

DGPF-Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamerasysteme – Auswerteteam Geometrie

KARSTEN JACOBSEN

Zusammenfassung: Im Rahmen des DGPF-Projektes „Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamerasysteme“ werden Teile der Untersuchungen durch das „Auswerteteam Geometrie“ dargestellt. Dieses umfasst Ergebnisse der Blockausgleichungen mit folgenden Kameras bzw. Kamerasystemen: Z/I Imaging DMC, Vexcel Imaging UltraCamX, analoge Kamera RMK Top 15, Zeilenkamera Leica Geosystems ADS40, Zeilenkamera Jenaoptronik JAS-150, IGI DigiCam quattro und Rolleimetric AIC – x1. Die Ergebnisse der DLR 3K-Kamera werden direkt vom DLR dargestellt. Die Auslieferung der Rolleimetric AIC – x4 hat sich auch wegen des Ausfalls einer Teilkamera verzögert.

Die Befliegungen des Testfelds Vaihingen der Universität Stuttgart erfolgte wegen ungünstiger Wetterbedingungen später als ursprünglich geplant und zog sich über 10 Wochen hin. Wegen sich ändernder Bewölkung während der Befliegungen konnten auch nicht alle vorgesehenen Flugstreifen aufgenommen werden. Die vorgesehenen Objektpixelgrößen (ground sampling distance = GSD) von 20cm und 8cm wurden nicht in jedem Fall eingehalten und es gab auch einzelne technische Probleme der Bildregistrierung und der Kamerafokussierung. Zudem zeigte sich die Punktsignalisierung für 20cm GSD nicht in jedem Fall als optimal. Die begrenzte Blockgröße vermeidet teilweise Deformation der Blöcke durch nicht erfasste systematische Bildfehler, die sich bei größeren Blöcken, die nicht durch direkte Sensororientierung unterstützt werden, stark auswirken können. Die Auswertung durch automatische Aerotriangulation mit manueller Messung der Pass- und Vergleichspunkte wurde mit unterschiedlicher Software durchgeführt. Aus diesen Gründen können die erfassten Datensätze nicht benutzt werden um die Kameras direkt miteinander zu vergleichen. Teilweise werden die erzielten Genauigkeiten auch von den manuellen Messungen der Pass- und Vergleichspunkte dominiert. Ungeachtet dessen hat dieser Kameratest zu einer besseren Einschätzung des Potentials der digitalen Kameras und zu Erfahrungen in der optimalen Behandlung der Datenerfassung und -bearbeitung geführt, die für den Praxiseinsatz von erheblicher Bedeutung sind.

1 Einführung

Großformatige digitale Luftbildkameras ersetzen bereits heute einen großen Teil der analogen Luftbildkameras und es ist abzusehen, wann die analogen Kameras vollständig ersetzt werden. In einzelnen Ländern werden analoge Luftbilder nicht mehr akzeptiert und in einigen deutschen Bundesländern erfolgte bereits eine vollständige Umstellung. Darüber hinaus werden für Sonderprojekte zunehmend auch digitale Mittelformatkameras eingesetzt, was dazu geführt hat, dass Z/I Imaging, Vexcel Imaging und Leica Geosystems jetzt auch digitale Mittelformatkameras anbieten. Die digitalen Zeilenkameras haben trotz ihres Potentials noch Probleme sich auf dem klassischen Feld der Photogrammetrie durchzusetzen da sie eine vollständige Umstellung der traditionellen Datenerfassung erfordern, bislang ist ihr dominierender Einsatzbereich die Erstellung großflächiger Orthofotos.

Das geometrische Potential der digitalen Kameras wirkt sich auf die Auswertung der photogrammetrischen Modelle aus (Jacobsen 2008), zeigt sich aber vor allem bei der

Blockausgleichung. Aus diesem Grund werden im Folgenden die Ergebnisse von Blockausgleichungen gezeigt. Wichtiger Punkt neben der erzielten Genauigkeit der Objektpunkte ist die vollständige Erfassung systematischer Bildfehler, die sich vor allem bei großen Blöcken, die nicht durch direkte Sensororientierung unterstützt werden, mit Blockdeformationen auswirken. Für die erreichte Objektpunktgenauigkeit sind die Testdatensätze teilweise zu klein um sie durch direkte Sensororientierung zu verbessern. Zur Analyse der erzielten Genauigkeit werden die Widersprüche an unabhängigen Vergleichspunkten verwendet. Die Widersprüche an Passpunkten, wie auch die Standardabweichungen, werden von einigen Blockausgleichungsprogrammen zu optimal dargestellt und haben teilweise nichts mit der Realität der erzielten Objektpunktgenauigkeit zu tun. Es sollte auch beachtet werden, dass die hier gezeigten Objektpunktgenauigkeiten von der Überlappung der Bilder abhängen und auf bis zu 32 Bilder je Objektpunkt zurückzuführen sind. Die Auswertung in Einzelmodellen ist etwas anderes.

2 Manuelle Messung der Pass- und Verknüpfungspunkte

Die Bildkoordinaten der Pass- und Verknüpfungspunkte wurden in der Regel manuell gemessen da das Erscheinungsbild der signalisierten Punkte zu unterschiedlich ist. Die manuelle Messung dominiert teilweise die Objektpunktbestimmung. Da das Erscheinungsbild der signalisierten Punkte nicht unabhängig vom Hintergrund ist, kann das einfache Fehlerfortpflanzungsgesetz für die Genauigkeit der Objektkoordinaten nicht verwendet werden. Das gilt vor allem für die Datensätze mit 20cm GSD, bei denen die schwarzen Punktzentren teilweise nicht sichtbar sind. Von den folgenden Datensätzen lagen die Bildkoordinaten der Pass- und Vergleichspunkte von verschiedenen Organisationen vor und eigneten sich für eine Bestimmung der Punkteinstellgenauigkeit.

Anzahl der Differenzen	SX	SY	maximal DX	maximal DY	Differenzen >6µm (>0,88 GSD)
444	2,1µm 0,31 Pixel	2,9µm 0,48 Pixel	7,3µm 1,07 Pixel	6,1µm 0,90 Pixel	5

Tabelle 1: Widersprüche manuell gemessener Bildkoordinaten – DigiCam 8cm GSD
Messungen Leibniz Universität Hannover und CuB-Technik

Anzahl der Differenzen	SX	SY	maximal DX	maximal DY	Differenzen >6µm (>0,50 GSD)
308	3,1µm 0,26 Pixel	3,9µm 0,32 Pixel	7,9µm 0,66 Pixel	10,3µm 0,86 Pixel	35

Tabelle 2: Widersprüche manuell gemessener Bildkoordinaten – DMC 8cm GSD
Messungen CuB Technik und LVG München

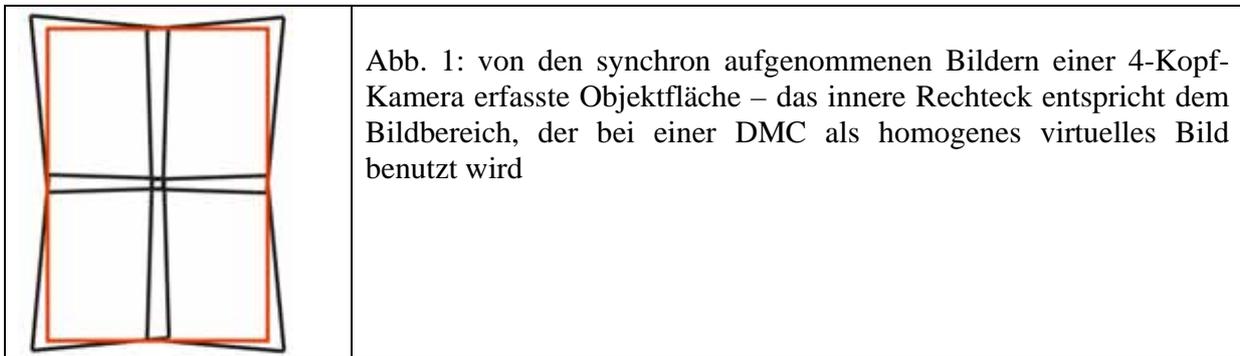
Anzahl der Differenzen	SX	SY	maximal DX	maximal DY	Differenzen >8µm (>0,67GSD)
556	2,9µm 0,24 Pixel	3,8µm 0,32 Pixel	19,3µm 1,61 Pixel	13,4µm 1,12 Pixel	29

Tabelle 3: Widersprüche manuell gemessener Bildkoordinaten – DMC 20cm GSD
Messungen CuB Technik und LVG München

Die Quadratmittel der Widersprüche müssen durch 1,414 dividiert werden um die individuelle Punkteinstellgenauigkeit abzuschätzen. Hier gilt das einfache Fehlerfortpflanzungsgesetz da die gleichen Bilder und Punkte gemessen wurden. Die Einstellgenauigkeit liegt dementsprechend zwischen 0,17 Pixel und 0,34 Pixel. Da die Pixelgröße der DigiCam 6,8 μ m und die der DMC 12 μ m beträgt, müssen die Resultate immer auf die Pixelgröße bezogen werden. Es fällt auf, dass bei diesen Datensätzen die Punkteinstellgenauigkeit in der y-Richtung signifikant schlechter als in der x-Richtung ist. Die Maximaldifferenzen der Bilder mit 20cm GSD sind größer als die der Bilder mit 8cm GSD, dieses kann mit Überstrahlungen der weißen Punktumrandung erklärt werden, die die schwarzen Punktzentren verdecken.

