

# Referenzorientierung für Bilddaten aus Mehrkopfkamerasystemen

ALEXANDER WIEDEN<sup>1</sup> & KARSTEN STEBNER<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Die Referenzorientierung kennzeichnet die Übertragung der äußeren Orientierung eines photogrammetrisch auswertbaren Sensors auf einen anderen simultan agierenden optischen Sensor. Auf diese Weise können Bilddaten aus Kamerasystemen orientiert werden, für die nicht jeder Einzelsensor zwangsläufig den photogrammetrischen Minimalanforderungen entsprechen muss. In diesem Beitrag wird die Referenzorientierung auf den Datensatz des Mehrkopfkamerasystems MACS 50/70 angewendet. Dabei wird das Potential des Verfahrens zur genauen Bestimmung der äußeren Orientierung für die Bilddaten der Einzelsensoren untersucht und gezeigt, dass sich die Referenzorientierung für den verwendeten Bilddatensatz bewährt.*

## 1 Einleitung

Aufgrund verschiedener Aufgabenstellungen im Bereich der Fernerkundung können Luftbildkameras nur selten vollständig den Ansprüchen der Auftraggeber gerecht werden. Gerade in der heutigen Zeit verlangt der Markt nach immer spezielleren Sensoren, welche Daten in hoher Qualität generieren sollen. Insbesondere die genaue Verortung und die Extraktion von Geoinformationen spielen eine große Rolle. Die Einrichtung *Optische Informationssysteme* des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) hat es sich daher unter anderem zur Aufgabe gemacht, optische Sensorsysteme zu speziellen Anwendungen und Fragestellungen zu konzipieren. Eine große Herausforderung stellt dabei z.B. die photogrammetrische Auswertung für Bilddaten aus Oblique-Sensoren, sehr schmalwinkliger Kameras, exzentrischer Sensorflächen aber auch thermaler Sensoren dar. Als Repräsentant für Luftbildkamerasystem mit niedrigen Öffnungswinkeln steht das MACS 50/70 (LEHMANN et al., 2011) des DLR. Neben einer kurzen Beschreibung dieses Sensorsystems in Abschnitt 2 und sich daraus ergebender Problemstellungen für die photogrammetrische Auswertung, werden im Kapitel 3 Luftbilddaten aus einer Testfeldbefliegung mit dem MACS 50/70 zum einen per Aerotriangulation und zum anderen durch Referenzorientierung prozessiert. Eine Genauigkeitsanalyse beider Orientierungsverfahren u.a. auf Basis abgeleiteter digitaler Oberflächenmodelle (DOM) ist Bestandteil des 4. Abschnittes.

- 1) Alexander Wieden, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Einrichtung Optische Informationssysteme, Sensorkonzepte und Anwendungen, Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin, Email: [alexander.wieden@dlr.de](mailto:alexander.wieden@dlr.de)
- 2) Karsten Stebner, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Einrichtung Optische Informationssysteme, Sensorkonzepte und Anwendungen, Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin, Email: [karsten.stebner@dlr.de](mailto:karsten.stebner@dlr.de)

## 2 Sensorsystem

Das Multisensorsystem MACS 50/70 besteht aus drei Kameramodulen – der GeoCam mit 50mm Brennweite und den hochauflösenden Kameras DOMCam 1 und DOMCam 2 mit jeweils 70mm Brennweite. Die objektseitigen Bildfelder der DOMCams, die sich minimal überlappen, bilden dabei den Abbildungsbereich der GeoCam ab. Um das gesamte Bildfeld der GeoCam in den hochauflösenden DOMCam-Modulen zu erfassen und eine Maßstabsänderung durch Verkippung der Sensoren zu vermeiden, sind beide Module mit verschifteten Objektiven ausgestattet. Die Konsequenz bilden exzentrische Bildhauptpunktlagen für diese Kameras. Die nachfolgende Abbildung 1 kennzeichnet den grundsätzlichen Aufbau des MACS 50/70 und die sich daraus ergebenden Footprints der Einzelsensoren. Durch die vorliegende Bildhauptpunktexzentrizität entstehen mehrere Probleme bei der photogrammetrischen Auswertung bzw. für die separate Triangulation der DOMCam-Module. Für einen gängigen Bildflug (z.B. 60/30) ist für die GeoCam, eine stabile geometrische Verknüpfung innerhalb und zwischen einzelnen Flugstreifen gewährleistet, während dies für die jeweiligen Bildstreifen der zwei hochauflösenden Kameras nicht der Fall ist. Wie die Abbildung 2 zeigt, entstehen bei einer klassischen photogrammetrischen Aufnahmekonstellation einseitige Bildanschlüsse. Die Aufnahmen einer jeweiligen DOMCam können aufgrund der Aufnahmefrequenz in Flugrichtung zwar ausreichend verknüpft werden, jedoch bewirkt der einseitige Bildanschluss keine geometrische Stabilisierung der Bildverbände quer zur Flugrichtung. Die in einer Bündelblockausgleichung auftretenden Restfehler werden daher in eine Richtung oder in den somit unterbestimmten Rollwinkel minimiert.

