

## Geometrisches Potential und Informationsgehalt von großformatigen digitalen Luftbildkameras

KARSTEN JACOBSEN, Hannover

**Keywords:** Digital cameras, accuracy, resolution, information contents

**Summary:** *Geometric Potential and Information Contents of Large Size Digital Aerial Cameras.* A test area north of Philadelphia was flown with Vexcel Imaging UltraCamD, UltraCamX and Z/I Imaging DMC digital frame cameras as well as with the line scanner camera Leica ADS40 and the analogue RC30. The frame images have 60% overlap in both directions. The object resolution is approximately the same with  $\sim 5$  cm ground sampling distance (GSD). 42 well defined control and check points are available with a standard deviation of better than 2 cm.

The image resolution must not correspond to the nominal values, by this reason the image resolution has been checked by edge analysis. Especially the pan-sharpened images show a loss of image quality, but in any case in the UltraCam image corners a lower image quality can be seen. The information contents of an analogue RC30 photo corresponds approximately to  $8520^2$  pixel of a digital camera.

By bundle block adjustment with self-calibration, using general and camera-specific additional parameters, the image geometry has been analysed. The resulting systematic image errors are partially so large, that they should be respected during data acquisition. The reached object point accuracy, determined at independent check points, is shown; this includes also the accuracy achieved with ADS40-images. With the new Vexcel Imaging software for merging the sub-images, quite better results can be reached than with the old software.

**Zusammenfassung:** Ein Testgebiet in der Nähe von Philadelphia wurde mit einer Vexcel Imaging UltraCamD, einer UltraCamX, einer Z/I Imaging DMC, der Zeilenkamera Leica ADS40, sowie einer analogen RC30 befliegen. Mit Ausnahme der ADS40 überdecken sich die Bilder um 60% in beiden Richtungen. Die Objektpixelgröße aller Aufnahmen beträgt  $\sim 5$  cm. 42 Pass- und Vergleichspunkte mit einer Standardabweichung von besser als 2 cm sind vorhanden.

Die Bildauflösung muss nicht der nominellen Objektpixelgröße entsprechen, aus diesem Grund wurde sie mittels Kantenanalyse untersucht. Es zeigte sich, dass besonders die pan-geschärften Farbbilder und in jedem Fall die Ecken der UltraCam-Aufnahmen niedrigere Bildauflösungen haben. Die analoge RC30-Aufnahme hat einen Informationsgehalt, der etwa  $8520^2$  Pixeln einer digitalen Kamera entspricht.

Die Bildgeometrien konnten durch Bündelblockausgleichung mit Selbstkalibrierung durch allgemeine und kameraspezifische zusätzliche Parameter bestimmt werden. Die daraus resultierenden systematischen Bildfehler erreichen teilweise eine Größe, die bei der Einzelmodellauswertung berücksichtigt werden sollten. Die erzielbare Genauigkeit wurde mittels unabhängiger Vergleichspunkte ermittelt. Es zeigte sich, dass die neue Software von Vexcel Imaging zur Vereinigung der Teilbilder zu deutlich besseren Ergebnissen führt als die Alte.

### 1 Einleitung

Analoge Luftbildkameras werden schneller, als noch vor wenigen Jahren erwartet, durch digitale Kameras ersetzt. Die großformatigen digitalen Flächenbilder entstehen durch

Zusammensetzungen von Teilbildern, die mittels mehrerer Teilkameras erstellt werden. Bei dem Zusammenfügen der Teilbilder wird die Kamerakalibrierung der Teilkameras berücksichtigt, so dass die zusammengesetzten Bilder theoretisch keine systemati-

schen Bildfehler haben sollten. Die Praxis zeigt allerdings etwas anderes. Die sich ergebenden kameraspezifischen systematischen Bildfehler können nicht mit den traditionellen Kombinationen zusätzlicher Parameter ausreichend erfasst werden, hier empfehlen sich speziell angepasste zusätzliche Parameter.

Zeilenkameras, wie die Leica ADS40, haben eine völlig anders geartete Bilderfassung. Jede Zeile hat eine andere äußere Orientierung, die mittels einer Kombination relativer kinematischer GPS-Positionierung und inertialer Messeinheit bestimmt wird. Für hohe relative und absolute Genauigkeitsansprüche ist allerdings eine Blockausgleichung mit Hilfe von Passpunkten erforderlich (TEMPELMANN et al. 2003).

Bislang wurde kein Vergleich der unterschiedlichen Kameras unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt. Der EuroSDR-Test „Digital Camera Calibration & Validation“ (CRAMER 2007) wurde durch schlecht erkennbare Pass- und Vergleichspunkte beeinträchtigt. Er ermöglicht eine Analyse der Bildgeometrie, lässt aber nur einen eingeschränkten Vergleich der erzielten Genauigkeiten zu.

## 2 Benutzte Datensätze

Organisiert durch BAE SYSTEMS GP&S, Mt Laurel, NJ, USA, wurde das Testfeld Franklin Mills mit einer DMC, einer UltraCamD, UltraCamX, ADS40 und einer RC30 befliegen (siehe Tab. 1 und 2). Etwa 42 ausreichend klar definierte Pass- und Vergleichspunkte, mit einer Standardabweichung kleiner als 2 cm, sind vorhanden. Mit Ausnahme der ADS40-Bilder weisen alle Bildflüge eine Längs- und Querüberdeckung von 60 % auf (siehe Abb. 4). Die benachbarten ADS40-Bildstreifen überdecken sich um 20 % bis 30 % (siehe Abb. 4).

Zusätzlich zu diesen Testdatensätzen wird teilweise auf die Ergebnisse von anderen Datensätzen zurück ge-griffen: DMC-Block Gent von Hansa Luftbild (7,7 cm Objektpixelgröße, 1105 Bilder), Rubi und Amposta vom ICC Barcelona (9,8/9,0 cm Objektpixelgröße, 426/140 Bilder), „Bergbau“ von

der DSK (9 cm Objektpixelgröße, 2450 Bilder), Istanbul von BIMTAS (8,6 cm Objektpixelgröße, 1608 Bilder) und DMC, UltraCamD und Analogbilder des EuroSDR-Testblocks Frederikstad (JACOBSEN 2007 und 2008a, CRAMER 2007).