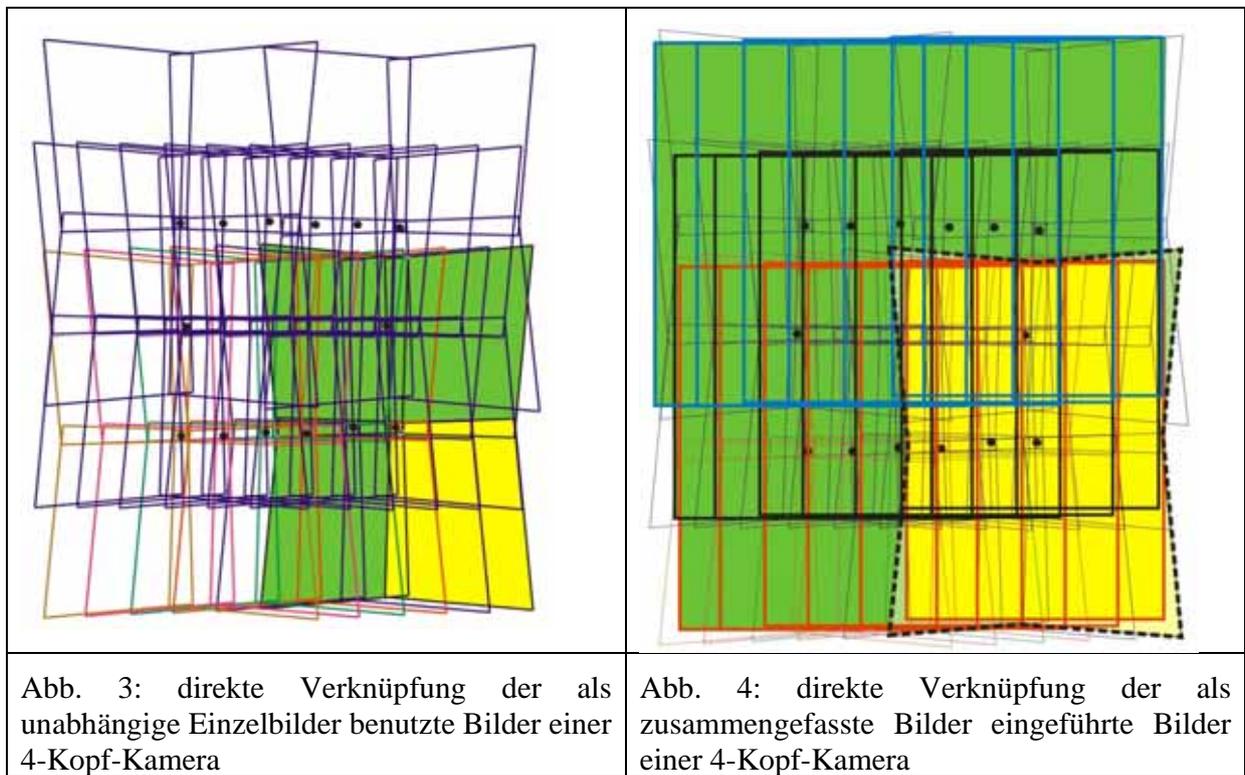
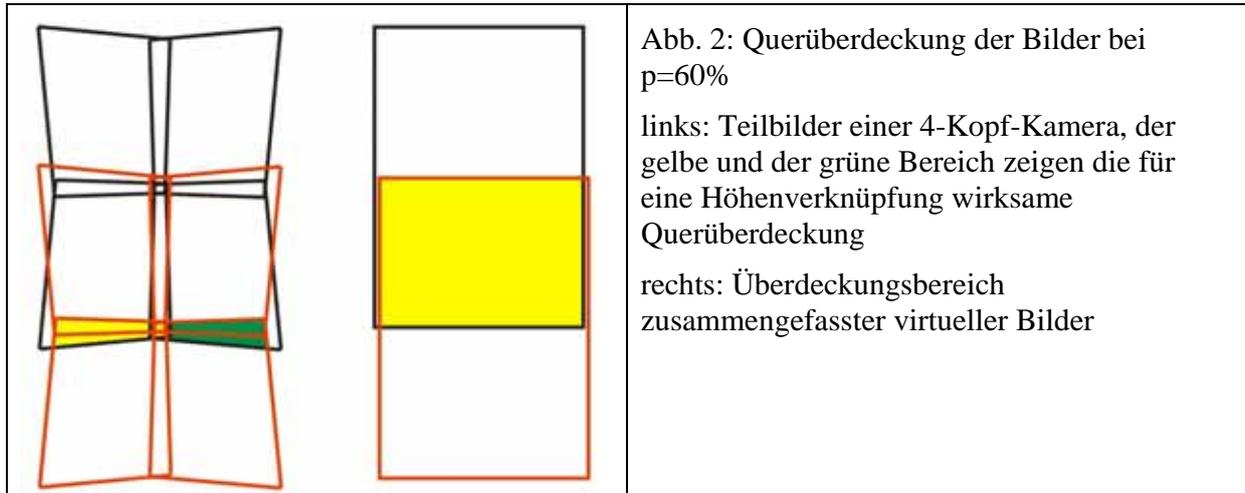
3 Orientierung der Bilder von 4-Kopf-Kameras

4-Kopf-Kameras nehmen vom genähert gleichen Projektionszentrum synchron 4 leicht konvergente Aufnahmen auf (Abb.1).



Diese Bildgeometrie entspricht der Aufnahmeanordnung der panchromatischen Teilbilder einer Z/I Imaging DMC. Im Gegensatz zur DMC werden die Bilder der 4-Kopf-Kameras nicht zu einem homogenen virtuellen Bild zusammengefasst. Eine Blockausgleichung mit Bildern einer 4-Kopf-Kamera könnte die Aufnahmezentren der simultan erstellten Bilder zusammenfassen, was aber auch nicht ganz korrekt ist. Die Ablage der Aufnahmezentren der Teilkameras einer DMC wird bei der Erstellung homogener virtueller Bilder berücksichtigt – das ist nicht das gleiche wie die Zusammenfassung der Projektionszentren der 4-Kopf-Kameras. Außerdem werden bei einer DMC auch die Winkelbeziehungen bestimmt und genutzt.

Werden die Bilder einer 4-Kopf-Kamera als Einzelbilder in die Blockausgleichung eingeführt, geht der geometrische Bezug zwischen den Teilbildern verloren und die Bilder sind entsprechend schwächer miteinander verbunden. Wie in Abbildung 2 gezeigt, wirkt eine Querüberdeckung von 60% des Gesamtbereichs der von einer 4-Kopf-Kamera erfasst wird, nur wie eine Querüberdeckung von 20%. Damit kann eine Verwindung der Bildstreifen nicht ohne eine ausreichende Anzahl von Höhenpasspunkten vermieden werden. Erst eine Querüberdeckung von 80% führt zu einer Stabilisierung des Blockes, die einer klassischen Querüberdeckung von 60% entspricht. Eine andere Möglichkeit stellt die Verwendung der integrierten Sensororientierung dar, bei der der gegenseitige Bezug der 4 Teilbilder über die boresite-Kalibrierung oder die boresite-Berechnung innerhalb der integrierten Blockausgleichung berücksichtigt wird.