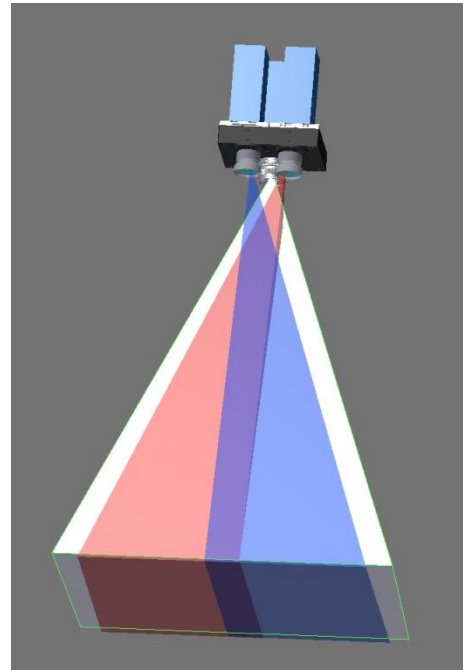


Abb. 1: Footprint MACS 50/70

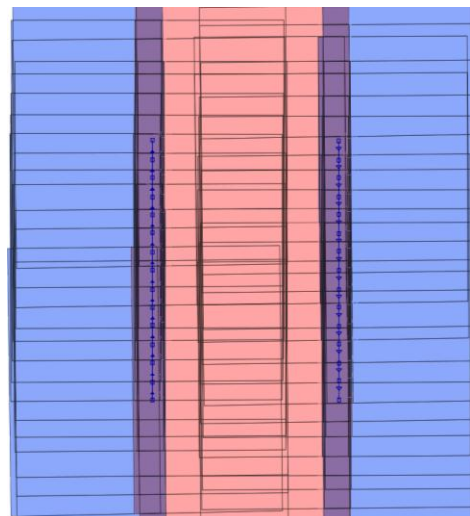


Abb. 2: Einseitiger Bildanschluss für einzelne DOMCam-Module des MACS 50/70

Sehr niedrige Öffnungswinkel (vgl. Tab. 1) sowie die Anordnung der DOMCam-Module im Hochformat bezogen auf die Flugrichtung, ziehen eine enorm schleifende Schnittgeometrie insbesondere in Querüberlappung nach sich. Erhöhte Fehlerellipsen in Vertikalrichtung resultieren und führen dazu, dass die Güte der ermittelten Projektionszentren in Vertikalrichtung innerhalb einer Aerotriangulation maßgeblich von der Genauigkeit der Näherungswerte der

äußeren Orientierung sowie gemessenen Referenzpunkten abhängig wird. Einen Überblick zu den einzelnen Kameramodulen des MACS 50/70 gibt Tabelle 1.