**Tab. 1:** Technische Daten der untersuchten Kameras.

Kamera	c [mm]	Bildgröße x [Pixel]	Bildgröße y [Pixel]	Pixelgröße [µm]
DMC	120,0	7680	13824	12,0
UltraCamD	105,2	7500	11500	9,0
UltraCamX	100,5	9420	14430	7,2
RC30	151,3	18400	18400	12,5
ADS40	62,7	–	12000	6,5

**Tab. 2:** Bildflüge des Testgebiets Franklin Mills.

Kamera	Bildflug	nominelle Objektpixelgröße
DMC	Juli 2007	54 mm
UltraCamD	Februar 2006	42 mm
UltraCamX	April 2007	37 mm
RC30	Sept. 2007	49 mm
ADS40	Juni 2007	53 × 91 mm <sup>2</sup>

Die ADS40 ist auf maximal 800 Bildzeilen je Sekunde beschränkt, womit die Objektpixelgröße in der Flugrichtung festgelegt ist. Die vorhandene Objektpixelgröße von 91 mm entspricht einer Fluggeschwindigkeit von 262 km/h. Die Pixelgröße quer zur Flugrichtung entspricht mit 53 mm einer Flughöhe über Grund von 511 m.

## 3 Überprüfung der Bildauflösung durch Kantenanalyse

Da die verschiedenen Bildsätze visuell deutlich unterschiedliche Bildschärfen zeigten, wurden diese durch einfache Kantenanalysen quantifiziert, um Nebeneinflüsse auf die geometrischen Auswertungen in Betracht ziehen zu können. Die aus der Pixelgröße und dem Bildmaßstab berechnete Objektpixelgröße ist nur die nominelle Information über erkennbare Objekte. Das Verhältnis

zwischen der nominellen und der effektiven Objektpixelgröße, die die Auflösung berücksichtigt, kann durch Kantenanalyse bestimmt werden (KÖLBL 2005). Ein plötzlicher Wechsel der Objekthelligkeit, wie an einer Schattengrenze, führt im Bild zu einem kontinuierlichen Grauwertübergang. Die Differenzierung des Grauwertprofils im Bild quer zu Kante führt zur Punktverteilungsfunktion (siehe Abb. 1), die einer Gauß-Funktion entsprechen sollte. Die Weite der Punktverteilungsfunktion, also der Abstand zwischen den Wendetangenten (siehe Abb. 1 rechts), ist ein Maß für die Bildqualität. Diese kann durch das optische System, die CCD-Matrix oder den Film, aber auch durch eine pan-Schärfung beeinflusst werden. In dem hannoverschen Programm EDGE werden alle Grauwertprofile quer zu einer Kante, zwischen zwei Punkten auf der Kante, gemittelt und für die Berechnung der effektiven Objektpixelgröße verwendet. Die Aussagekraft der effektiven Objektpixelgröße wurde durch Erstellung von Karten im Rahmen der Diplomarbeit (OSWALD 2007) und entsprechender Untersuchungen überprüft (JACOBSEN 2008a).

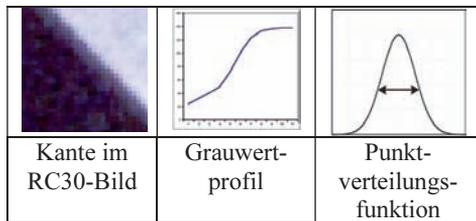


Abb. 1: Kantenanalyse.

Tab. 3: Faktoren für die effektive Objektpixelgröße, Testgebiet Franklin Mills.

Kamera	Bildtyp	Faktor
DMC	panchromatisch	0,92
UltraCamD	pan-geschärft	1,16
UltraCamX	pan-geschärft	1,23
UltraCamX Bildmitte	panchromatisch	1,03
UltraCamX Bildecken	panchromatisch	1,24
RC30	RGB Farbe	1,43
ADS40	pan Vorblick 2°	0,99
ADS40	pan Rückblick 14°	0,95
ADS40	pan Vorblick 27°	1,11

Die Bilder des Testgebiets Franklin Mills wurden durch Kantenanalyse untersucht (siehe Tab. 3). Die mit 12,5 µm Pixelgröße gescannten RC30-Bilder haben dementsprechend eine effektive Objektpixelgröße von  $12,5 \mu\text{m} * 1,43 = 18 \mu\text{m}$ . Zusätzlich sind die gescannten Fotos durch Filmkorn und einen niedrigeren Kontrast beeinträchtigt. In der Diplomarbeit (OSWALD 2007) und weiteren Untersuchungen (JACOBSEN 2008a) zeigte sich, das im Vergleich zu original digitalen Bildern der Informationsgehalt gescannter Luftbilder zusätzlich linear um den Faktor 1,5 geringer ist. Wird dieser Faktor berücksichtigt, entspricht der Informationsgehalt analoger Bilder einer effektiven Pixelgröße von 27 µm im Bild. Damit hat ein analoges Luftbild einen Informationsgehalt von  $8520^2$  Pixeln, was weniger als die Anzahl der Pixel einer einzelnen DMC- oder einer UltraCamX-Aufnahme ist und etwa auf dem Niveau der UltraCamD liegt (siehe auch JACOBSEN 2008b).

Der Faktor für die effektive Objektpixelgröße sollte nicht unter 1,0 liegen, kann aber durch eine Kantenverstärkung verkleinert werden. Kantenverstärkungen sind aus den Grauwertprofilen erkennbar. Alle untersuchten Bilder haben vergleichbare Kantenverstärkungen. Die pan-geschärften UltraCam-Bilder weisen allgemein eine geringere Auflösung auf, während es bei den panchromatischen UltraCam-Bildern nur in den Ecken zu einem Schärfeverlust kommt. Dieses entspricht den, dem Kalibrierungszertifikat beigelegten, Modulationsübertragungsfunktionen.

Die ADS40 zeigt geringe Auflösungsverluste der stärker geneigten Aufnahmen, sowie für den blauen Kanal (Faktor 1,27) und den Infrarotkanal (Faktor 1,08). Die Auflösung beeinträchtigt nicht direkt die geometrischen Eigenschaften, sie wirkt sich nur indirekt bei der Einstellung nicht klar abgebildeter Passpunkte aus.

#### 4 Selbstkalibrierung

Systematische Bildfehler, oder genauer, die Differenz zwischen dem mathematischen Modell der Perspektive und der tatsächli-

Tab. 4: Allgemeine zusätzliche Parameter des Programmsystems BLUH.