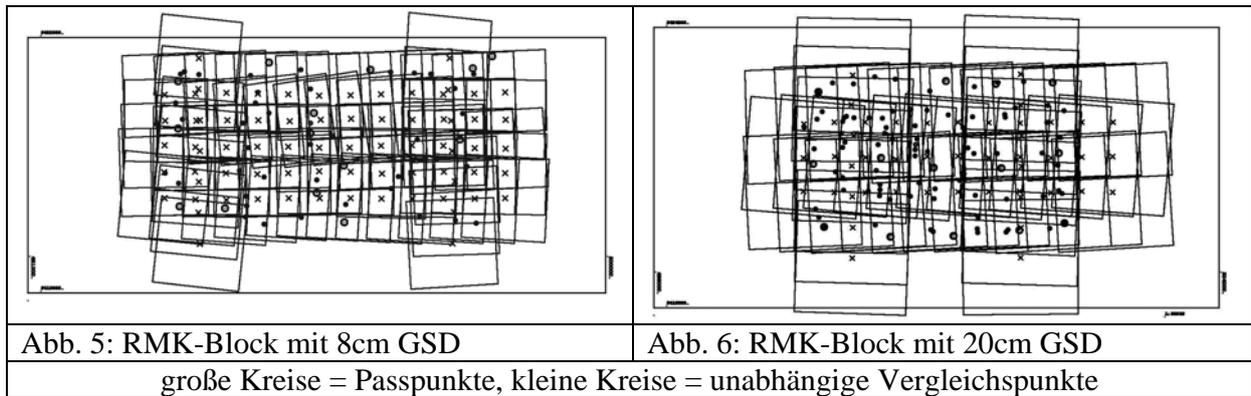
Neben dem Problem der für die Höhen wirksamen Bildverknüpfung ist auch die Verknüpfung der als unabhängige Bilder eingeführte Bilder der 4-Kopf-Kamera in Bezug auf die Lage schwächer, wie die Abbildungen 3 und 4 zeigen. Das jeweils gelbe Bild ist mit den grün markierten Bildern direkt verknüpft. Dementsprechend benötigt ein Block mit als unabhängige Bilder eingeführte Bilder der 4-Kopf-Kamera linear die doppelte Anzahl von Passpunkten.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der wirtschaftliche Einsatz einer 4-Kopf-Kamera die integrierte Sensororientierung oder die Zusammenfassung der Teilbilder zu homogenen virtuellen Bildern erfordert, ansonsten wird eine zu hohe Anzahl von Passpunkten benötigt. Die

integrierte Sensororientierung stellt effektiv keinen nennenswerten zusätzlichen Aufwand dar, da diese Systeme ohnehin mit GPS und inertialen Messeinheiten (IMU) ausgestattet sind. Die direkte Sensororientierung muss allerdings mit ausreichender Genauigkeit erfolgen um das prinzipiell hohe Genauigkeitspotential der Mittelformatkameras ausschöpfen zu können.

4 Z/I Imaging RMK Top 15

Die vom Landesamt für Vermessung und Geoinformation unter Leitung von Herrn W. Stöbel erfassten Bildkoordinaten werden hier analysiert.



Der RMK-Block mit 8cm GSD enthält 74 Bilder mit einer Längs- und Querüberdeckung von 60%, sowie 2 Querstreifen. 8cm GSD entsprechen 14µm Pixelgröße im Bild (Abb. 5). Der RMK-Block mit 20cm GSD enthält 47 Bilder mit einer Längs- und Querüberdeckung von 60%, sowie 2 Querstreifen (Abb. 6). 20cm GSD entsprechen 14µm Pixelgröße im Bild. In dem 8cm-GSD-Block wurden die Objektpunkte durchschnittlich in 5,3 Bildern bestimmt und die Bilder enthalten im Mittel 125 Punkte, während im 20cm-GSD-Block die Objektpunkte durchschnittlich in 7,1 Bildern bestimmt wurden und die Bilder im Mittel 235 Punkte enthalten.

Selbstkalibrierung	14 Passpunkte			σ_0 [µm]	40 Vergleichspunkte		
	SX	SY	SZ		SX	SY	SZ
ohne zusätzliche Parameter	1,9	3,4	13,7	4,60	2,3	4,1	15,3
zusätzliche Parameter 1-12	1,7	2,9	4,4	4,30	2,2	3,5	5,1

Tabelle 4: erzielte Genauigkeiten, RMK Top 15, 8cm GSD, Widersprüche [cm]

Selbstkalibrierung	14 Passpunkte			σ_0 [µm]	82 Vergleichspunkte		
	SX	SY	SZ		SX	SY	SZ
ohne zusätzliche Parameter	10,1	6,6	15,6	5,88	11,3	11,6	15,4
zusätzliche Parameter 1-12	10,6	7,5	5,2	5,17	11,6	12,5	8,0

Tabelle 5: erzielte Genauigkeiten, RMK Top 15, 20cm GSD, Widersprüche [cm]

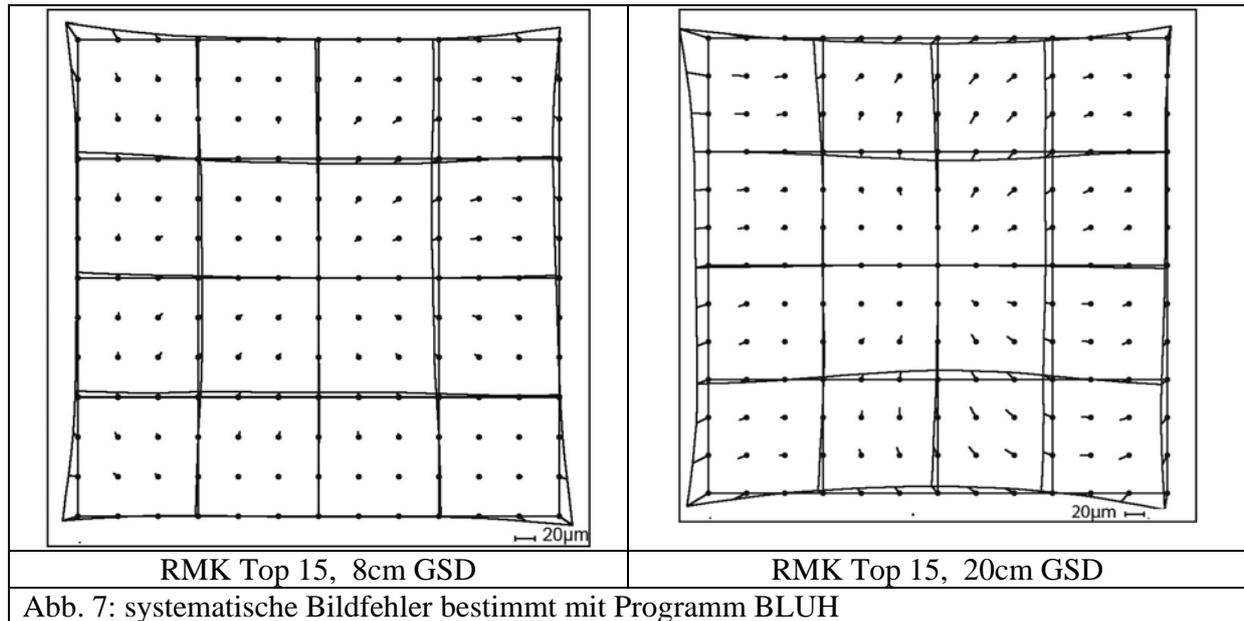


Abb. 7: systematische Bildfehler bestimmt mit Programm BLUH

Die Bündelblockausgleichung der RMK-Daten mit dem Hannoverschen Programm BLUH führte zu üblichen Ergebnissen, die mit analogen Kameras erzielt werden. Eine Selbstkalibrierung mit zusätzlichen Parametern ist erforderlich und verbessert besonders die Höhengenaugigkeit. Die systematischen Bildfehler (Abweichung der tatsächlichen Bildgeometrie von dem mathematischen Modell der Zentralprojektion) werden von der radialsymmetrischen Komponente dominiert und haben für die beiden Flughöhen einen ähnlichen Charakter, was zu erwarten war (Abb. 7). Die erzielte Lagegenauigkeit der Blockausgleichung mit Selbstkalibrierung ist mit 0,37 GSD für den 8cm-GSD-Datensatz (Tabelle 4) besser als mit 0.60GSD für den 20cm-GSD-Datensatz (Tabelle 5). Dieses kann nur mit Problemen der exakten Punktidentifizierung in dem 20cm-GSD-Datensatz erklärt werden. Für den 8cm-GSD-Datensatz liegen die Ergebnisse im Rahmen des üblichen. Die Standardabweichung der Gewichtseinheit σ , die die Bildkoordinatengenauigkeit widerspiegelt, ist mit 4,3 μ m und 5,2 μ m im Bereich des Erwarteten.

