mm x 4.29mm Format

Die typischen Probleme der Bildecken zeigen sich auch bei digitalen Kleinbildkameras (Abb. 3). In diesem Fall sind auch die zusätzlichen Parameter 81 bis 88 erforderlich um die Bildgeometrie in den Bildecken richtig modellieren zu können.

Aus diesem Grund waren die systematischen Bildfehler der digitalen Großbildkamera DMC II 140 mit einem Bildformat von 87,1 x 80,6mm² auch auf geometrische Probleme der Bildecken zu untersuchen. Die Strahlenneigung der DMC II 140 in den Bildecken beträgt 32,8°. Wenn die Auswirkung einer Ebenheitsabweichung des CCDs die Größe von σ_0 der

Blockausgleichung von besser als $1\mu\text{m}$ nicht überschreiten soll, muss das CCD eine Ebenheit von besser als $1,5\mu\text{m}$ haben, oder die Ebenheit des CCDs muss entsprechend bekannt sein.

Tab. 3: Bündelblockausgleichung der DMC II 140, Testfeld Aalen

GSD ↓ zus. Parameter →	Sigma0 Bündelblockausgleichung [μm]			Quadratmittel der verbliebenen systematische Bildfehler [μm]		
	0	1-12	1-12, 81-88	0	1-12	1-12, 81-88
5,7cm	0,98	0,97	0,97	0,14	0,14	0,14
9,5cm	0,91	0,90	0,90	0,18	0,17	0,17
20,2cm	1,68	1,68	1,68	0,26	0,25	0,25

Die Standardabweichung der Gewichtsabweichung σ_0 der Blockausgleichungen der DMC II 140-Aufnahmen zeigen fast keine Abhängigkeit von der Selbstkalibrierung. Ihre Beträge liegen bei 0,14 bis 0,23 Pixeln, mit den größeren Werten für den Bildflug mit 20,2cm GSD. Die Objektpixelgröße von 20,2cm ist für die Signalisierung des Testfelds Aalen eigentlich zu groß, so dass die Passpunkte nicht optimal identifiziert werden konnten, was sich auf die Blockausgleichung auswirkt. Noch deutlicher als die fehlende Abhängigkeit des σ_0 von der Selbstkalibrierung, zeigt die ebenfalls nicht vorhandene Abhängigkeit der aus den Residuen berechneten verbliebenen systematischen Bildfehler (Tabelle 3) die hervorragende Bildgeometrie der DMC II 140. Entsprechend klein fallen die systematischen Bildfehler aus (Tabelle 4). Die bei anderen digitalen Kameras auffallenden Deformationen der Bildecken sind nicht nachweisbar – die zusätzlichen Parameter 81-88 sind nicht erforderlich und die verbliebenen systematischen Bildfehler zeigen keinerlei Deformation der Bildecken an (Abb. 4).