x, y = Bildkoordinaten normiert auf einen maximalen Hauptpunktastand von 162.6 mm (Maßstabsfaktor = 162.6/maximalen Hauptpunktastand) $r^2 = x^2 + y^2$ $b = \arctan (y/x)$		
1. $x' = x - y \cdot P1$	$y' = y - x \cdot P1$	Scherung
2. $x' = x - x \cdot P2$	$y' = y + y \cdot P2$	Affinität
3. $x' = x - x \cdot \cos 2b \cdot P3$	$y' = y - y \cdot \cos 2b \cdot P3$	
4. $x' = x - x \cdot \sin 2b \cdot P4$	$y' = y - y \cdot \sin 2b \cdot P4$	
5. $x' = x - x \cdot \cos b \cdot P5$	$y' = y - y \cdot \cos b \cdot P5$	
6. $x' = x - x \cdot \sin b \cdot P6$	$y' = y - y \cdot \sin b \cdot P6$	
7. $x' = x + y \cdot r \cdot \cos b \cdot P7$	$y' = y - x \cdot r \cdot \cos b \cdot P7$	tangentiale Verzeichnung 1
8. $x' = x + y \cdot r \cdot \sin b \cdot P8$	$y' = y - x \cdot r \cdot \sin b \cdot P8$	tangentiale Verzeichnung 2
9. $x' = x - x \cdot (r^2 - 16384) \cdot P9$	$y' = y - y \cdot (r^2 - 16384) \cdot P9$	radialsymmetrisch $r^3$
10. $x' = x - x \cdot \sin (r \cdot 0.049087) \cdot P10$	$y' = y - y \cdot \sin (r \cdot 0.049087) \cdot P10$	radialsymmetrisch
11. $x' = x - x \cdot \sin (r \cdot 0.098174) \cdot P11$	$y' = y - y \cdot \sin (r \cdot 0.098174) \cdot P11$	radialsymmetrisch
12. $x' = x - x \cdot \sin 4b \cdot P12$	$y' = y - y \cdot \sin 4b \cdot P12$	

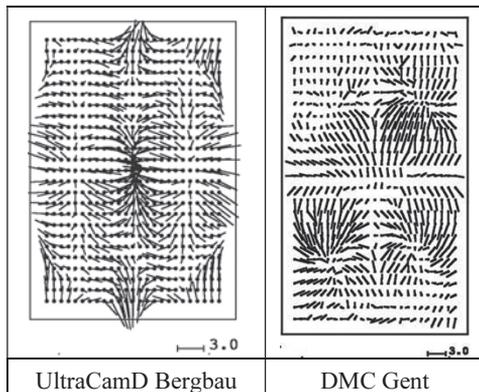
chen Bildgeometrie, können durch Blockausgleichungen mit Selbstkalibrierung durch zusätzliche Parameter bestimmt werden. Unterschiedlichste Sätze zusätzlicher Parameter werden verwendet und führen bei analogen Bildern zu zufrieden stellenden Ergebnissen. Die zusätzlichen Parameter können reine mathematische Ansätze sein oder auch physikalisch begründet sein. EBNER (1976) entwickelte einen Satz zusätzlicher Parameter, die in der Lage sind, die systematischen Bildfehler in den 9 Gruberpunkten zu beseitigen. Dieser rein mathematische Ansatz wurde von GRÜN (1979) auf einen Satz von 44 Parametern erweitert, der die systematischen Bildfehler in einem Raster von  $5 \times 5$  Bildpunkten beseitigt. JACOBSEN (1980) entwickelte einen physikalisch begründeten Ansatz, der um wenige mathematisch gerechtfertigte Parameter ergänzt wurde (JACOBSEN 2007, siehe Tab. 4).

Panchromatische DMC- und UltraCam-Aufnahmen basieren auf der Kombination von 4 bzw. 9 CCD-Matrizen von 4 Teilkameras. Die Zusammenfügung der Teilbilder berücksichtigt die Kalibrierung der Teilkameras, so dass theoretisch keine systematischen Bildfehler auftreten sollten. In der Praxis ist das aber nicht der Fall. Bildfehler werden primär durch Temperatureinflüsse hervorgerufen – die CCD-Matrizen sind auf Keramikkörpern fixiert, die einen anderen Ausdehnungskoeffizienten als die Kamera-

körper haben. Außerdem ist ein vertikaler Temperaturgradient in der Optik nicht vermeidbar.

Im Fall einer Blockausgleichung ohne Selbstkalibrierung beeinflussen die systematischen Bildfehler die Residuen der Bildkoordinaten. Alle Bildkoordinatenresiduen eines Blockes können im Bildraum überlagert und in Teilflächen gemittelt werden. Durch die Mittelbildung werden die zufälligen Fehler reduziert, während die systematischen Fehler unverändert bleiben. Die überlagerten und gemittelten Bildkoordinatenresiduen geben einen guten Überblick über die Geometrie der systematischen Bildfehler, nicht jedoch über deren Größe. Da ein Teil der systematischen Bildfehler durch Orientierungsunbekannte kompensiert wird, fallen die überlagerten und gemittelten Bildkoordinatenresiduen allgemein kleiner aus als die durch Selbstkalibrierung berechneten systematischen Bildfehler. Sie zeigen allerdings sehr gut die geometrische Form der systematischen Bildfehler an und weisen bei Blockausgleichungen mit Selbstkalibrierung auf noch nicht erfasste systematische Fehler hin. Bei kleinen Blöcken kann ihre Aussagekraft allerdings eingeschränkt sein.

Die in Abb. 2 gezeigten überlagerten und gemittelten Bildkoordinatenresiduen deuten auf die genannten Ursachen der systematischen Bildfehler hin. Diese systematischen Bildfehler können nicht mit den Standard-

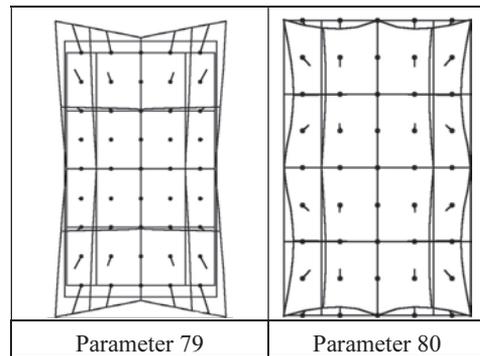


**Abb. 2:** überlagerte und gemittelte Bildkoordinatenresiduen.

sätzen der zusätzlichen Parameter optimal erfasst werden, weswegen das hannoversche Programm zur Bündelblockausgleichung BLUH um spezielle zusätzliche Parameter für die DMC und die UltraCam erweitert wurde<sup>1</sup>. Mit den Parametern 30–33 können Synchronisationsfehler der DMC erfasst werden, mit 34–41 lassen sich perspektive Abbildungsfehler der Teilkameras berücksichtigen und mit 74–77 radialsymmetrische Verzerrungen der Teilkameras. Da sich zeigte, dass sich die Teilkameras sehr ähnlich verhalten, können mit dem Parameter 79 gleiche Veränderungen der Kammerkonstante aller 4 Teilkameras erfasst werden und mit 80 gleiche radialsymmetrische Verzerrungen der 4 Teilkameras (siehe Abb. 3).

Für die UltraCam bestimmen die zusätzlichen Parameter 42 bis 73 Verschiebungen in x und y, Maßstabsänderungen und Drehungen der 8 Teilmatrixen gegenüber der zentralen Matrix. In jedem Fall wird berücksichtigt, dass benachbarte Bildteilflächen durch Verknüpfungspunkte bei der Bildvereinigung miteinander verbunden sind. Die UltraCamD und die UltraCamX haben sehr ähnliche Bild- und Teilbildformate, weswegen für beide Kameras der glei-

<sup>1</sup> Die Formeln für die im Folgenden genannten zusätzlichen Parametern des Programmsystems BLUH sind aus Platzgründen unter [www.ipi.uni-hannover.de](http://www.ipi.uni-hannover.de) (Service/BLUH) aufgeführt.