5 Z/I Imaging DMC

Die vom Landesamt für Vermessung und Geoinformation unter Leitung von Herrn W. Stöbel erfassten Bildkoordinaten werden hier analysiert.

Die tatsächliche Objektpixelgröße des 8cm-GSD-Blocks der DMC beträgt 8,7cm und für den 20cm-GSD-Block 21,6cm. Der DMC-Block mit nominell 8cm GSD enthält 135 Bilder mit einer Längs- und Querüberdeckung von 60%, sowie 2 Querstreifen (Abb. 8). Der DMC-Block mit 20cm GSD enthält 60 Bilder mit einer Längs- und Querüberdeckung von 60%, sowie ebenfalls 2 Querstreifen (Abb. 9). In dem 8cm-GSD-Block wurden die Objektpunkte durchschnittlich in 6,8 Bildern bestimmt und die Bilder enthalten im Mittel 139 Punkte, während im 20cm-GSD-Block die Objektpunkte durchschnittlich in 6,3 Bildern bestimmt wurden und die Bilder im Mittel 177 Punkte enthalten.

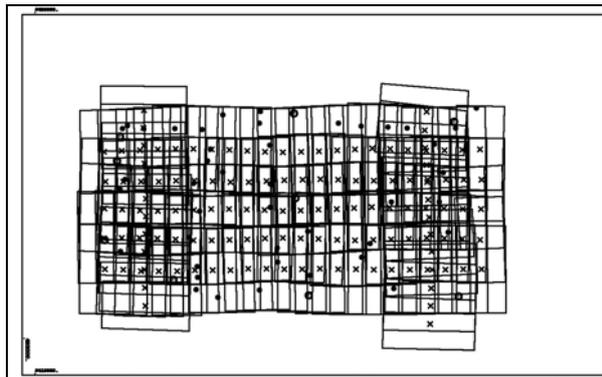


Abb. 8: DMC-Block mit 8cm GSD

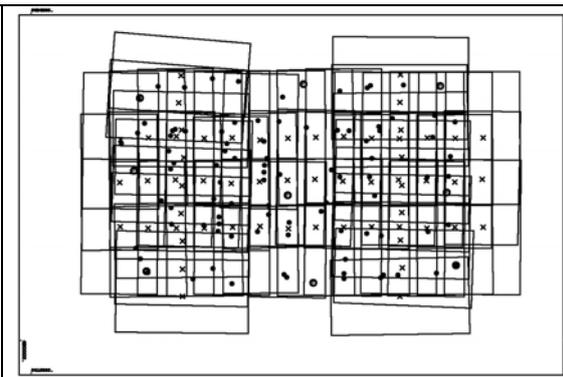


Abb. 9: DMC-Block mit 20cm GSD

große Kreise = Passpunkte, kleine Kreise = unabhängige Vergleichspunkte

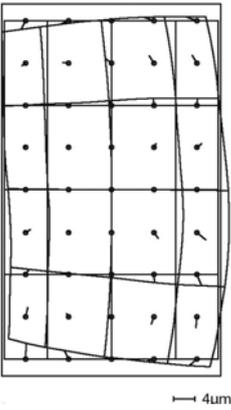
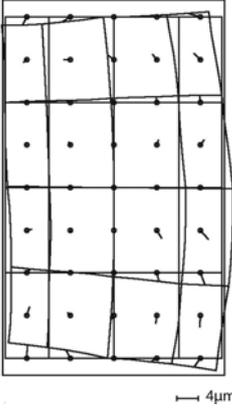
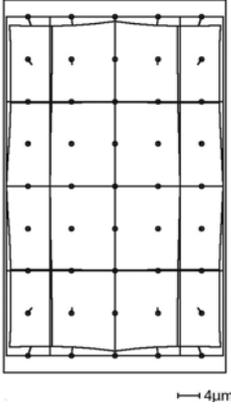
Selbstkalibrierung	9 Passpunkte			σ_0 [μm]	45 Vergleichspunkte		
	SX	SY	SZ		SX	SY	SZ
ohne zusätzliche Parameter	1,4	2,7	6,0	3,27	2,3	3,8	8,0
z. Parameter 1-12	1,6	2,1	1,7	3,24	2,2	2,9	4,2
z. Parameter 1-12 + 79,80	1,5	2,4	1,5	3,23	2,5	2,9	4,2

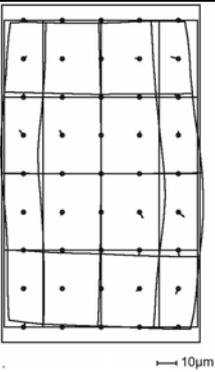
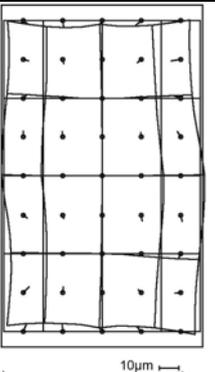
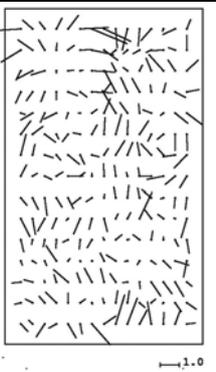
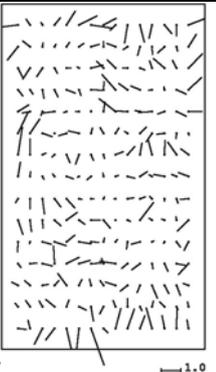
Tabelle 6: erzielte Genauigkeiten, DMC mit 8,7cm GSD, Widersprüche [cm]

Das Hannoversche Bündelblockausgleichungsprogramm BLUH hat einen Standardsatz von 12 zusätzlichen Parametern (Jacobsen 2008). Für die DMC und die UltraCam wurden kameraspezifische zusätzliche Parameter eingefügt. Es zeigte sich, dass in der Regel für die DMC zwei kameraspezifische zusätzliche Parameter (79, 89) ausreichen – sie erfassen Temperatureinflüsse auf die Kammerkonstanten der panchromatischen Teilkameras und radialsymmetrische Verzeichnungen der Teilkameras. Unterschiede der Teilkameras werden intern bei der Generierung der virtuellen DMC-Bilder berücksichtigt. Nur im Ausnahmefall sind alle 16 individuellen zusätzlichen Parameter für die DMC erforderlich (in Tabelle 9 mit DMC angegeben).

Selbstkalibrierung	9 Passpunkte			σ_0 [μm]	95 Vergleichspunkte		
	SX	SY	SZ		SX	SY	SZ
ohne zusätzliche Parameter	4,3	4,7	26,2	1,86	4,6	7,8	18,6
z. Parameter 1-12	3,2	3,3	3,8	1,58	4,3	6,0	7,2
z. Parameter 1-12 + 79,80	3,2	3,4	4,2	1,43	4,4	5,8	6,0
z.P. 1-12 + DMC spezifische	2,9	3,2	2,7	1,39	4,1	5,6	5,9

Tabelle 7: erzielte Genauigkeiten, DMC mit 21,6cm GSD, Widersprüche [cm]

		
Parameter 1-12	Parameter 1-12, 79, 80	Parameter 79 und 80
Abb. 10: systematische Bildfehler der DMC-Blocks mit 8cm GSD		

			
Parameter 1-12	Parameter 1-12, 79, 80	gemittelte und überlagerte Residuen, Parameter 1-12,79,80	gemittelte und überlagerte Residuen, Parameter 1-12 + 16 DMC-spezifische
Abb. 11: systematische Bildfehler und nicht erfasste systematische Fehler des DMC-Blocks mit 20cm GSD			

