

## Erfahrungen mit der direkten Georeferenzierung

MICHAEL CRAMER, Stuttgart

**Keywords:** GPS/inertial, direct georeferencing, integrated sensor orientation, long-term calibration

**Zusammenfassung:** Am Institut für Photogrammetrie (ifp) wurden in den vergangenen Jahren ausgiebige Untersuchungen zum Einsatz von integrierten GPS/Inertial-Systemen in der Aerophotogrammetrie durchgeführt. In diesem Artikel werden exemplarisch die Erfahrungen mit dem AEROcontrol-II-System vorgestellt. Dieses System wurde bereits zweimal unter gut kontrollierbaren Bedingungen im extra eingerichteten Testfeld Vaihingen/Enz auf sein geometrisches Genauigkeitspotenzial hin untersucht. Mit den bisher vorliegenden Daten der Testflüge konnten für GPS/Inertial-Positions- und Winkelbestimmung und die anschließende direkte Georeferenzierung hohe Genauigkeiten nachgewiesen werden. Diesen Ergebnissen aus derartigen speziellen Genauigkeitstests werden im zweiten Teil Resultate aus operationellen Einsätzen gegenübergestellt. Anhand dieser Daten werden auch erste Aussagen zur Langzeitstabilität der Kalibrierung eines Gesamtsystems im operationellen Umfeld abgeleitet.

**Summary:** *Experiences with direct georeferencing.* Within the last years extensive investigations were done at the Institute for Photogrammetry (ifp) using integrated GPS/inertial systems in aerial photogrammetry. This article focuses on the experiences with the AEROcontrol-II system, exemplarily. This system was already flown twice in well-controlled airborne environments in the especially designed test area Vaihingen/Enz to estimate its geometric accuracy performance. From the available test data material high quality results for GPS/inertial positioning and attitude determination and subsequent direct georeferencing are obtained. Besides the results from such evaluation tests the experiences from true operational flights are given in the second part of this paper. From such operational data set first remarks on the long term stability of overall system calibration in operational environments are possible.

### 1 Einleitung

Die direkte Bestimmung der Orientierung eines Flugzeug-getragenen Sensors durch geeignete integrierte GPS/Inertial-Systeme hat in den letzten Jahren in Forschung und Praxis einen bedeutenden Aufschwung erhalten. Dieses wird gefördert durch die prinzipielle Verfügbarkeit integrierter Systeme, die auch hohe photogrammetrische Genauigkeitsanforderungen erfüllen können. Damit können im Idealfall Sensordaten mit ausreichender Genauigkeit direkt georeferenziert werden. Darüber hinaus findet die GPS/Inertial-Technologie durch die zunehmende praktische Anwendung digitaler Aufnahmesysteme weitere Verbreitung. Ge-

rade für digitale Sensoren ist die direkte Bestimmung der Flugtrajektorie aus zweierlei Gründen wichtig: Die Daten digitaler Aufnahmesysteme stehen im Idealfall unmittelbar nach Befliegungsende für weitere Auswertungen zur Verfügung, wobei die Sensororientierung eine, vielleicht sogar die zentrale Komponente in der Prozesskette darstellt. Daher sollten für die schnelle Verarbeitung digitaler Daten ausreichende Informationen über die Sensororientierung zeitnah und direkt zur Verfügung gestellt werden können. Der zweite Punkt ergibt sich aus der Sensorgeometrie digitaler Aufnahmesysteme, die ihre Daten nach dem Pushbroom-Prinzip (z.B. digitale Zeilenbildkameras, Laserscanner) erfassen. Durch die

schwache Geometrie der erfassten Zeilen zueinander, was vor allem für hoch-dynamische Umgebungen einer photogrammetrischen Befliegung zutrifft, müssen für eine spätere effiziente Datenauswertung Zusatzinformationen über die Sensororientierung zur Verfügung gestellt werden. Dieser letzte Punkt war auch am Institut für Photogrammetrie das auslösende Moment für die intensive Beschäftigung mit integrierten GPS/Inertial-Systemen und deren Einbindung in das photogrammetrische Umfeld.