Tab. 1: Eigenschaften der Kameramodule des MACS 50/70

Sensor	Ck	Alpha/2	Beta/2	Bildhauptpunkt	Auflösungsfaktoren
GeoCam	50mm	19.8°	13.5°	zentrisch	1.4
DOMCam 1	70mm	14.4°	9.7°	exzentrisch	1
DOMCam 2	70mm	14.4°	9.7°	exzentrisch	1

### 3 Umsetzung

Folgende Untersuchungen basieren auf einen Bildflug über Berlin Adlershof, der im Frühjahr 2011 mit dem MACS 50/70 des DLR stattfand. Der Bildflug umfasste sechs parallele sowie zwei kreuzende Flugstreifen mit alternierender Flugrichtung und erfolgte mit einer Überlappung 80/60 in etwa 700 m über Grund. Damit stellen sich nominale Bodenauflösungen der GeoCam von 12.5 cm und der übrigen Kameras von etwa 9 cm ein. Insgesamt standen damit pro Kamera 365 Bilder zur Auswertung zur Verfügung. Die Abbildung 3 zeigt die Footprints aller GeoCam-Aufnahmen sowie tachymetrisch erfasste Passpunkte, von denen rund 30 innerhalb der Bilddatenorientierung Anwendung fanden. Insgesamt liegen für das aufgenommene Gebiet rund 400 natürliche Passpunkte mit einer Lagegenauigkeit von 2cm und einer Höhengenaugigkeit von 3cm vor. Neben Fahrbahnmarkierungen, Pflasterwechsel und runden Schachtdeckeln sind ebenso höherliegende Passpunkte auf Gebäuden vorhanden.

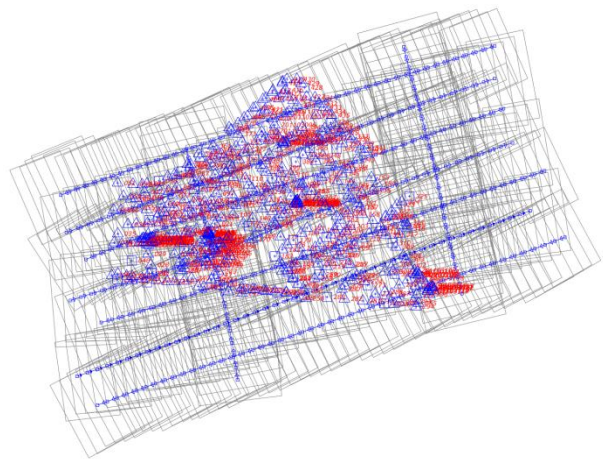


Abb. 3: Flugstreifen und Referenzfeld des Testfluges mit MACS 50/70

Zunächst wurden die Aufnahmen der GeoCam orientiert. Die erreichten Genauigkeiten der Aerotriangulation sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 2: Genauigkeiten der GeoCam-Orientierung

Sensor	East [m]	North [m]	Height [m]	Omega [gon]	Phi [gon]	Kappa [gon]
GeoCam	0.042	0.040	0.051	0.0048	0.0053	0.0007

Anschließend wurde die äußere Orientierung der GeoCam als Zwangsparameter mit entsprechender Gewichtung der Tabelle 2 für eine Aerotriangulation der Bilddaten der

DOMCam 1 und 2 eingeführt. Aufgrund der beschriebenen Einflussgrößen, in Bezug auf die geometrische Stabilität der Bildverbände, muss die Triangulation der exzentrischen Kameramodule durch die bessere geometrische Aufnahmekonstellation der GeoCam kompensiert werden, die daher auch als Übersichtskamera oder Orientierungsmodul verstanden wird. Die vorhandenen Leverarms zwischen den Projektionszentren aller drei Kameras konnten der CAD-Zeichnung zur Projektierung des MACS 50/70 näherungsweise entnommen werden und wurden innerhalb der Bilddatentriangulation der DOMCam-Module berücksichtigt. Weiter wurden konstante Boresight Misalignments zwischen der GeoCam und den DOMCam-Modulen bestimmt. Die Grundlage hierbei bildet die Minimierung der Winkelfehler über alle Bilder einer jeweiligen Kamera. Unter Berücksichtigung aller gegenseitigen Lage- und Winkeldifferenzen der Projektionszentren ergeben sich nach der Bündelblockausgleichung für DOMCam-Daten konstante Rest-Boresight-Misalignments unter einem Milligon (vgl. Tab. 3). Die Tabelle 4 kennzeichnet die Standardabweichungen der beschriebenen Aerotriangulation.