**Abb. 3:** gemeinsame zusätzliche Parameter für die DMC.

che Ansatz zusätzlicher Parameter verwendet werden kann. Wegen unterschiedlicher Drehungen der UltraCam-Bilder wird von BLUH automatisch überprüft, ob die  $x'$ - oder die  $y'$ -Formatseite größer als die andere ist, um die zusätzlichen Parameter richtig anzusetzen. Zusätzlich zu den kameraspezifischen Parametern sind die Standardparameter 1 bis 12 des Programms BLUH zu verwenden. BLUH überprüft die zusätzlichen Parameter auf Bestimmbarkeit und Erfordernis durch eine Kombination eines Student-Tests mit der Korrelation und der inneren Bestimmtheit der zusätzlichen Parameter (JACOBSEN 1980). Nicht erforderliche Parameter werden automatisch aus der Berechnung entfernt, um Überparameterisierungen zu verhindern, so dass die folgend angegebenen zusätzlichen Parameter nur die Startparameter darstellen, die letzte Iteration aber in der Regel mit einer kleineren Anzahl berechnet wurde.

### 5 Blockausgleichungen

Die erforderlichen Verknüpfungspunkte wurden mit LPS und im Fall der ADS40 mit ORIMA bestimmt. Die manuelle Messung der Pass- und Verknüpfungspunkte war sehr zeitaufwendig, da alle Punktdefinitionen mittels in der Örtlichkeit aufgenommener Fotos überprüft wurden. Die Pass- und Vergleichspunkte der DMC- und der UltraCam-Aufnahmen wurden im Durch-

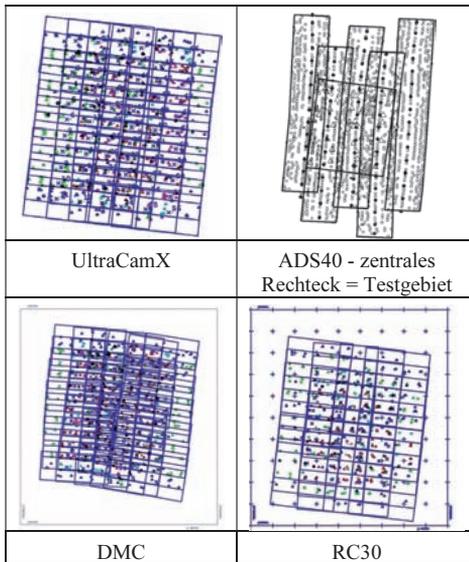


Abb. 4: Blockkonfigurationen Franklin Mills.

schnitt in 5,4 bis 6,4 Bildern gemessen, im Falle der RC30 in 9,1 Bildern und bei der ADS40 in 5,0 Bildstreifen, wobei durch die drei panchromatischen Bildzeilen drei Bildstreifen erzeugt werden. Abb.4 zeigt die Blockkonfiguration der UltraCamX, der ADS40, der DMC und der RC30. Die Konfiguration der UltraCamD-Aufnahmen entspricht der der UltraCamX.

Es wurden Blockausgleichungen mit 8, 15 und allen Passpunkten berechnet. Die Ergebnisse mit 15 Passpunkten unterscheiden sich nicht wesentlich von den Ausgleichungen mit 8 Passpunkten, weswegen nur letztere gezeigt werden. Im Fall von 8 und 15 Passpunkten wurden die verbliebenen als unabhängige Vergleichspunkte verwendet. Es wurden nicht immer die gleichen Passpunkte verwendet, da einzelne Punkte durch parkende Fahrzeuge verdeckt waren.

Mit Ausnahme der ADS40-Daten erfolgten die Blockausgleichungen ohne Unterstützung der nur teilweise vorhandenen GPS-Koordinaten der Projektionszentren und inertialer Daten, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten und um die Auswirkung nicht erfasster systematischer Bildfehler klarer zu zeigen.

## 5.1 DMC

Bei der DMC wirken sich die zusätzlichen Parameter nur geringfügig auf die Ergebnisse der Blockausgleichung aus (siehe Tab. 5). Die besten Ergebnisse wurden mit den Standardparametern 1–12 zusammen mit den gemeinsamen DMC-spezifischen Parametern 79 und 80 erzielt. Ausgleichungen mit den 16 individuellen DMC-spezifischen Parametern führten in der Regel zu geringfügig schlechteren Resultaten. Der Hauptgrund für die nur geringfügige Verbesserung durch die Selbstkalibrierung ist in der beschränkten Blockgröße zu sehen. Dieses war bei dem Hansa Luftbild-Block Gent mit 1105 DMC-Bildern anders. Hier wurde die Höhen Genauigkeit von 19,1 cm ohne Selbstkalibrierung auf 5,7 cm mit Selbstkalibrierung verbessert (Wu 2007). Die Selbstkalibrierung verhindert die Blockdeformation in der Höhe. Durch kombinierte Blockausgleichung mit relativ kinematischen GPS-Positionen der Projektionszentren verringert sich die Verbesserung durch die Selbstkalibrierung.

Tab. 5: Quadratmittel der Widersprüche an 32 unabhängigen Vergleichspunkten – Blockausgleichung der DMC-Bilder mit 8 Passpunkten, 54 mm Objektpixelgröße.

DMC	SX	SY	SZ	$\sigma_0$
ohne Selbstkalibrierung	2,5 cm	1,8 cm	3,4 cm	3,51 $\mu\text{m}$
Parameter 1–12	2,4 cm	1,7 cm	3,4 cm	3,49 $\mu\text{m}$
Parameter 1–12, 79–80	2,4 cm	1,7 cm	3,0 cm	3,48 $\mu\text{m}$
Parameter 1–12, 30–41, 74–77	2,5 cm	1,8 cm	3,4 cm	3,48 $\mu\text{m}$

## 5.2 UltraCamD

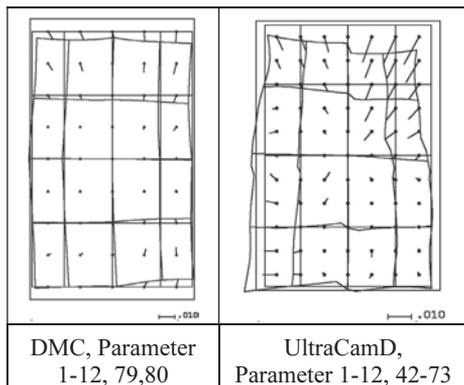
Die Blockausgleichung der UltraCamD-Bilder (siehe Tab. 6) zeigt eine deutliche Genauigkeitssteigerung durch die Selbstkalibrierung. Die Lagegenauigkeit wird durch die Selbstkalibrierung im Quadratmittel von 3,7 cm auf 2,9 cm verbessert. Allerdings ergibt die Ausgleichung mit den UltraCam-spezifischen Parametern 42–73 nur eine ge-

**Tab. 6:** Quadratmittel der Widersprüche an 33 unabhängigen Vergleichspunkten – Blockausgleichung der UltraCamD-Bilder mit 8 Passpunkten, 42 mm Objektpixelgröße.