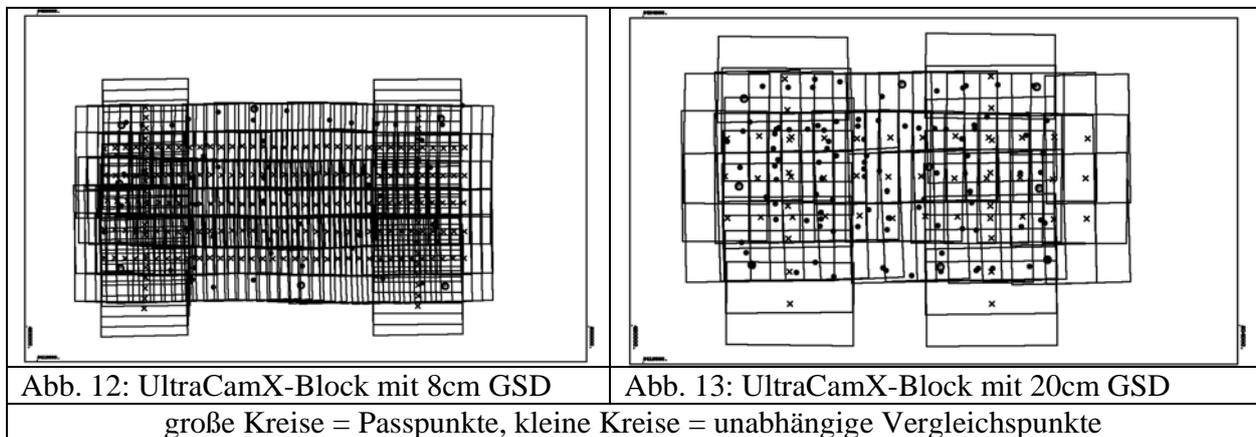
Systematische Bildfehler werden durch Selbstkalibrierung mit zusätzlichen Parametern erfasst und berücksichtigt soweit der Parameteransatz dieses ermöglicht. So ist zum Beispiel der Ebner-Parameteransatz nicht in der Lage radialsymmetrische Fehler zu kompensieren, er kommt deswegen für die Ausgleichung von digitalen Kameradaten nicht infrage. Auch die Effekte der speziellen DMC-Parameter 79 und 80 (Abbildung 10 rechts) können mit dem Standardansatz von BLUH nicht richtig kompensiert werden, was zur Erweiterung des Satzes der zusätzlichen Parameter in BLUH führte. Für die Ausgleichung des 20cm-GSD-Datensatzes der DMC (Tabelle 7) sind diese speziellen Parameter aber erforderlich. Nicht durch die zusätzlichen Parameter kompensierte systematische Bildfehler lassen sich durch Überlagerung und Mittelung der Residuen (verbliebene Bildkoordinatenfehler) erkennen (Abb. 11 rechts). Im Falle des 20cm-GSD-Datensatzes basieren die überlagerten und gemittelten Residuen auf 10634 Residuen, somit jeder gezeigte Vektor im Durchschnitt auf 47 Residuen, womit die zufälligen Fehler eliminiert und nur die systematischen Anteile sichtbar sind.

Der 20cm-GSD-Datensatz weist systematische Effekte auf (Abb. 11), die auch den vollen Ansatz der individuellen zusätzlichen DMC-Parameter erfordern. Mit diesem vollen Ansatz zusätzlicher Parameter konnten die Widersprüche an den Vergleichspunkten noch geringfügig verbessert werden (Tabelle 7). Für den 8cm-GSD-Datensatz war dieses nicht erforderlich und auch mit den zusätzlichen Parametern 79 und 80 trat keine Verbesserung ein (Tabelle 6) (Abb. 10).

Die erzielte Lagegenauigkeit von 0,30 GSD im Fall des 8cm-GSD-Datensatzes ist geringfügig schlechter als die des 20cm-GSD-Datensatzes mit 0,22 GSD. Hier dürfte sich bereits die Genauigkeit und Identifizierbarkeit der Vergleichspunkte auswirken.

6 Vexcel Imaging UltraCamX

Die vom Landesamt für Vermessung und Geoinformation unter Leitung von Herrn W. Stöbel erfassten Bildkoordinaten werden hier analysiert.



Die tatsächliche Objektpixelgröße des 8cm-GSD-Blocks der UltraCamX beträgt 8,6cm und für den 20cm-GSD-Block 20,6cm. Der UltraCamX-Block mit 8cm GSD enthält 215 Bilder mit einer Längsüberdeckung von 81% und Querüberdeckung von 65%, sowie 2 Querstreifen (Abb. 12). Der UltraCamX-Block mit 20cm GSD enthält 52 Bilder mit einer Längsüberdeckung von 70% und Querüberdeckung von 70%, sowie 2 Querstreifen (Abb. 13). In dem 8cm-GSD-Block wurden die Objektpunkte durchschnittlich in 10,2 Bildern bestimmt und die Bilder enthielten im Mittel 250 Punkte, während im 20cm-GSD-Block die Objektpunkte durchschnittlich in 6,2 Bildern bestimmt wurden und die Bilder im Mittel 449 Punkte enthielten.

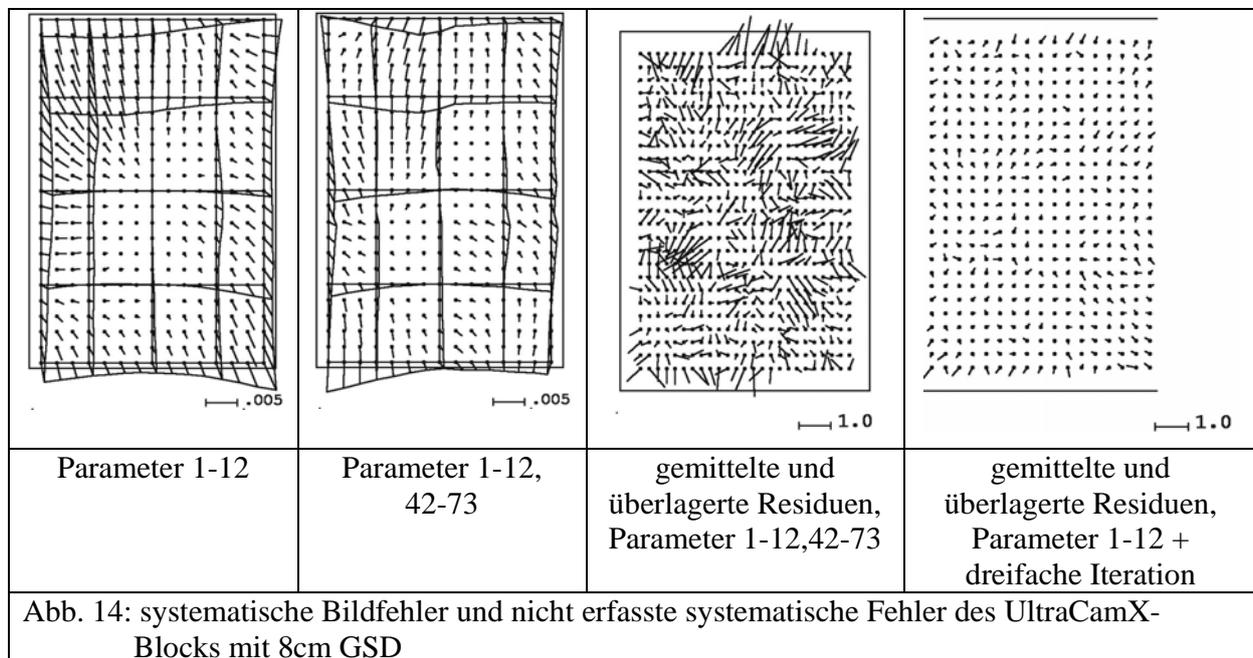
Selbstkalibrierung	9 Passpunkte			σ_0 [μm]	99 Vergleichspunkte		
	SX	SY	SZ		SX	SY	SZ
ohne zusätzliche Parameter	4,4	6,1	8,8	0,94	4,2	7,8	9,9
zusätzliche Parameter 1-12	3,5	4,0	3,6	0,90	4,3	7,1	3,8
zusätzliche Parameter 1-12, 42-73	3,5	4,1	3,6	0,87	4,2	7,2	3,8
Zusätzliche Parameter 1-12, 3 Iterationen mit gemittelten Residuen	3,4	3,9	3,6	0,82	4,3	7,1	3,8

Tabelle 8: erzielte Genauigkeiten, UltraCamX mit 8,6cm GSD, Widersprüche [cm]