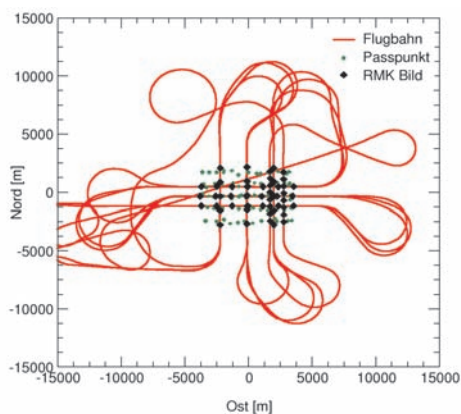
Erste Untersuchungen wurden dazu in einem gemeinsamen Test zusammen mit dem Department of Geomatics, Universität Calgary (UofC), Canada, im Jahre 1995 durchgeführt (ŠKALOUŠ et al. 1996). Fast zeitgleich fanden erste Testflüge mit dem Dreizeilensensor Digitale Photogrammetrische Ausstattung (DPA-Kamera, HOFMANN et al. 1993) statt. Während zunächst experimentelle Systeme untersucht wurden, lag anschließend der wesentliche Schwerpunkt auf der Evaluierung des geometrischen Genauigkeitspotenzials kommerzieller integrierter GPS/Inertial-Systeme in Kombination mit digitalen Zeilen- (HRSC-A, WEWEL et al. 1998) bzw. klassischen analogen Luftbildkameras. Die Historie der in den letzten Jahren unter Beteiligung bzw. Leitung des ifp durchgeführten Testflüge ist aus Tab. 1

ersichtlich. Parallel zu den am ifp durchgeführten Tests sind von der OEEPE (European Organization for Experimental Photogrammetric Research, jetzt EuroSDR, European Spatial Data Research) umfangreiche Untersuchungen zur GPS/Inertial-Technologie in Luftbilddanwendungen durchgeführt worden (HEIPKE et al. 2002).

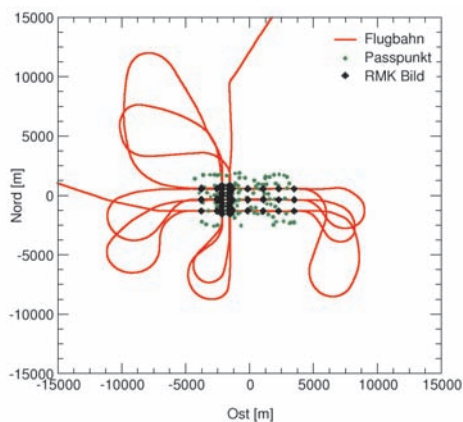
Im Rahmen dieses Artikels soll der Schwerpunkt auf die Untersuchungen mit dem integrierten GPS/Inertial-System AEROcontrol-IIId der Firma IGI mbH, Kreuztal, gelegt werden. Dieses System wurde bereits zweimal über dem Testfeld Vaihingen/Enz geflogen. Die Ergebnisse dieser Testflüge werden im Abschnitt 2 präsentiert. Für den neuesten Testflug standen dazu erstmals Daten der auf 128 Hz hoch getakteten Inertialmesseinheit (IMU) zur Verfügung. Anschließend sollen in Abschnitt 3 einige Anmerkungen zur Verwendung der direkten Georeferenzierung im operationellen Arbeitsprozess und zum Langzeitstabilitätsverhalten von GPS/Inertial-Systemen in Kombination mit einer analogen Luftbildkamera gemacht werden. Derartige Untersuchungen sind vor allem für die effiziente Nutzung der GPS/Inertial-Technologie in der Praxis relevant. Dazu stehen Daten der Firma Hansa Luftbild German Air Surveys, Münster, zur Verfügung, die im Unterschied

**Tab. 1:** Durchgeführte Testflüge mit verschiedenen Systeminstallationen.

Testgebiet	Flugtermin (Monat/Jahr)	GPS/Inertial-Komponenten	Kamera
Hambach	07/95	UofC, Geomatics Engineering Ashtech Z 12, Litton LN-90	RMK-A 15/23
Vaihingen/Enz	07/95, 08/96 10/96, 11/98	DPA – spezifisch Trimble SSE 4000, Sagem DPAKSE	DPA
Vaihingen/Enz	02/98	Applanix POS/AV-510 DG Novatel Millenium, Litton LR 86	HRSC-A
Bedburg	02/98	Applanix POS/AV-510 DG Novatel Millenium, Litton LR 86	RMK-Top 15
Vaihingen/Enz	12/98	Applanix POS/AV-510 DG Novatel Millenium, Litton LR 86	RMK-Top 15
Vaihingen/Enz	06/00, 09/02	IGI AEROcontrol-IIId Ashtech Z-Surveyor/Z-Extreme, IMU-IIId	RMK-Top 15