Tab. 3: Restkonstanter Anteil von Winkeldifferenzen zw. GeoCam und DOMCam-Module nach Aerotriangulation mit Zwangsbedingungen

Sensor	Omega [gon]	Phi [gon]	Kappa [gon]
DOMCam 1	0.0002	-0.0008	0.0000
DOMCam 2	0.0004	-0.0002	-0.0003

Tab. 4: Genauigkeiten der äußeren Orientierung für DOMCam-Aufnahmen durch Aerotriangulation mit Zwangsbedingungen

Sensor	East [m]	North [m]	Height [m]	Omega [gon]	Phi [gon]	Kappa [gon]
DOMCam 1	0.047	0.042	0.036	0.0040	0.0040	0.0030
DOMCam 2	0.025	0.028	0.038	0.0030	0.0030	0.0070

Sodann wurden die Bilddaten der hochauflösenden Sensoren erneut mit Hilfe des Referenzverfahrens orientiert. Dazu wurde abermals die äußere Orientierung der Übersichtskamera verwendet und unter Beachtung der Leverarms und Boresight-Misalignments auf die DOMCam-Module übertragen. Eine nochmalige Bündelblockausgleichung sieht die Referenzorientierung nicht vor. Zur ersten Genauigkeitsabschätzung wurde dennoch zusätzlich eine Aerotriangulation durchgeführt, für die sämtliche Näherungswerte der äußeren Orientierung als fehlerfrei angenommen wurden. Dabei sank im Ergebnis weder die Bildpunktmessgenauigkeit a posteriori noch ergaben sich Widersprüche für die Genauigkeit (vgl. Tab. 5 und 6) der äußeren Orientierung der Bilddaten.

Tab. 5: Genauigkeiten der äußeren Orientierung für DOMCam-Aufnahmen durch Referenzorientierung

Sensor	East [m]	North [m]	Height [m]	Omega [gon]	Phi [gon]	Kappa [gon]
DOMCam 1	0.000	0.000	0.000	0.0020	0.0010	0.0060
DOMCam 2	0.000	0.000	0.000	0.0020	0.0010	0.0040

Tab. 6: Restkonstante Anteile von Winkeldifferenzen zw. GeoCam und DOMCam-Module nach Referenzorientierung

Sensor	Omega [gon]	Phi [gon]	Kappa [gon]
DOMCam 1	0.0009	-0.0008	0.0001
DOMCam 2	0.0009	0.0001	-0.0005

## 4 Auswertung und Analyse

Damit lagen für beide hochauflösenden Kameras je zwei Orientierungen vor- eine aus direkter Referenzorientierung und eine aus gewichteter Aerotriangulation. Um die Güte der Referenzorientierung zu beurteilen behalf man sich zunächst der Epipolargeometrie. Der Verlauf der Epipolarlinie kennzeichnet dabei visuell die Genauigkeit der Orientierung. Durch das Messen eines Bildpunktes im Basisbild (vgl. Abb. 4, oben links) und einem weiteren Bild, sollten bei einer gelungenen Orientierung die ableitbaren Epipolarlinien der übrigen Bilder durch den identischen Punkt verlaufen. Wie die Abbildung 4 zeigt, trifft das für den referenzorientierten Datensatz zu. Die sich einstellenden Epipolarlinien verlaufen subpixelgenau durch den in allen Bildern abgebildeten Firstpunkt. Mit Hilfe der Epipolargeometrie konnte eine subpixelgenaue Referenzorientierung stichprobenartig über den gesamten Datensatz nachgewiesen werden.