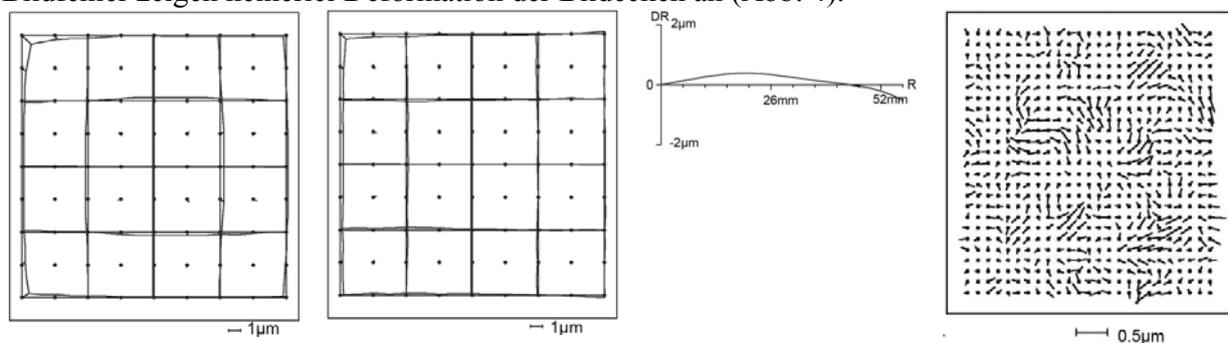


Abb. 4: Systematische Bildfehler der DMC II 140 mit 9.5cm GSD links: Gesamtbetrag, Mitte links: ohne radialsymmetrische Verzeichnung, Mitte rechts: radialsymmetrische Verzeichnung, rechts: verbliebene systematische Bildfehler der Ausgleichung mit den Parametern 1-12

Tab. 4: Blockausgleichung mit der DMC II 140

GSD	Gesamtbetrag der systematischen Bildfehler		Bildfehler ohne radialsym. Komponente		radial- symmetrisch
	Quadratmittel	maximal	Quadratmittel	maximal	maximal
5.7cm	0,3 μm	1,3 μm	0,1 μm	0,3 μm	1,0 μm
9.5cm	0,2 μm	1,5 μm	0,1 μm	0,5 μm	0,6 μm
20.2cm	0,6 μm	3,1 μm	0,2 μm	0,8 μm	2,3 μm

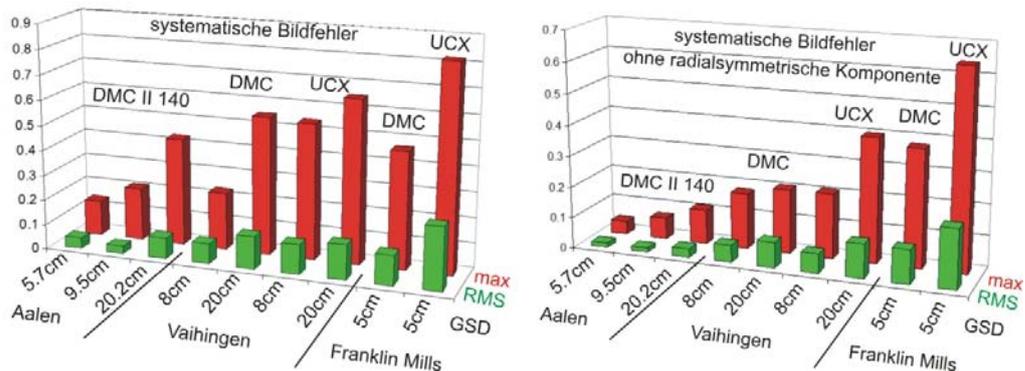


Abb. 5: Vergleich der Größe systematischer Bildfehler verschiedener digitaler Kameras

Ein Vergleich der Größe der systematischen Bildfehler der DMC II 140 mit der anderer digitaler Kameras (Abb. 5) zeigt die deutlich bessere Situation der DMC II 140, besonders wenn die radialsymmetrischen Komponenten herausgenommen werden, die im Wesentlichen durch die Optik und Temperatureinflüsse auf die Optik hervorgerufen werden.

5 Objektpunktgenauigkeit

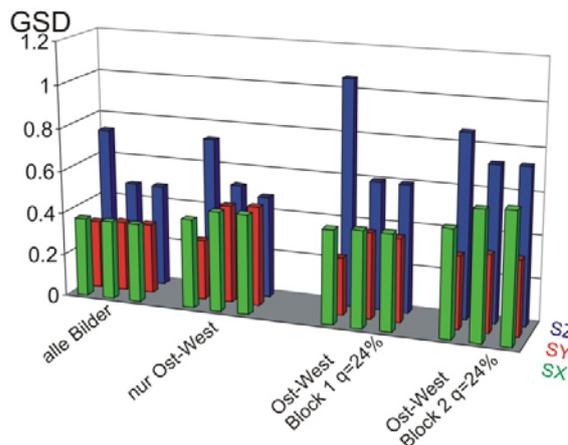


Abb. 6: Bündelblockausgleichung mit 9.5cm GSD, Quadratmittel der Widersprüche an unabhängigen Vergleichspunkten; jeweils linke Spalte: ohne Selbstkalibrierung; jeweils mittlere Spalte: zusätzliche Parameter 1-12; jeweils rechte Spalte: zusätzliche Parameter 1-12, 81-88. Ganzer Block mit 68 Bildern, nur Ost-West: 34 Bilder, Ost-West mit $q=24\%$ mit 17 Bildern.