**Abb. 1:** AEROcontrol-Ild Test Vaihingen/Enz (Flugtag 05.06.2000).



**Abb. 2:** AEROcontrol-Ild Test Vaihingen/Enz (Flugtag 13.09.2002).

zu den in Tab. 1 zitierten Tests im Rahmen eines kommerziellen Produktionsprojekts erfasst wurden. Die Ergebnisse zeigen damit auch die Unterschiede zwischen sorgfältig geplanten und durchgeführten Testbefliegungen und späterer kommerzieller Anwendung in der Praxis auf.

## 2 Testfeldbefliegungen Vaihingen/Enz

Zur Evaluierung des geometrischen Genauigkeitspotenzials wurde das AEROcontrol-Ild-System in Kombination mit einer herkömmlichen Analogluftbildkamera über dem Testfeld Vaihingen/Enz ca. 25 km nordwestlich von Stuttgart geflogen. Das Testgebiet erstreckt sich über eine Fläche von ca. 30 km<sup>2</sup> mit mehr als 80 signalisierten Punkten. Die Geländekoordinaten dieser Punkte stehen überwiegend aus statischen GPS-Basislinienmessungen zur Verfügung und können als Referenzpunkte zur absoluten Genauigkeitskontrolle verwendet werden. Mittlerweile liegen die Daten zweier Testflüge vor: Der erste Flug fand im Juni 2000 statt, die zweite Befliegung wurde im September 2002 durchgeführt. In Abb. 1 und Abb. 2 sind die Flugtrajektorien für die Testflüge gegeben. In beiden Fällen wurden parallel Luftbilder in verschiedenen Maßstäben aufgenommen (Z/I-Imaging RMK-Top 15).

Die Konzeption beider Testflüge war ähnlich und entspricht der typischen Vorgehensweise zur Evaluierung des Genauigkeitspotenzials integrierter GPS/Inertial-Systeme in der photogrammetrischen Anwendung: Die Kombination mit einer herkömmlichen Luftbildkamera erlaubt es, die direkt gemessenen Orientierungselemente aus GPS/Inertial-Daten mit den klassisch indirekt geschätzten Orientierungselementen einer Aerotriangulation (AT) zu vergleichen. Dieses Verfahren ist die einzige Möglichkeit, für hochdynamische Flugumgebungen unabhängige Vergleichswerte für die GPS/Inertial-Orientierungselemente zur Verfügung zu stellen. Allerdings hat diese Vorgehensweise zwei gravierende Nachteile:

1. Die geschätzten Orientierungen aus der AT, die später für den Vergleich und die Genauigkeitsabschätzung herangezogen werden, ergeben sich indirekt im Rahmen einer Parameterschätzung. Sie sind optimal im Sinne der Parameterschätzung, repräsentieren aber nicht notwendigerweise die physikalisch gültige äußere Orientierung des Sensors zum Zeitpunkt der Bildaufnahme, da nicht korrigierte systematische Effekte durch entsprechende Schätzung der Orientierungselemente kompensiert werden. Demgegenüber liefern GPS/Inertial-Systeme die tatsächlich gültige physikalische Orientierung des Sensors.

2. Die theoretische Genauigkeit der geschätzten Orientierungselemente aus der AT liegt in einer Größenordnung, die nicht 5–10-mal besser ist, als die erwartete Genauigkeit der Positions- und Neigungsbestimmung aus GPS/Inertial-Systemen. Die theoretische Genauigkeit der Projektionszentrumskoordinaten aus der AT ergibt sich in Abhängigkeit von Bildmaßstab und Kammerkonstante, die Genauigkeit der Neigungswinkel ist abhängig von der Qualität, Anzahl und Verteilung der Pass- und Verknüpfungspunkte. Daher können die geschätzten Orientierungen aus der AT streng genommen nicht als Referenzwerte höherer Genauigkeit zur Evaluierung der GPS/Inertial-Orientierungselemente dienen. Im weiteren Verlauf der Ausführungen wird daher bewusst der Begriff Referenzwerte aus der AT vermieden und durch den Ausdruck Vergleichswerte ersetzt.