UltraCamD	SX	SY	SZ	$\sigma_0$
ohne Selbstkalibrierung	4,3 cm	3,0 cm	8,3 cm	4,32 $\mu\text{m}$
Parameter 1–12	3,2 cm	2,6 cm	7,9 cm	4,27 $\mu\text{m}$
Parameter 1–12, 42–73	3,8 cm	2,5 cm	8,0 cm	4,18 $\mu\text{m}$

ringförmige Verbesserung der Standardabweichung der Gewichtseinheit  $\sigma_0$  und der Y-Komponente, wogegen sich die X- und die Z-Komponente gegenüber dem Standardsatz der zusätzlichen Parameter verschlechtern. Bei diesem Datensatz sind somit die kameraspezifischen zusätzlichen Parameter nicht gerechtfertigt. Die Verbesserung durch die Selbstkalibrierung mit den Parametern 1–12 kann durch die systematischen Bildfehler erklärt werden, die deutlich größer als bei der DMC sind (siehe Abb. 5), sie werden bereits durch die Standardparameter ausreichend erfasst.

Die UltraCamD-Bilder wurden mit der alten Software von Vexcel Imaging zusammengefügt, diese wurde von Vexcel Imaging überarbeitet, womit geometrische Probleme von UltraCam-Bildern besser berücksichtigt wurden. In Zusammenarbeit mit der Deutschen Steinkohle wurden UltraCamD-Bilder eines Bergbaublockes basierend auf



**Abb. 5:** Systematische Bildfehler Franklin Mills.

den alten Teilbildern mit der neuen Software erneut zusammengefügt. Damit verringerte sich die Größe der systematischen Bildfehler deutlich und auch die Ergebnisse der Blockausgleichung verbesserten sich (SPRECKELS et al. 2007 und 2008).

### 5.3 UltraCamX

Auch die Blockausgleichung der UltraCamX-Daten zeigt eine entsprechende Verbesserung durch die Selbstkalibrierung (siehe Tab. 7 und 8). Zuerst standen nur panchromatische UltraCamX-Bilder zur Verfügung, später erstellte Vexcel Imaging die virtuellen UltraCamX-Bilder durch Zusammenfügen der Teilbilder erneut und stellte auch die panchromatischen Bilder zur Verfügung. Die UltraCamX-Bilder wurden allerdings in beiden Fällen mit der neuen Software aus den Teilbildern zusammengefügt.

**Tab. 7:** Quadratmittel der Widersprüche an 34 unabhängigen Vergleichspunkten – Blockausgleichung der panchromatischen UltraCamX-Bilder mit 8 Passpunkten, 37 mm Objektpixelgröße.

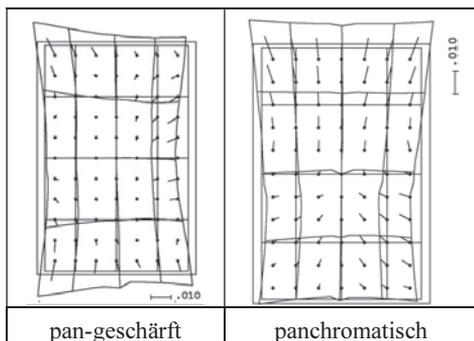
UltraCamX panchromatisch	SX	SY	SZ	$\sigma_0$
Ohne Selbstkalibrierung	4,3 cm	3,0 cm	8,3 cm	3,06 $\mu\text{m}$
Parameter 1–12	2,0 cm	1,6 cm	3,8 cm	2,98 $\mu\text{m}$
Parameter 1–12, 42–73	2,8 cm	1,7 cm	4,2 cm	2,99 $\mu\text{m}$

**Tab. 8:** Quadratmittel der Widersprüche an 34 unabhängigen Vergleichspunkten – Blockausgleichung der panchromatischen UltraCamX-Bilder mit 8 Passpunkten, 37 mm Objektpixelgröße.

UltraCamX panchromatisch	SX	SY	SZ	$\sigma_0$
Ohne Selbstkalibrierung	2,8 cm	1,9 cm	8,7 cm	2,98 $\mu\text{m}$
Parameter 1–12	1,5 cm	1,4 cm	4,7 cm	2,94 $\mu\text{m}$
Parameter 1–12, 42–73	1,6 cm	1,4 cm	5,3 cm	2,88 $\mu\text{m}$

Vexcel Imaging führte anschließend zusätzlich eine automatische Aerotriangulation mit INPHO Match AT durch. Mit diesen Daten erreichte eine Blockausgleichung durch BLUH eine Standardabweichung der Gewichtseinheit  $\sigma_0$  von  $1,0 \mu\text{m}$  statt  $3,0 \mu\text{m}$  mit durch LPS bestimmten Verknüpfungspunkten. Wegen der hohen Anzahl von Verknüpfungspunkten machte sich das allerdings nicht bei der Genauigkeit unabhängiger Vergleichspunkte bemerkbar. Eine unabhängige Aerotriangulation mit der Software LPS von Leica und die Messung der Pass- und Verknüpfungspunkte durch eine erfahrene Auswerterin der Leibniz Universität Hannover führte trotz des  $\sigma_0$  von etwa  $3 \mu\text{m}$  zu besseren Ergebnissen an unabhängigen Vergleichspunkten, erklärbar durch eine sehr sorgfältige manuelle Messung der Bildposition von Pass- und Vergleichspunkten.

Mit den neu berechneten, panchromatischen Bildern, verbesserte sich die Lagegenauigkeit an unabhängigen Vergleichspunkten, wogegen sich die Höhengenaugkeit etwas verschlechterte. Die Steigerung der Lagegenauigkeit ist zumindest teilweise auf die bessere Bildqualität der panchromatischen Bilder zurückzuführen, die die manuelle Messung der Pass- und Verknüpfungspunkte verbesserte. Die Höhengenaugkeit wird durch nicht erfasste zufällige und systematische x-Komponenten der Bildfehler bestimmt. Eine Standardabweichung der Höhengenaugkeit von  $4,7 \text{ cm}$  würde einer



**Abb. 6:** Systematische Bildfehler der Ultra-CamX, basierend auf den zusätzlichen Parametern 1–12, 42–73, Testgebiet Franklin Mills.