Für die Befliegungen mit 5,7cm GSD sind die verwendeten Pass- und Vergleichspunkte nicht genau genug und mit 20,2cm konnten sie nicht gut genug identifiziert werden, weswegen in Abb. 6 nur die Ergebnisse der Befliegung mit 9,5cm GSD dargestellt sind. Es zeigt sich, dass wegen der geringen radialsymmetrischen Verzeichnung eine Ausgleichung mit dem Standardansatz der Selbstkalibrierung die Höhengenaugigkeit verbessert. Die sehr guten Ergebnisse der Blockausgleichungen, bestimmt durch unabhängige Vergleichspunkte, werden noch durch die Ergebnisse der Ausgleichungen mit einer reduzierten Anzahl von Bildern (Abb. 6) unterstrichen. Die Höhengenaugigkeit von 0,7 GSD für eine einfache Bildüberdeckung ist hervorragend.

6 Zusammenfassung

Die DMC II 140 zeigt eine Bildgeometrie mit sehr kleinen systematischen Bildfehlern, die bislang von keiner anderen Kamera erreicht wurden. Die systematischen Bildfehler können praktisch bei der Auswertung der Einzelmodelle vernachlässigt werden und erfordern keine

Programme, die in der Lage sind sie bei der Modellauswertung zu berücksichtigen. Wegen der nur sehr kleinen systematischen Bildfehler zeigen Blockausgleichungen mit Selbstkalibrierung keine Verbesserung der Objektpunktlage X und Y. Lediglich die Objektpunkthöhen werden durch die Selbstkalibrierung verbessert, aber selbst mit Einfachblöcken (65% Längs- und 24% Querüberdeckung) wird eine Höhengenaugigkeit von etwa einer Objektpixelgröße ohne Selbstkalibrierung erreicht.

6 Literaturverzeichnis

- BROWN, D.C., 1971: Close-range camera calibration, *Photogrammetric Engineering* 37(8), S. 855-866.
- EBNER, H., 1976: Self Calibration Block Adjustment, *BuL* 1976, S. 128-139.
- GRÜN, A., 1976: Die simultane Kompensation systematischer Fehler mit dem Münchener Bündelprogramm MBOP, Presented Paper ISP Congress Helsinki 1976.
- JACOBSEN, K., 2007: Geometric Handling of Large Size Digital Airborne Frame Camera Images. *Optical 3D Measurement Techniques VIII*, ETH Zürich 2007: S. 164-171.
- JACOBSEN, K., 2008: Geometrisches Potential und Informationsgehalt von großformatigen digitalen Luftbildkameras, *PFG*, S. 325-336
- JACOBSEN, K., 2009: Potential of large format digital aerial cameras. *Map World Forum*, Hyderabad, GIS Development; http://www.gisdevelopment.net/technology/emerging/mwf09_Karsten_AerialCameras.htm (Dec. 14th 2010).
- JACOBSEN, K., CRAMER, M., LADSTÄDTER, R., RESSL, C. & SPRECKELS, V., 2010: DGPF project: Evaluation of digital photogrammetric camera systems geometric performance. *Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation* 2010 (2): S. 83-97.
- LEBERL, F. & GRUBER, M., 2003: Flying the New Large Format Digital Aerial Camera Ultracam. *Photogrammetric Week* 2003: S. 67-76.
- LADSTÄDTER, R., GRUBER, M. & WIECHERT, A., 2010: Monolithic Stitching: One sensor geometry for multiple sensor camera. *ASPRS 2010 Annual Conference San Diego*.