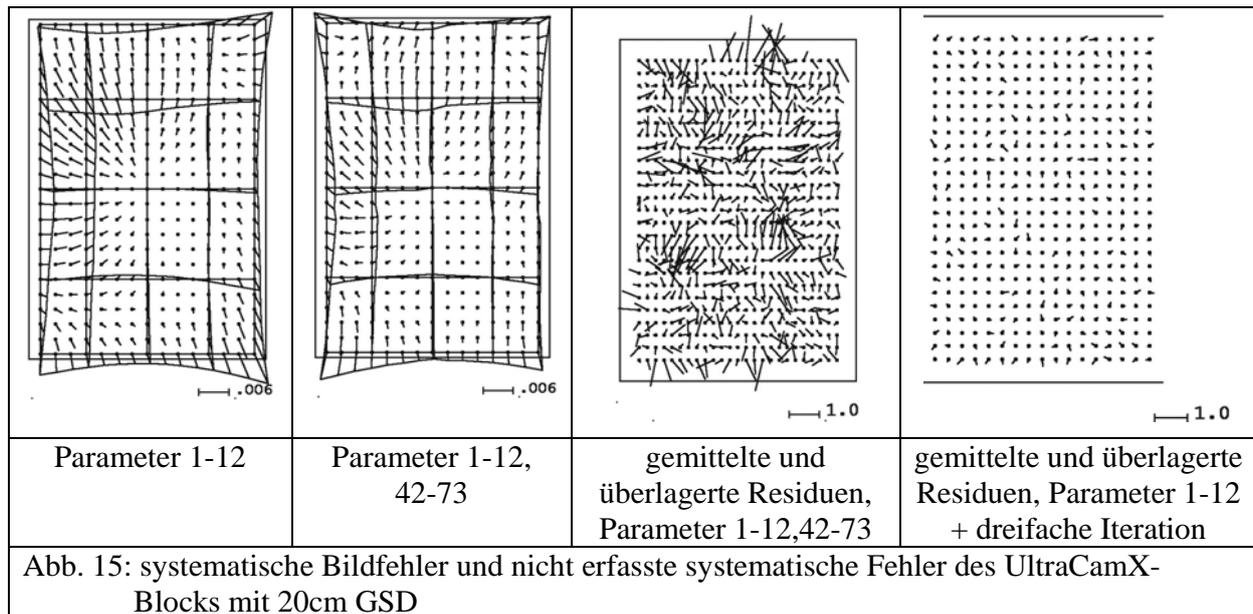
Auch für die UltraCam enthält das Programmsystem BLUH angepasste zusätzliche Parameter. Da die panchromatischen Bilder der UltraCamX auf 9 CCDs in insgesamt 4 Teilkameras basieren, sind insgesamt 32 UltraCam-spezifische zusätzliche Parameter (42-73) erforderlich.

Selbstkalibrierung	9 Passpunkte			σ_0	99 Vergleichspunkte		
	SX	SY	SZ	[μm]	SX	SY	SZ
ohne zusätzliche Parameter	5,9	7,2	19,1	1,02	7,5	8,4	18,7
zusätzliche Parameter 1-12	6,2	6,9	4,3	0,96	7,5	8,3	8,7
zus. Parameter 1-12, 42-73	6,3	6,6	5,1	0,95	7,5	8,3	9,1
z. Parameter 1-12, 3 Iterationen mit gemittelten Residuen	6,3	6,6	4,2	0,89	7,5	8,2	7,8

Tabelle 9: erzielte Genauigkeiten, UltraCamX 20,6cm GSD, Widersprüche [cm]



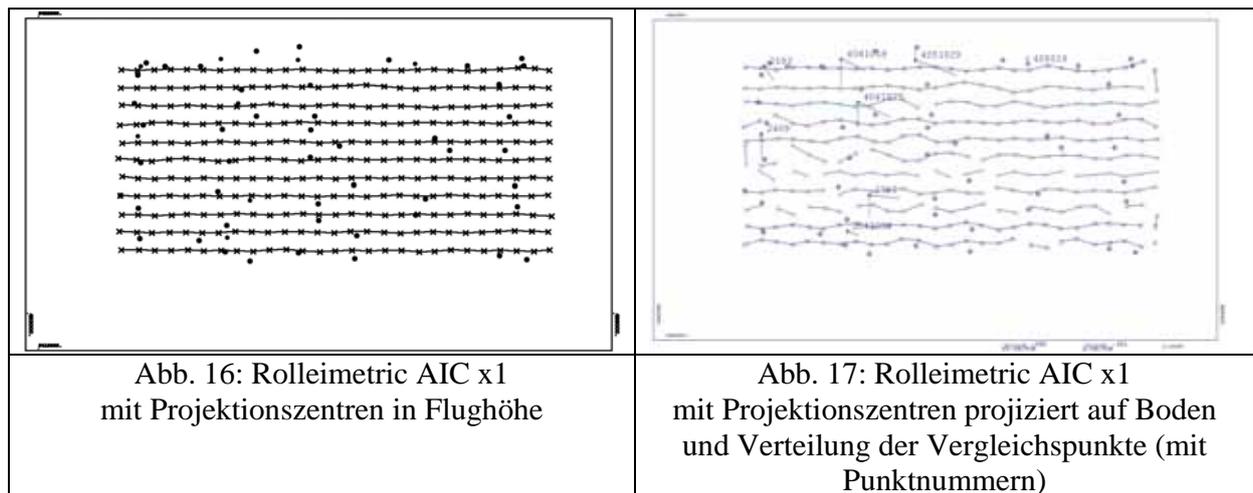
Bei der UltraCamX zeigten sich auch nach Ausgleichung mit den Standardparametern und den UltraCam-spezifischen zusätzlichen Parametern noch deutliche systematische Restfehler mittels der gemittelten und überlagerten Residuen (Abb. 13 und 14). Um diese Restsystematiken zu beseitigen, wurden die Bildkoordinaten um die gemittelten und überlagerten Residuen verbessert. Da sich an den Residuen nur ein Teil der systematischen Bildfehler zeigt und der andere Teil durch andere Orientierungsunbekannte kompensiert wird, ist hier eine dreifache Iteration erforderlich. Diese iterative Verbesserung beseitigt die systematischen Restfehler (Abb. 14 und 15 rechts) und verbessert die Ergebnisse der Blockausgleichung, speziell der sensiblen Höhengenaugigkeit (Tabelle 9) des 20cm GSD-Datensatzes. Diese Vorgehensweise ist nur mit einem ausreichend großen Block und einer guten Überdeckung durch Verknüpfungspunkte möglich – beides ist in beiden UltraCamX-Datensätzen gegeben.



Die Bildgeometrie der Hochbefliegung stimmt mit der der Tiefbefliegung sehr gut überein. Die starke Bildüberdeckung führt mit 0,38 bzw. 0,28 GSD zu keinen für die UltraCamX auffälligen Objektpunkt-lagegenauigkeiten.

7 Rolleimetric AIC x1

Die von der Heinrich Heine Universität Düsseldorf unter Leitung von Prof. E. Jordan erfassten Bildkoordinaten werden hier analysiert.