Aus obigen Gründen erlauben die Vergleiche der Projektionszentren demnach nur eine erste Genauigkeitsabschätzung, eine endgültige Kontrolle wird erst durch die Neubestimmung von Geländepunkten und durch Vergleich mit Referenzkoordinaten möglich. Dieser Schritt kontrolliert umfassend das gesamte Aufnahmesystem bestehend aus GPS/Inertial-Komponenten und Kamera.

### 2.1 Qualität der GPS/Inertial-Orientierungselemente

Die Vergleiche der GPS/Inertial-Orientierungen mit den geschätzten Werten aus der AT ermöglichen unter Berücksichtigung der beiden zuvor erwähnten Punkte erste Abschätzungen zur Genauigkeit der direkten Orientierungsbestimmung. Für die durchgeführten Untersuchungen standen dazu für den Testflug im Jahr 2000  $3 \times 36$  Bilder im Maßstab 1:13000 und 18 Bilder im Maßstab 1:6500 zur Verfügung. Für die Befliegung in 2002 wurden drei verschiedene Flughöhen mit folgenden resultierenden Bildmaßstäben realisiert: Maßstab 1:13000 ( $2 \times 21$  Bilder), Maßstab 1:6500 (10 Bilder) und Maßstab 1:3250 (18 Bilder). Jedes Bild definiert einen diskreten Zeitpunkt, an dem

die Vergleiche vorgenommen werden können.

Bevor die Differenzen zwischen den Orientierungselementen aus der AT und der äußeren Orientierung aus GPS/Inertial-Daten berechnet und statistisch analysiert werden können, muss zunächst die Vergleichbarkeit der Daten garantiert sein. Dazu sind die Daten in ein einheitliches Bezugssystem und auf eine gemeinsame Zeitskala zu transformieren. Anschließend sind für die Positionen die räumlichen Exzentrizitäten zwischen GPS-Phasenzentrum, Schwerpunkt IMU und dem physikalischen objektseitigen Projektionszentrum der Kamera zu berücksichtigen und zu korrigieren. Der Abstand des objektseitigen Projektionszentrums von der Fokalebene der Kamera ist dabei abhängig vom verwendeten Objekttyp. Er hat nur bedingt mit der kalibrierten Kammerkonstante zu tun und wird vom Kamerahersteller als eigene Größe zur Verfügung gestellt. So beträgt z. B. für eine Z/I-Imaging RMK-Top15 (mit Pleogon-Objektiv) dieser Abstand 25.4 cm. Für die Normalwinkelkamera RMK-Top30 (mit Topar-Objektiv) ist der Abstand 26.2 cm groß und damit nur unwesentlich größer als bei der Weitwinkelkamera (IGI 2003). Im Regelfall werden die Vektoren zwischen GPS, IMU und Fokalebene a priori gemessen und bereits im Rahmen der GPS/Inertial-Datenverarbeitung als Hebelarme berücksichtigt. Eine entsprechende Hebelarmkorrektur setzt zusätzlich die Berücksichtigung der durch die stabilisierende Plattform hervorgerufenen Änderungen voraus. Dazu können von den heute üblichen Stabilisierungen die entsprechenden Stellwinkel zum Zeitpunkt der Kameraauslösung ausgelesen werden.

Aufwändiger gestalten sich die Vergleiche der Neigungswinkel, da sich GPS/Inertial-Winkel auf das IMU-Koordinatensystem, die Vergleichswerte aus der AT aber auf die Achsausrichtung des Bildkoordinatensystems beziehen. Beide Systeme weisen eine Fehlansrichtung aufgrund der Einbauwinkel auf, das sogenannte Boresightwinkel-Alignment. Diese Fehlansrichtung bleibt konstant, sofern sich keine relativen Änderungen zwischen IMU und Kamera ergeben.

Die Boresightwinkel sind nicht a priori zu messen, sondern können nur im Rahmen einer Kalibrierung bestimmt werden. Dazu werden die Winkeldifferenzen an einer gewissen Anzahl von Bildern explizit bestimmt und anschließend alle GPS/Inertial-Winkel um diese Boresightwinkel-Korrektur bereinigt. Typischerweise geschieht diese Kalibrierung in einem speziell hergerichteten Kalibrierfeld. Alternativ kann in einer sog. integrierten Sensororientierung – GPS/Inertial-Daten werden als zusätzliche Beobachtungen in einer Parameterschätzung verwendet und darin die Boresightwinkel als eine Gruppe von Unbekannten geschätzt – diese Boresightwinkel-Korrektur auch im eigentlichen Befliegungsgebiet ohne Verwendung von Passpunkten vorgenommen werden, womit der Zusatzaufwand für ein separates Kalibrierfeld im Prinzip gespart werden kann. Diese integrierte Sensororientierung erlaubt es darüber hinaus, die Gesamtsystem-Kalibrierung für jedes Befliegungsgebiet optimal zu bestimmen und ist somit ein geeignetes Verfahren für höchste Genauigkeit und Zuverlässigkeit. Dazu werden im Abschnitt 3 noch einige weitere Ausführungen gegeben.