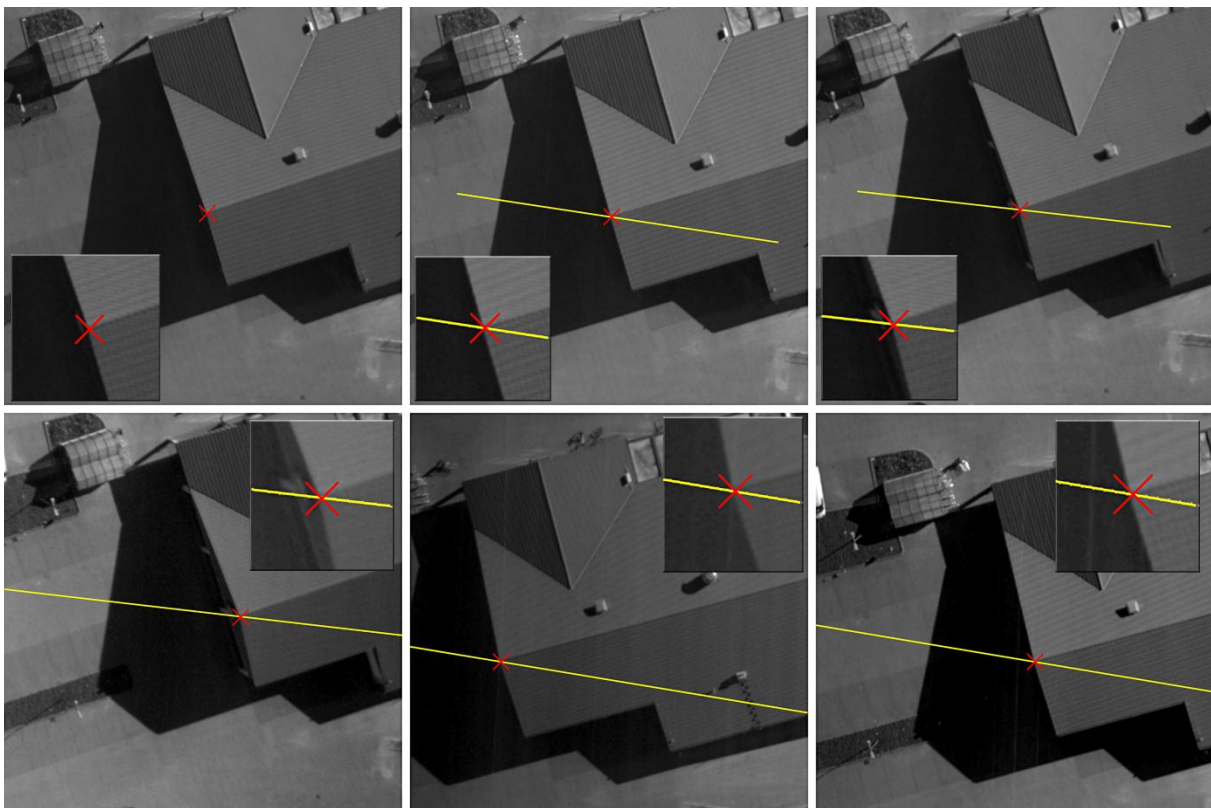


Abb. 4: Epipolargeometrie für Bilddaten der DOMCam 1 nach Referenzorientierung



Um die Fragen zu klären, ob die Referenzorientierung nun zur Auswertung des Sensorsystem MACS 50/70 geeignet ist bzw. ein Äquivalent zur gängigen Methode der Bündelblockausgleichung darstellt, wurden für beide vorliegenden Orientierungen DOMs mit jeweils 10 cm Rasterweite mittels Semiglobal-Matching (HIRSCHMÜLLER, 2008) bestimmt. Unzulänglichkeiten in der Bilddatenorientierung werden durch die Berechnung eines DOMs unmittelbar sichtbar. So erfolgte zunächst die visuelle Interpretation beider generierten DOMs (vgl. Abb. 5). Es wird deutlich, dass die hochauflösenden DOMs vorhandene Geometrien vollständig abbilden. So werden Gebäude und insbesondere Dächer sowie Dachaufbauten (vgl. Abb. 5 und 6, Detail) deutlich aufgelöst. Weiter bilden sich homogene Flächen wie Straßen oder Flachdächer sehr homogen und ohne Höhenversätze ab. Einzig im Bereich der Vegetation können Artefakte bzw. Fehlmatchings detektiert werden, was jedoch nicht im Einfluss der angewendeten Methode liegt. Aufgrund optisch konformer DOMs, wird an dieser Stelle darauf verzichtet, zusätzlich die abgeleiteten DOMs aus der Triangulation der Bilddaten abzubilden.