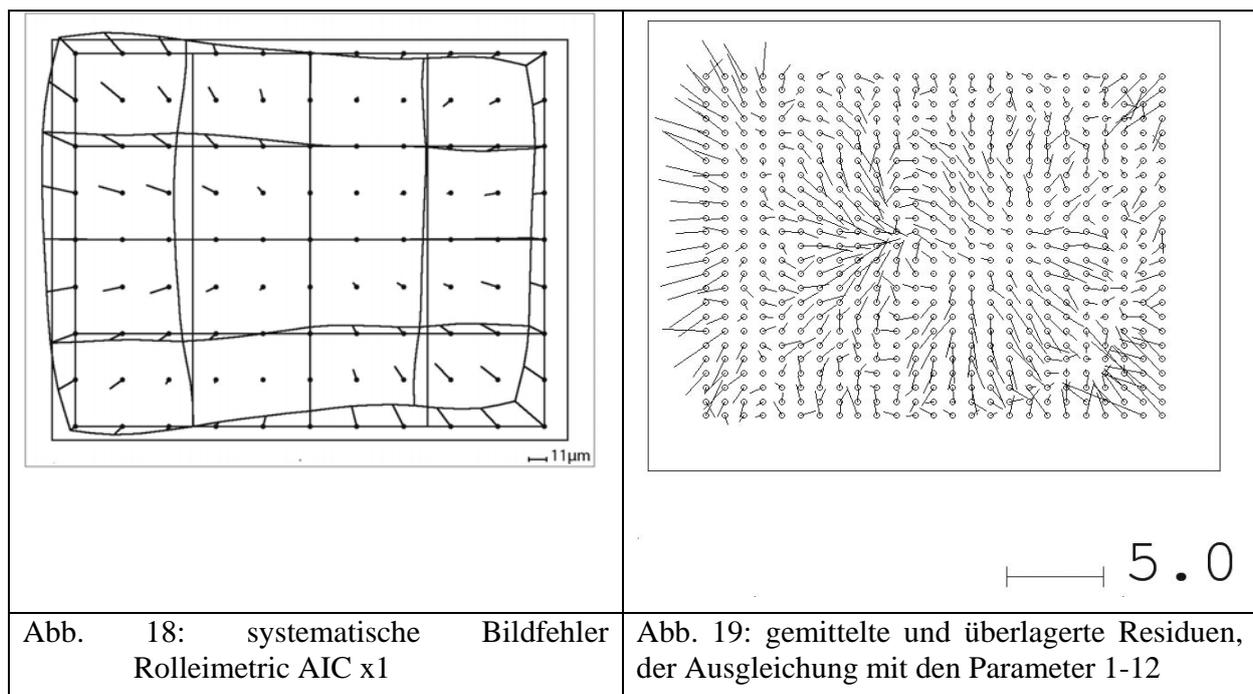
Mit der Rolleimetric Einzelkamera wurde der Block nur mit 8cm Objektpixelgröße durch 11 West-Ost-Flugstreifen erfasst (Abb. 16). Wie aus dem Vergleich der Abbildungen 16 und 17 hervorgeht, war der Bildflug sehr unruhig, mit einer Variation der Bildorientierungswinkel ϕ

von -5,0gon bis +4,2gon und omega zwischen -6,0gon und 6,0gon. Die tatsächliche Objektpixelgröße beträgt 9,0cm. Der AIC x1-Block enthält 297 Bilder mit einer Längsüberdeckung von 80% und Querüberdeckung von 60%. Die Objektpunkte wurden durchschnittlich in 3,4 Bildern bestimmt und die Bilder enthielten im Mittel 342 Punkte.

Selbstkalibrierung	47 Passpunkte			σ_0	10 Vergleichspunkte		
	SX	SY	SZ	[μm]	SX	SY	SZ
ohne zusätzliche Parameter	4,7	5,9	22,7	4,55	3,1	3,8	10,2
zusätzliche Parameter 1-12	4,1	4,6	8,0	4,28	5,9	2,5	10,1

Tabelle 12: erzielte Genauigkeiten, Rolleimetric AIC x1, 9,0cm GSD, Widersprüche [cm]

Wie aus Tabelle 12 ersichtlich, ist auch bei der AIC x1 eine Blockausgleichung mit Selbstkalibrierung erforderlich. Dieses zeigt sich zwar nicht bei den Vergleichspunkten, was aber mit der recht ungünstigen Verteilung der Vergleichspunkte erklärt werden kann. Die einfache Befliegung mit Parallelflugstreifen erfordert eine höhere Anzahl von Passpunkten. Da die GPS-Koordinaten der Projektionszentren nicht sehr genau sind, kann mit ihnen bei dem erzielten Genauigkeitsniveau auch nicht die Blockausgleichung unterstützt werden um den Passpunktabstand zu vergrößern.



Die AIC x1 zeigt nach Blockausgleichung mit den Standardparametern des Programms BLUH lokale nicht kompensierte systematische Bildfehler (Abb. 19). Eine iterative Verbesserung der Bildkoordinaten um die nicht erfassten systematischen Bildfehler (Tabelle 13) führte zu einer Verbesserung der Lagegenauigkeit unabhängiger Vergleichspunkte. Danach wird an den Vergleichspunkten eine Lagegenauigkeit von 0,29 GSD erreicht. Die für eine Kamera mit einem CCD etwas ungewöhnlichen systematischen Bildfehler können dadurch erklärt werden, dass das CCD bei der Rolleimetric AIC an 8 Stellen befestigt ist, womit ein geometrischer Zwang auf das CCD nicht ausgeschlossen werden kann.

Selbstkalibrierung	47 Passpunkte			σ	10 Vergleichspunkte		
	SX	SY	SZ	[μm]	SX	SY	SZ
ohne zusätzliche Parameter	4,6	6,0	22,7	4,61	4,4	9,8	15,5
Zusätzliche Parameter 1-12	3,6	4,1	6,4	4,04	2,5	2,7	10,4

Tabelle 13: Rolleimetric AIC x1, 9,0cm GSD nach iterativer Verbesserung der Bildkoordinaten um die gemittelten und überlagerten Residuen, Widersprüche [cm]

8 Leica Geosystems ADS40

Die Bildkoordinaten der ADS40 wurden in der Leibniz Universität Hannover durch Frau A. Elmhurst ermittelt, die Ausgleichung mit ORIMA erfolgte durch R. Schmidt. Bislang wurden nur die 8cm GSD-Aufnahmen der Zeilenkamera ADS40 ausgewertet. Es liegen 6 West-Ost-Flugstreifen mit einer Querüberdeckung von 60% und 2 Querstreifen vor. Die Querstreifen sind nahezu deckungsgleich im östlichen Blockteil (Abb. 20).