Für die hier vorgestellten Testfeldbefliegungen Vaihingen/Enz wurde ein Teil der zur Verfügung stehenden Bilder zur Korrektur der Boresightwinkel ausgewählt. Im Testflug 2000 waren dies die Bilder von insgesamt 9 Flugstreifen des Bildmaßstabs 1:13 000, für den Flug 2002 wurden alle 42 Bilder im Maßstab 1:13 000 für die Korrektur verwendet. Der Umstand, dass ein Teil der eigentlich zur unabhängigen Genauigkeitsevaluierung vorgesehen Bilder des Testgebietes zur Systemkalibrierung verwendet wird, ist ein Manko fast aller bisher durchgeführten GPS/Inertial-Genauigkeitsuntersuchungen, welches sich daraus ergibt, dass im Normalfall keine zwei räumlich voneinander getrennten Testgebiete mit ausreichender Passpunktanzahl zur unabhängigen Kontrolle zur Verfügung stehen. Daher geben derartige Untersuchungen auch aus diesem Grunde eher eine Abschätzung für die maximal erreichbare Genauigkeit der GPS/Inertial-Orientierungsbestimmung an, die sich nur unter optimalen Bedingungen in der späteren Praxis reproduzieren lässt.

Die für das AEROcontrol-II-d ermittelten Genauigkeiten der Positions- und Neigungsbestimmung sind für beide Testflüge

**Tab. 2:** Genauigkeit (RMS) GPS/Inertial-Projektionszentren (n/a – Angaben für Flug 2002 liegen noch nicht vor).

Maßstab	RMS-Werte [m], Test 2000				RMS-Werte [m], Test 2002			
	#	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	#	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
13000	108	0,11	0,09	0,06	42	0,08	0,08	0,04
6500	18	0,03	0,07	0,08	10	n/a	n/a	n/a
3250	—	—	—	—	18	n/a	n/a	n/a

**Tab. 3:** Genauigkeit (RMS) GPS/Inertial-Neigungswinkel (n/a – Angaben für Flug 2002 liegen noch nicht vor).

Maßstab	RMS-Werte [deg], Test 2000				RMS-Werte [deg], Test 2002			
	#	$\Delta\omega$	$\Delta\varphi$	$\Delta\kappa$	#	$\Delta\omega$	$\Delta\varphi$	$\Delta\kappa$
13000	94	0,0025	0,0023	0,0052	42	0,0034	0,0033	0,0053
6500	18	0,0030	0,0022	0,0057	10	n/a	n/a	n/a
3250	—	—	—	—	18	n/a	n/a	n/a



getrennt nach den verschiedenen Maßstäben in den Tab. 2 und 3 aufgeführt. Diese Zahlen sind unter Berücksichtigung der zu Anfang von Abschnitt 2 gemachten Anmerkungen zu interpretieren. Leider können für den Testflug 2002 bisher nur die Bilder 1:13000 analysiert werden, da momentan ausschließlich für die Bilder dieses Bildverbands die endgültigen GPS/Inertial-Orientierungselemente für die Genauigkeitsuntersuchungen zur Verfügung gestellt wurden. Die Verarbeitung der AEROcontrol GPS/Inertial-Daten wurde für beide Vaihingen/Enz-Testflüge vom Systemhersteller IGI vorgenommen und die endgültigen Orientierungselemente für die beiden großmaßstäbigen Bildverbände 1:6500 und 1:3250 der Testkampagne 2002 sind dem ifp bisher von IGI noch nicht geliefert worden. Der Eintrag „n/a“ (not available) in den Tabellen ist dementsprechend zu interpretieren.