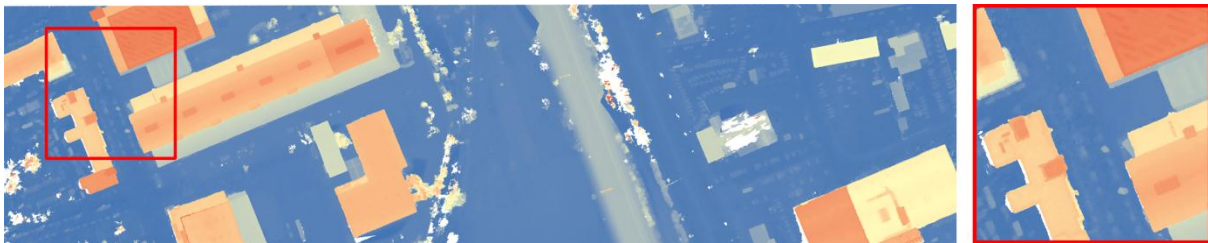


Abb. 5: DOM für DOMCam 1 (links) mit Detail (rechts)

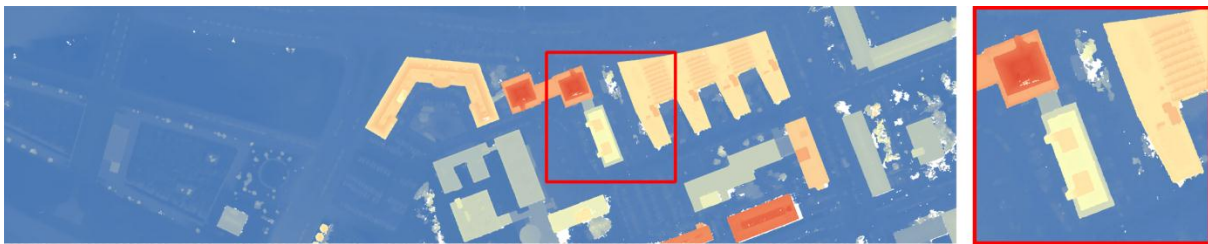


Abb. 6: DOM für DOMCam 2 (links) mit Detail (rechts)

Zur Abschätzung der Qualität der generierten DOMs wurden anschließend Höhendifferenzen zu vorliegenden signalisierten Referenzpunkten im Befliegungsgebiet berechnet, ausgenommen jene Passpunkte, die bereits innerhalb der Triangulation Anwendung fanden. Die Analyse sämtlicher vertikaler Differenzen zeigte unter Zuhilfenahme des Orthophotos aus GeoCam des identischen Fluges, dass sich maximale Werte durch Verdeckungen wie Bäume, Fahrzeuge und Container ergaben. Um die Resultate der DOMCam-Module vergleichbar zu machen und die Analyseergebnisse insgesamt nicht durch grobe Fehler zu verfälschen, wurden diese Höhendifferenzen zur Berechnung der RMS-Werte nicht berücksichtigt. In Tabelle 7 sind die statistischen Werte zu sämtlichen Auswertemöglichkeiten der Höhendifferenzen des Kamerasystems MACS 50/70 enthalten. Dazu zählen vertikale Differenzen zwischen Passpunkten zu DOMs des triangulierten Gesamtsystems sowie zu DOMs der referenzorientierten DOMCams. Es wird zunächst ersichtlich, dass man mit der Methode der

Referenzorientierung für beide DOMCams gleiche Genauigkeiten mit 5.7 und 5.3 cm erzielt. Der leichte Genauigkeitsverlust für die Triangulation der DOMCam 1 liegt in der Konstellation des Testfluges begründet. Dabei bildeten die äußeren Bildstreifen jeweils die Aufnahmen der DOMCam 1 ab (vgl. Abb. 2). Daher waren für diese Streifen keine Bildanschlüsse quer zur Flugrichtung vorhanden. Eine Stabilisierung war nur durch die hochgenaue Näherungswertlösung der GeoCam, Referenzpunkte und hohen Längsüberdeckung gegeben. Damit kann gesagt werden, dass beide Orientierungsverfahren gleich genaue Ergebnisse erzielen. Weiterhin entsprechen die Genauigkeiten der abgeleiteten DOMs aus MACS 50/70-Bilddaten nach direkter Referenzorientierung damit der Oberflächengenauigkeit anderer Luftbildkamerasysteme wie UltraCamX (HAALA et al., 2010).