Standardabweichung der x-Parallaxe von  $0,27$  Pixeln entsprechen, wenn die Vergleichspunkte nur in zwei Bildern gemessen wären. Die geringfügige Verschlechterung der Höhengenaugkeit kann somit durch Sub-Pixel-Einflüsse der Teilbildzusammenfügung hervorgerufen worden sein. Die systematischen Bildfehler veränderten sich durch die erneute Zusammenfügung der Teilbilder nicht ihre Größenordnung, wohl aber in ihrer Geometrie (siehe Abb. 6).

#### 5.4 ADS40

Die Bilder der Zeilenkamera Leica ADS40 wurden wegen der vollständig anderen Geometrie mit ORIMA ausgewertet. Es wurden in dem Testgebiet Franklin Mills die gleichen Pass- und Vergleichspunkte wie bei den Flächenkameras verwendet, wobei, wie auch bei den anderen Befliegungen, einzelne Passpunkte wegen Verdeckung durch Fahrzeuge ausfielen. Die Art der Bilderfassung führt zu rechteckigen Objektpixeln von  $53 \text{ mm} \times 91 \text{ mm}$  und zu Bildstreifen (siehe Abb. 4).

Die Selbstkalibrierung wurde auf die 2 Affinparameter beschränkt, sie wirkt sich aber kaum auf die Objektkoordinaten aus. Um systematische Objektkoordinatenfehler zu vermeiden, musste der Block durch hohe Gewichte stark an die Passpunkte angebunden werden, damit eine Objektkoordinatengenauigkeit der unabhängigen Vergleichspunkte von  $2 \text{ cm}$  bis  $3 \text{ cm}$  erreicht werden konnte (siehe Tab. 9). Bei normaler Gewichtung der Passpunkte dominierte der Einfluss der direkten Sensororientierung und es kam zu systematischen Höhenfehlern, die sich bereits an den Passpunkten zeigten. Die

**Tab. 9:** Quadratmittel der Widersprüche an 34 unabhängigen Vergleichspunkten – Blockausgleichung der ADS40-Bilder,  $53 \text{ mm} \times 91 \text{ mm}$  Objektpixelgröße.

Passpunkte	SX	SY	SZ
1	5,2 cm	2,7 cm	4,5 cm
4	2,3 cm	2,5 cm	3,1 cm
8	2,1 cm	2,4 cm	3,1 cm
15	2,0 cm	2,2 cm	2,7 cm

Standardabweichung der Gewichtseinheit änderte sich durch unterschiedliche Gewichtung und eine unterschiedliche Anzahl von Passpunkten kaum und lag zwischen 4,9  $\mu\text{m}$  und 5,0  $\mu\text{m}$ .

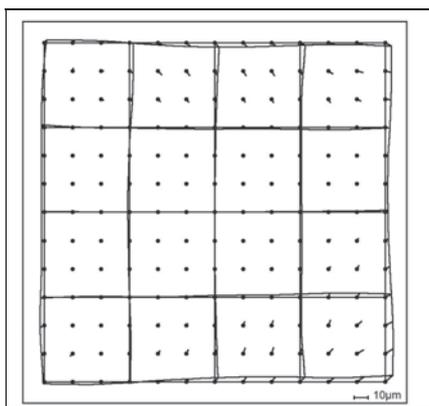
Mit Ausnahme der Ausgleichung mit nur einem Passpunkt ist die Genauigkeit der Blockausgleichung mit ADS40-Bildern nicht stark von der Anzahl der Passpunkte abhängig. Ein direkter Vergleich mit den Ergebnissen der Flächenkameras ist jedoch schwierig, da diese nicht durch GPS und inertielle Daten unterstützt wurden und somit eine Blockdeformation nicht auszuschließen ist.

### 5.5 RC30

Die Ausgleichung der analogen RC30-Weitwinkelaufnahmen mit dem Bildmaßstab 1:3930, lag mit einer Standardabweichung der Gewichtseinheit von etwa 6  $\mu\text{m}$  im üblichen Rahmen. Die systematischen Bildfehler sind mit maximal 6  $\mu\text{m}$  recht klein (siehe

**Tab. 10:** Quadratmittel der Widersprüche an 34 unabhängigen Vergleichspunkten – Blockausgleichung der RC30-Bilder mit 8 Passpunkten, 49 mm Objektpixelgröße.

RC30	SX	SY	SZ	$\sigma_0$
Ohne Selbstkalibrierung Parameter 1–12	2,4 cm	3,6 cm	4,1 cm	6,02 $\mu\text{m}$
	2,6 cm	3,7 cm <td 4,5 cm	5,94 $\mu\text{m}$	

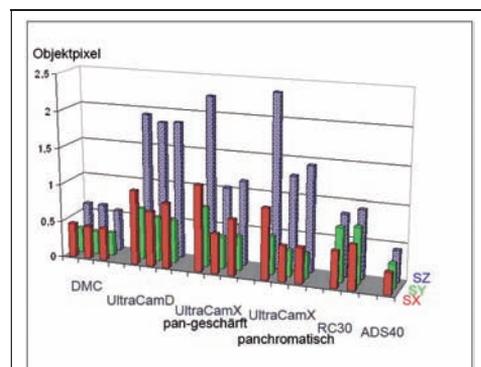


**Abb. 7:** Systematische Bildfehler der RC30-Aufnahmen.

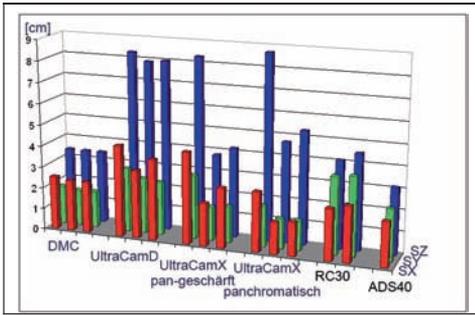
Abb. 7 und Tab. 10), dementsprechend ergab sich auch keine Verbesserung der Ausgleichung durch Selbstkalibrierung mit dem Standardsatz der zusätzlichen Parameter. Ein Block von nur 35 Luftbildern, mit 60% Längs- und Querüberdeckung, gestützt durch 8 Passpunkte, ist auch so stabil, dass dieses nicht zu erwarten war. Die Relation zwischen der Lage- und der Höhengengenauigkeit ist nicht weit von dem Höhen-Basis-Verhältnis von 1,6 entfernt.

### 5.6 Diskussion

Ein Vergleich der verschiedenen Ergebnisse sollte in Relation zur Objektpixelgröße erfolgen, da die Objektpixelgröße zwischen 37 mm und 72 mm (Mittelwert für die ADS40) variiert (siehe Abb. 8). Andererseits muss berücksichtigt werden, dass für die Pass- und Vergleichspunkte eine Standardabweichung von nicht schlechter als 2 cm angegeben sind. Eine Differenzierung der Ergebnisse unter einer Genauigkeit von 2 cm ist somit nicht möglich. Umgekehrt ist das sehr gute Ergebnis der ADS40 in Relation zur Objektpixelgröße mit der mittleren Objektpixelgröße von 72 mm leichter erzielbar, weswegen auch die absoluten Ergebnisse verglichen werden sollten (siehe Abb. 9).