Für die Koordinaten der Projektionszentren können für alle Maßstäbe Genauigkeiten (RMS) im Bereich von 1 dm erreicht werden. Dabei fällt auf, dass die Höhenkomponente fast durchgängig Faktor 2 besser bestimmt werden kann, was aus der Theorie der GPS/Inertial-Positionsbestimmung nicht zu erwarten ist. Diese Zahlenwerte spiegeln daher nicht die eigentliche Genauigkeit der GPS/Inertial-Positionierung, sondern geben vielmehr das theoretische Genauigkeitsverhalten der geschätzten Vergleichswerte aus der AT wieder und belegen damit, dass die AT eigentlich nicht als Referenz herangezogen werden kann.

Die Winkelgenauigkeit (Variation (RMS) der Winkeldifferenz nach Korrektur um mittlere Boresightwinkel) liegt typischerweise im Bereich von 0.002 deg (8'') und 0.006 deg (21'') und damit in dem Genauigkeitsbereich von 10''–25'', der auch in anderen Testflügen für derartige Systeme nachgewiesen wurde. Um diese Genauigkeiten zu erreichen, wurden die beiden ersten Flugstreifen der 2000er Befliegung ausgeklammert, da in diesem Flug das spezielle „initial alignment“-Flugmanöver vor Erreichen des Testgebietes vergessen wurde und daher aufgrund der unzureichenden Winkelinitialisierung noch deutliche systematische Effekte

im  $\kappa$ -Winkel zu erkennen waren. Erst durch die Dynamik der Kurvenflüge nach den ersten zwei Flugstreifen ist die Verbesserung der Initialisierung möglich. Alle weiteren Details zur Auswertung des Testflugs 2000 können in CRAMER (2001) nachgelesen werden.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse der Befliegung 2002 zeigen im Vergleich zur 2000er Befliegung vergleichbare Genauigkeiten. Es ist allerdings ausdrücklich anzumerken, dass im Flug 2002 alle 42 Bilder des Maßstabs 1:13000 für die Systemkalibrierung zur Verfügung gestellt wurden und daher keine unabhängige Kontrolle mehr möglich ist. Die in Tab. 3 ermittelten Genauigkeiten für die Winkelbestimmung mit dem AEROcontrol-II d unter Verwendung der auf 128 Hz getakteten IMU müssen erst durch die Auswertungen der zwei weiteren Bildmaßstäbe und zusätzliche Flugtests verifiziert werden.

## 2.2 Qualität der direkten Georeferenzierung

Wie bereits zuvor erwähnt, erlauben die Vergleiche an den Projektionszentren nur eine erste Abschätzung des zu erwartenden Genauigkeitspotenzials der direkten Georeferenzierung. Die umfassende Evaluierung des Gesamtsystems bestehend aus AEROcontrol-II d und RMK-Top 15 ist erst durch Absolutvergleiche an unabhängig bestimmten Kontrollpunkten im Objektraum möglich. Dazu werden unter Verwendung der GPS/Inertial-Orientierungselemente und der Bildmessungen die Koordinaten einer ausreichenden Anzahl von Kontrollpunkten durch Vorwärtsschnitt (direkte Georeferenzierung) neu bestimmt und anschließend die Differenzen zu den gegebenen Referenzkoordinaten statistisch analysiert. Je nach gewählter Blockkonfiguration ergeben sich dann die Genauigkeiten der Objektpunktbestimmung. Bei sehr hoher Bildüberdeckung und somit starker Blockverknüpfung stehen Bildstrahlen aus mehreren Bildern für die Koordinierung der Objektpunktkoordinaten zur Verfügung, wodurch Restfehler in den GPS/Inertial-Orientierungselementen

herausgemittelt werden können. Daher liefert die direkte Georeferenzierung bei Bildverbänden mit hoher Bildüberlappung und Verknüpfung in der Regel höhere Genauigkeiten als wenn man nur die Beobachtungen eines einzelnen Flugstreifens mit maximal 3-fach verknüpften Punkten für die Punktbestimmung heranzieht. Die für die AERO-control-Testflüge aus den Absolutvergleichen im Objektraum abgeleiteten RMS-Werte in Tab. 4 reflektieren unmittelbar das Genauigkeitspotenzial der direkten Georeferenzierung, da mögliche negative Einflüsse von Punktidentifizierungsfehlern durch die Signalisierung aller Punkte minimiert wurden. Weil für den Flug 2002 erst für einen Bildmaßstab endgültige Orientierungselemente zur Verfügung stehen, basieren die in der Tabelle gezeigten Genauigkeitsuntersuchungen verschiedener Blockkonfigurationen ausschließlich auf der Verwendung der 13000er Bilder.