Tab. 7: Höhendifferenzen zwischen DOM und Passpunkten

Sensor	Orientierung	DOM [cm] Raster	RMS [cm] ohne grobe Fehler	Mittel [cm]	Max/Min [cm]		Anz. Punkte
GeoCam DOMCam 1 DOMCam 2	<b>AT mit Bündelblockausgleichung</b> GSD 13cm GSD 9 cm	L=15	8.8	5.0	13.9	-17.5	87
		L=10	7.2	0.3	11.4	-9.1	54
			5.7	-0.7	9.1	-10.7	53
DOMCam 1 DOMCam 2	<b>Referenzorientierung</b> GSD 9cm	L=10	5.7	1.6	9.4	-6.2	54
			5.3	-0.7	8.4	-10.9	53

## 5 Fazit/Ausblick

Im vorliegenden Artikel wurde die Referenzorientierung als Verfahren zur Orientierung von Bilddaten eines Multisensorsystems vorgestellt und analysiert. Ein Bestreben innerhalb der Luftbildkameraentwicklung ist es immer, die Auswertung so nutzerfreundlich wie möglich zu gestalten, um so einen praktikablen Einsatz zu gewährleisten. Die getrennte Auswertung von Bilddatensätzen jedes Einzelsensors ist daher nicht immer nötig. Verschiedene Kamerahersteller gehen an dieser Stelle dazu über, aus den Bilddaten der einzelnen Kameras des Gesamtsystems virtuelle Negative (DOERSTEL et al., 2002, GRUBER & LADSTÄDTER, 2008) zu identischen Aufnahmezeitpunkten zu berechnen um den Aufwand bei der Orientierung zu minimieren. Dabei entstehende nicht vermeidbare Restfehler im virtuellen Kameramodell sind die Folge (JACOBSEN et al., 2010). Die Analyse zeigt für das MACS 50/70, dass die Referenzorientierung ein valides Verfahren ist, um die Bilddaten des Sensorsystems zu orientieren. Damit verbunden beschränkt sich die photogrammetrische Auswertung des Gesamtsystems auf nur noch einen Sensor. Herauszustellen sind dabei die hohen erreichten Genauigkeiten für einen aus photogrammetrischer Sicht zunächst unvorteilhaft konfiguriertes Sensorsystem. Neben schwer zu orientierenden Sensoren wie Obliquekameras oder Thermalsensoren, kann die Referenzorientierung z.B. die Anzahl notwendiger Flugstreifen zur hochauflösenden Erfassung eines Zielgebietes minimieren und damit einen wirtschaftlichen Mehrwert entwickeln. Weiter

verringern sich zusätzlich der Speicherbedarf und die Rechendauer für notwendige Bildpyramiden. Das Verfahren der Referenzorientierung setzt die Kenntnis der Transformationsparameter zwischen den Einzelsensoren voraus. Weiter ist sie abhängig von einer hohen räumlichen Lagestabilität der Sensoren sowie insbesondere synchron auslösenden Kameras.

## 6 Literaturverzeichnis

DOERSTEL, C., ZEITLER, W. & JACOBSEN, K., 2002: Geometric Calibration of the DMC: Method and Results. ISPRS Com I and PECORA. Denver 2002.

GRUBER, M. & LADTSTÄDTER, R., 2008: Calibrating the digital large format aerial camera UltraCamX. International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2008 Proceedings. Castelldefels, Spain 2008.

JACOBSEN, K., CRAMER, M., LADTSTÄDTER, R., RESSL, C. & SPRECKELS, V., 2010: DGPF Project: Evaluation of Digital Photogrammetric Camera Systems – Geometric Performance. PFG 2/2010: S. 83-97.

HAALA, N., HASTEDT, H., RESSL, C. & WOLFF, K., 2010: DGPF Projekt: Evaluierung digitaler photogrammetrischer Luftbildkamarasysteme – Themenschwerpunkt Höhenmodelle. Proceedings 3-Ländertagung Wien 2010.

Hirschmüller, H., 2008: Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 30 (2): 328–341. Los Alamitos, CA, USA 2008.

LEHMANN, F., BERGER, R., BRAUCHLE, J., HEIN, D., MEISSNER, H. & PLESS, S., 2011: MACS – Modular airborne camera system for generating photogrammetric high-resolution products. PFG 6/2011: S. 435–446.