**Abb. 8:** Vergleich der an unabhängigen Vergleichspunkten erzielten Genauigkeiten von Blockausgleichungen mit 8 Passpunkten [Objektpixelgröße]. Innerhalb der Gruppen: von links – ohne Selbstkalibrierung/Selbstkalibrierung mit dem Standardsatz zusätzlicher Parameter/Selbstkalibrierung mit den Standard- und den kameraspezifischen Parametern.



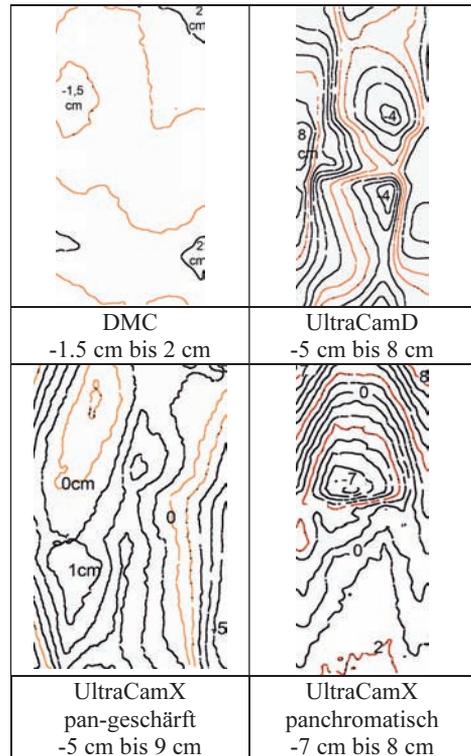
**Abb. 9:** Vergleich der an unabhängigen Vergleichspunkten erzielten Genauigkeiten von Blockausgleichungen mit 8 Passpunkten [cm], gleiche Anordnung wie in Abb. 8.

Die Bildblöcke des Testgebiets Franklin Mills sind nicht ausreichend groß, um die Vorteile der Selbstkalibrierung deutlich zu machen. Nur bei den UltraCam-Daten ergibt sich bereits eine deutliche Verbesserung durch die zusätzlichen Parameter. Bei größeren Blöcken, die nicht durch GPS-Koordinaten der Projektionszentren und/oder inertielle Daten unterstützt werden, zeigt sich eine erhebliche Verbesserung vor allem der Objekthöhen durch die Selbstkalibrierung (JACOBSEN 2007). Hier führen die kameraspezifischen zusätzlichen Parameter für die UltraCamD und die DMC zu einer Genauigkeitssteigerung unabhängiger Vergleichspunkte gegenüber dem Standardsatz der zusätzlichen Parameter, wobei sich zeigte, dass für die DMC die kameraspezifischen Parameter 79 und 80 ausreichend sind (JACOBSEN 2007). Der Standardsatz der von BLUH benutzten zusätzlichen Parameter reicht dagegen bei kleineren Blöcken, wie Franklin Mills, aus. Eine Ausgleichung des DMC-Blocks Gent (WU 2007) zeigte allerdings, dass zwar die 12 Parameter von BLUH zu guten Ergebnissen führen, nicht jedoch der Ebner-Ansatz (EBNER 1976). Hier waren die 44 Parameter des Grün-Ansatzes (GRÜN 1979) erforderlich, der allerdings auch einen Trend zur Überparameterisierung in sich birgt. ALAMUS et al. 2007 benutzte aus diesem Grund für die Berechnung von DMC-Blöcken separate zusätzliche Parameter für die vier Bildviertel.

## 6 Modelldeformation

Die systematischen Bildfehler werden in der Blockausgleichung berücksichtigt und bereiten dort kein Problem. Anders ist es bei der anschließenden Auswertung photogrammetrischer Modelle. Die systematischen Bildfehler wirken sich in der Regel nicht erheblich auf die Lagekomponenten aus, anders ist es mit der Höhe – die korrespondierenden Modelldeformationen können die Standardabweichung der Höhenermittlung überschreiten, müssen somit zumindest analysiert werden.

Abb. 10 zeigt die Modelldeformationen der in Franklin Mills eingesetzten digitalen Kameras. Unter der Voraussetzung einer operationellen Genauigkeit der x-Parallaxe von 0,5 Pixeln sollte mit der DMC eine Höhengenaugkeit von 8,6 cm, mit der Ultra-

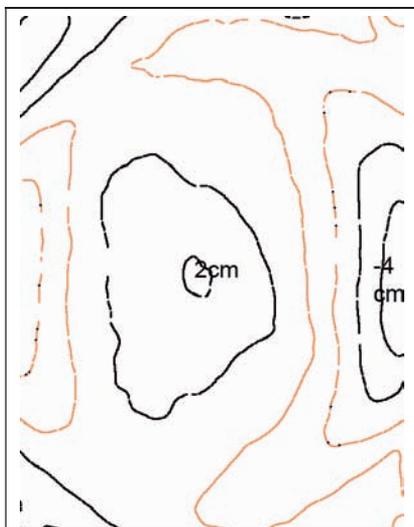


**Abb. 10:** Durch systematische Bildfehler hervorgerufene Höhenmodelldeformation des Testgebiets Franklin Mills, basierend auf den Standard- und kameraspezifischen Parametern, Äquidistanz 1 cm.

CamD 7,8 cm, mit der UltraCamX 6,8 cm und mit der RC30 4 cm erreicht werden. Dieses berücksichtigt die unterschiedliche Objektpixelgröße und das Höhen-Basis-Verhältnis für 60% Längsüberdeckung von 3,1 für die DMC, 3,7 für die UltraCam und 1,6 für die Weitwinkel-RC30. Diese abgeschätzte Höhengenaugigkeit ist geringer als die durch Blockausgleichung erreichbare. Bei der Blockausgleichung werden klar definierte Punkte bestimmt und die Punkte sind in mehr als 2 Bildern vorhanden.

Die Modelldeformationen der DMC und der RC30 sind kleiner als die abgeschätzten Höhengenaugigkeiten, während sie bei den UltraCam größer sind. Diese Modelldeformationen wirken sich nicht aus, wenn die Auswertesoftware in der Lage ist, die systematischen Bildfehler zu berücksichtigen. Eine andere, allerdings zeitaufwendigere Methode ist die Änderung der Bildgeometrie um die systematischen Bildfehler, wie es im hannoverschen Programm IMGEO realisiert ist oder eine a posteriori Korrektur der Höhen wie durch das hannoversche Programm DEMCOR.