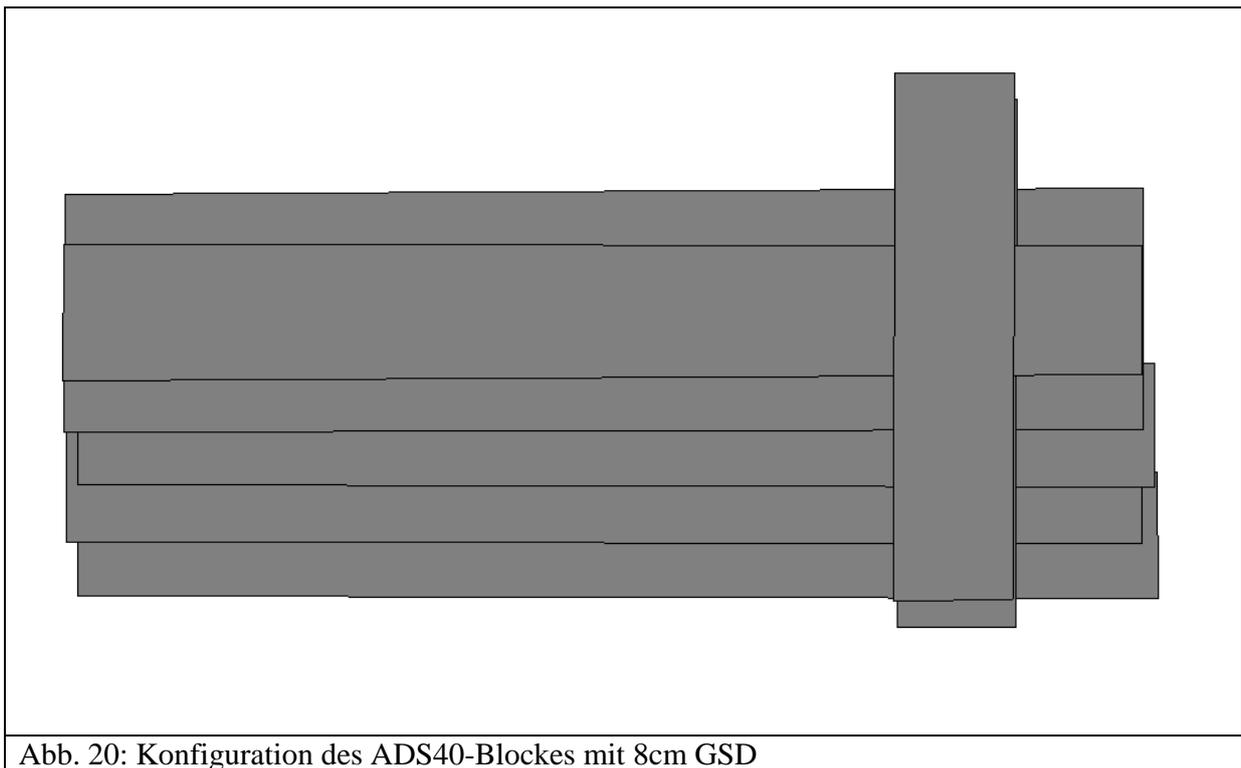


Abb. 20: Konfiguration des ADS40-Blockes mit 8cm GSD

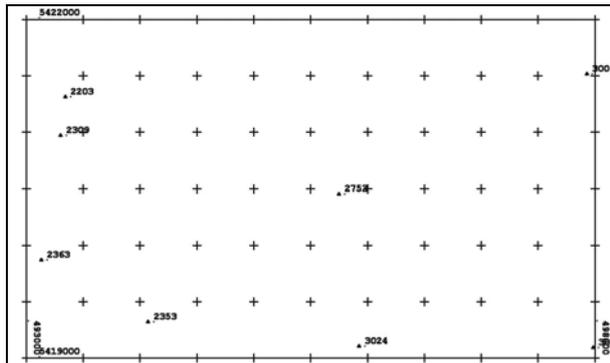


Abb. 21: ADS40: Verteilung der Passpunkte

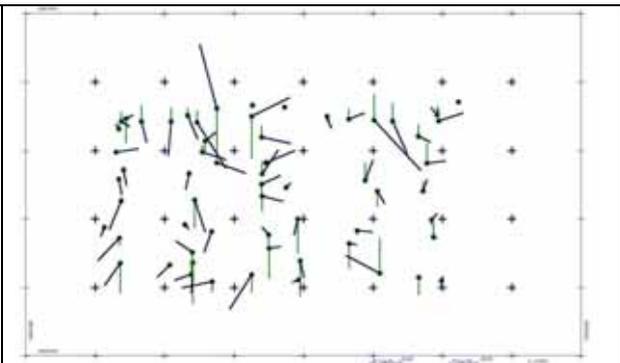


Abb. 22: Widersprüche an den Vergleichspunkten

	X	Y	Z
Quadratmittel der Widersprüche an 52 Vergleichspunkten	1,8cm	2,1cm	3,7cm
maximale Abweichung	4,7cm	6,6cm	9,7cm
systematische Fehler	0,6cm	0,7cm	0,8cm

Tabelle 14: erzielte Genauigkeiten, ADS40, 8cm GSD, Widersprüche an den Vergleichspunkten

Zeilenkameras, wie die ADS40, werden durch die direkte Sensororientierung gestützt, aus diesem Grund sind nicht viele Passpunkte erforderlich. Die benutzten 9 Passpunkte stellen bereits eine höhere Anzahl dar. Es wurde eine Lagegenauigkeit von 0,24 GSD erzielt. Die Höhen Genauigkeit kann mit dem Höhen-Basis-Verhältnis erklärt werden.

9 Jenaoptronik JAS-150

Die Bildkoordinatenerfassung und die Blockausgleichung des JAS-150 Datensatzes erfolgten durch V. Spreckels und A. Schlienkamp von der Deutschen Steinkohle bei Jenaoptronik. Die Bildorientierung wurde mit einer Version des Programms BINGO in Jena durchgeführt.

Passpunkte	Selbstkalibrierung	GSD	SX	SY	SZ
0	ja	8cm	4,5cm	2,2cm	11,1cm
4	nein	8cm	7,8cm	9,0cm	6,0cm
4	ja	8cm	2,0cm	2,1cm	4,9cm
19	ja	8cm	1,6cm	2,0cm	3,7cm
4	ja	20cm	2,0cm	2,1cm	6,5cm
19	ja	20cm	1,6cm	1,9cm	4,8cm

Tabelle 15: Ergebnisse der Blockausgleichung der JAS-150

Die Orientierung ohne Passpunkte ist von der direkten Sensororientierung abhängig. Besonders die Höhenergebnisse sind systematisch verfälscht. Hier handelt es sich um ein Einzelergebnis, das nicht ohne weiteres auf andere Blöcke übertragen werden kann. Am Beispiel der

Ausgleichung mit 4 Passpunkten ist ersichtlich, dass eine Selbstkalibrierung erforderlich ist. Die Erhöhung der Anzahl der Passpunkte von 4 auf 19 bringt nur eine eingeschränkte Genauigkeitssteigerung. Die Ergebnisse mit den 20cm-GSD-Daten sind nur geringfügig schlechter als die mit 8cm GSD. Bei 8cm GSD liegt die Lagegenauigkeit bei 0,22 GSD, bei 20cm GSD werden 0,09 GSD erzielt.

10 Schlussfolgerung

Das hohe Genauigkeitspotential der digitalen Kameras hat sich trotz aller Einschränkungen bei den Bildflügen und der Bildflughanordnungen des DGPF-Kameratests bestätigt. Die mit der analogen RMK Top 15 erzielten Ergebnisse des Blocks mit 20cm GSD werden durch die schlechtere Erkennbarkeit der signalisierten Punkte in den körnigen Bildern negativ beeinflusst, der Block mit 8cm GSD reicht an die Genauigkeit der digitalen Kameras heran. Die Standardabweichung der Objektkoordinaten X und Y der Blöcke mit 8cm GSD, ausgeglichen mit Selbstkalibrierung und einer ausreichenden Anzahl von Passpunkten, liegen zwischen 0,22 und 0,38 GSD während bei den Blöcken mit 20cm GSD die Ergebnisse mit 0,09 bis 0,28 GSD für die digitalen Bilder stärker variieren. Eine Unterstützung der Flächenkameras durch direkte Sensororientierung ergab keine Verbesserung der Ergebnisse auf dem erzielten hohen Genauigkeitsniveau. Dagegen basieren die digitalen Zeilenkameras in jedem Fall auf der direkten Sensororientierung. Eine Verbesserung der Sensororientierung durch Passpunkte ist allerdings für das Genauigkeitsniveau erforderlich, hier reicht eine beschränkte Anzahl von Passpunkten.

Die Handhabung der 4-Kopf-Bildkombinationen erfordert für einen wirtschaftlichen Einsatz die Nutzung der integrierten Sensororientierung da bei den nicht zusammengefassten Einzelaufnahmen eine Querüberdeckung des Systems der 4 Kameras von 60% nur wie eine traditionelle Querüberdeckung von 20% wirkt. Die automatische Aerotriangulation zeigte Kapazitätsprobleme bei LPS und Probleme mit den konvergenten Bildern bei ISAT, während mit MatchAT keine Schwierigkeiten auftraten. Wegen der kleineren Bildüberdeckung ist eine integrierte Sensororientierung für den Praxiseinsatz unbedingt erforderlich.

Alle untersuchten Systeme benötigten eine Blockausgleichung mit Selbstkalibrierung durch zusätzliche Parameter. An die Kameras angepasste zusätzliche Parameter verbessern die Ergebnisse. In einzelnen Fällen durch den benutzten Ansatz der zusätzlichen Parameter nicht kompensierte systematische Bildfehler konnten durch iterative Verbesserung der Bildkoordinaten um überlagerte und gemittelte Residuen geringfügig verbessert werden, das setzt aber ausreichend große Bildverbände voraus.

11 Beteiligte Organisationen und Personen

Die Datenerfassung und teilweise auch Bearbeitung der hier dargestellten Blöcke erfolgte von folgenden Organisationen und Personen:

CuB-Technik, Dr. E. Wild

Deutsche Steinkohle, V. Spreckels, A. Schlienkamp

Heinrich Heine Universität Düsseldorf, Prof. Dr. E. Jordan

Leibniz Universität Hannover, A. Elmhorst, Dr. R. Schmidt

LVG Bayern, W. Stöbel

12 Literaturverzeichnis

- Cramer, M., 2008: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamarasysteme, Ergebnisse der Projektsitzung Hannover, 13.11.2008, <http://www//dgpf.de>
- Jacobsen, K., 2008: Geometrisches Potential und Informationsgehalt von großformatigen digitalen Luftbildkamaras, PFG 2008, Heft 5, S. 325-336

Anschrift des Autors:

Dr.-Ing. Karsten Jacobsen, Leibniz Universität Hannover, Institut für Photogrammetrie und Geoinformation, D-30167 Hannover, Nienburger Str. 1 Tel.: +49-511-762-2485, Fax: +49-511-762-2483, e-mail: jacobsen@ipi.uni-hannover.de