Bei Modellauswertungen mit ADS40-Bildern treten wegen der Zeilensensorgeome-



**Abb. 11:** Durch systematische Bildfehler hervorgerufene Höhenmodelldeformation eines RC30-Modells mit 60% Längsüberdeckung, Deformationen von  $-4$  cm bis  $3$  cm.

trie prinzipiell andere Modelldeformationen als bei den Flächensensoren auf. In der Ausgleichung mit der Bündel-Ausgleichungssoftware ORIMA wurden nur 2 Affinparameter für die Selbstkalibrierung eingesetzt. Sie erzeugen keine Modelldeformation.

## 7 Zusammenfassung

Das hohe Genauigkeitsniveau der digitalen Kameras wurde bestätigt. Mit ähnlicher Objektpixelgröße wurden mit DMC-, UltraCamX- und ADS40-Aufnahmen bessere Lagegenauigkeiten als mit der analogen Weitwinkel-RC30 erreicht, mit DMC- und ADS40-Bildern auch eine bessere Höhengenaugigkeit.

Mit nur zwei kameraspezifischen zusätzlichen Parametern können die Auswertungen der DMC-Aufnahmen verbessert werden, eine höhere Anzahl individueller DMC-spezifischer Parameter bringt keine Steigerung der Genauigkeit. Die mit der alten Software von Vexcel Imaging zur Vereinigung der Teilbilder erstellten UltraCamD-Aufnahmen haben geometrische Schwächen, die mit der neuen Software vermieden werden können. Mit den 32 UltraCam-spezifischen zusätzlichen Parametern konnte in den kleinen Testblöcken keine Verbesserung der Ergebnisse gegenüber einer Ausgleichung mit dem Standardsatz der zusätzlichen Parameter erzielt werden, dieses war anders in einem großen Block mit mehr als 2000 Aufnahmen. Die UltraCamX-Aufnahmen wurden mit der neuen Software zweifach erstellt. Mit den erneut erstellten Aufnahmen konnten bessere Lage-, aber keine besseren Höhengenergebnisse erzielt werden.

Mit der Zeilenscannerkamera ADS40 ließen sich, basierend auf 4 Passpunkten, mit  $2$  cm bis  $3$  cm Genauigkeit Subpixelgenauigkeiten erreichen wenn der Block stark an die Passpunkte gebunden wird.

Die photogrammetrischen Modellauswertungen sollten die systematischen Bildfehler berücksichtigen, um nicht unnötig das Genauigkeitspotenzial zu verschlechtern. Alternativ kann die Bildgeometrie um die systematischen Bildfehler verbessert oder

Höhenmodelle a posteriori korrigiert werden.

Die Bildqualität wurde mittels Kantenganalyse untersucht. Es zeigte sich, dass die mit 12,5 µm Pixelgröße gescannten Analogbilder nur einen Informationsgehalt haben, der einer Pixelgröße von 18 µm entspricht, oder in Relation zu erkennbaren Objektdetails nur 27 µm, damit entspricht der Informationsgehalt einer RC30-Aufnahme dem einer UltraCamD-Aufnahme. Panchromatische UltraCam-Bilder weisen einen allgemeinen Verlust an Bildqualität auf, während panchromatische UltraCam-Bilder nur in den Bildecken eine etwas geringere Bildqualität haben.

### Danksagung

Ich danke Dr. Ricardo Passini von BAE SYSTEMS, Network Systems (GP&S), Mt. Laurel, New Jersey, USA, für die Unterstützung der Untersuchungen und die Bereitstellung der Daten.

### Literatur

- ALAMUS, R., KORNU, W. & RIESINGER, I., 2007: DMC Geometric Performance Analysis. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36/1W51, on CD and [www.ipi.uni-hannover.de](http://www.ipi.uni-hannover.de) (Mai 2008).
- CRAMER, M., 2007: The EuroSDR Performance Test for Digital Aerial Camera Systems. – Photogrammetric Week '07, Wichmann Verlag, Heidelberg, 89–104.
- EBNER, H., 1976: Self-calibrating block adjustment. – International Archives of Photogrammetry **21** (B3).
- GRÜN, A., 1979: Self-Calibration versus Testfield Calibration. – Proceedings, ISP WG III/3 Workshop, Aalborg, 53–73.
- JACOBSEN, K., 1980: Attempt at Obtaining the Best Possible Accuracy in Bundle Block Adjustment. – International Archives of Photogrammetry **23** (B3): 304–313.
- JACOBSEN, K., 2007: Geometric Handling of Large Size Digital Airborne Frame Camera Images. – Optical 3D Measurement Techniques VIII, Zürich 2007, 164–171.
- JACOBSEN, K., 2008a: Comparison of Large Size Digital Airborne Frame Cameras with Analogue Film Cameras. – Geoinformation in Europe, Proceedings, EARSeL Symposium, Millpress, Rotterdam, 89–95.
- JACOBSEN, K., 2008b: Tells the number of pixels the truth? – Effective Resolution of Large Size Digital Frame Cameras. – Proceedings, ASPRS 2008 Annual Conference, Portland, American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 7 Seiten auf CD.
- KÖLBL, O., 2005: Transfer Functions in Image Data Collection. – Photogrammetric Week '05, Wichmann Verlag, Heidelberg, 93–104.
- OSWALD, H. C., 2007: Potential digitaler photogrammetrischer Luftbildkameras. – Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Leibniz Universität Hannover, [www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Diplomarbeit\\_Oswald.pdf](http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Diplomarbeit_Oswald.pdf) (Mai 2008).
- SPRECKELS, V., SCHLIENKAMP, A. & JACOBSEN, K., 2007: Model Deformation – Accuracy of Digital Frame Cameras. – International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36/1W51, on CD and [www.ipi.uni-hannover.de](http://www.ipi.uni-hannover.de) (Mai 2008).
- SPRECKELS, V., SCHLIENKAMP, A. & JACOBSEN, K., 2008: Geometric Characteristic of Digital Frame Cameras. – EARSeL Workshop Remote Sensing – New Challenges of High Resolution, Bochum, and [www.ipi.uni-hannover.de](http://www.ipi.uni-hannover.de) (Mai 2008).
- TEMPELMANN, U., HINSKEN, L. & RECKE, U., 2003: ADS40 Calibration Verification Process. – Proceedings ISPRS WG I/5 “Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS Sensor Orientation”, Castelldefels.
- WU, D. (2007): Geometric aspects of large size digital frame cameras and their use for photogrammetric data acquisition. – Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, Leibniz Universität Hannover, [www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Wu\\_Diplomarbeit.pdf](http://www.ipi.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/Wu_Diplomarbeit.pdf) (Mai 2008).

### Anschrift des Autors:

Dr.-Ing. KARSTEN JACOBSEN, Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI), D-30167 Hannover, Nienburger Str. 1, Tel.: +49-511-762-2485, Fax: +49-511-762-2483, e-mail: [jacobsen@ipi.uni-hannover.de](mailto:jacobsen@ipi.uni-hannover.de)

Manuskript eingereicht: April 2008  
Angenommen: Juni 2008