Die bisher vorliegenden Ergebnisse der Befliegungen sind insgesamt sehr zufriedenstellend. Im Idealfall, d. h. bei sehr guter Blockgeometrie (Kreuzbefliegung mit starker Verknüpfung) und optimaler Gesamtsystemkalibrierung, können Genauigkeiten erzielt werden, die fast im Bereich der herkömmlichen AT liegen. Für eher typischere Blockkonfigurationen, parallele Streifen mit photogrammetrischen Standardüberdeckungen (in Tab. 4 Beispiele parallele Linien, 2 Streifen), sind für gleiche Maßstäbe

bereits etwas geringere Genauigkeiten zu erwarten. Im Hinblick auf die spätere Reproduzierbarkeit der Resultate ist es daher realistischer, von Objektpunktgenauigkeiten auszugehen, die verglichen mit der klassischen AT um den Faktor 1,5–2 schlechter sind. Für große und mittlere Maßstäbe sollten somit in Abhängigkeit von der Blockkonfiguration Genauigkeiten im Bereich von 10–20 cm für die Horizontal- bzw. 15–25 cm für die Vertikalkomponente möglich sein. Dieses Genauigkeitspotenzial wurde auch für andere Systeme mittlerweile mehrfach unabhängig voneinander bestätigt.

Die interessante Frage ist nun, inwieweit sich diese Genauigkeiten, die in den genau definierten und extra dafür konzipierten Testflügen wie z. B. über Vaihingen/Enz ermittelt wurden, auch auf praktische Anwendungen übertragen lassen. Dieser Punkt wird nachfolgend betrachtet.

### 3 Direkte Georeferenzierung im operationellen Umfeld

Die im Folgenden präsentierten Daten entstammen einem großen kommerziellen Befliegungsprojekt, das die Firma Hansa Luftbild über einen etwa 2-monatigen Zeitraum Anfang 2001 in Saudi-Arabien durchgeführt hat. Ziel dieses Projekts war im Wesentlichen die Produktion von digitalen Stadtgrundkarten. Dazu wurden während dieser Kampagne insgesamt mehr als 9000

**Tab. 4:** Qualität der direkten Georeferenzierung.

Test	Anzahl Bilder	Maßstab	Blockkonfiguration	Genauigkeit RMS [cm]		
				$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
2000	36	13000	Kreuzbefliegung, 6 Streifen	5,5	6,8	8,9
	36	13000	Kreuzbefliegung, 6 Streifen	7,1	9,6	15,2
	14	13000	Parallele Linien, 2 Streifen	11,3	12,6	13,8
	16	6500	Parallele Linien, 2 Streifen	4,9	6,4	8,7
2002	42	13000	Parallele Linien, 2 × 3 Streifen	8,5	10,9	12,4
	21	13000	Parallele Linien, 3 Streifen	10,5	11,2	18,2
	14	13000	Parallele Linien, 2 Streifen	11,7	10,4	14,5

Bilder an 12 verschiedenen Flugtagen aufgezeichnet. Während der ersten 10 Flugtage wurden die Bilder im Maßstab 1:5500 mit einer Normalwinkelkamera RMK-Top30 aufgenommen und parallel dazu vom AEROcontrol-IIId quasi-kontinuierlich (64 Hz) GPS/Inertial-Daten aufgezeichnet. Da während dieses Zeitraums nichts an der Gesamtsystemkonfiguration geändert wurde, können Aussagen über die Stabilität der Systemkalibrierung und die Langzeitgenauigkeit der direkten Georeferenzierung getroffen werden. Neben den eigentlichen Befliegungsgebieten wurde zusätzlich an jedem Flugtag ein speziell signalisiertes Kalibrierfeld in der Nähe des Flughafens überflogen. Bei diesem Kalibrierfeld handelt es sich um einen einzelnen Flugstreifen, bestehend aus sechs voll signalisierten Stereomodellen. Die dazu notwendigen 21 Passpunkte wurden mittels statischer GPS-Basislinienmessungen koordiniert. Dieser Kalibrierstreifen wurde im Regelfall an jedem Flugtag jeweils einmal vor bzw. nach der eigentlichen Befliegung in entgegengesetzter Richtung überflogen, sodass typischerweise pro Flugtag  $2 \times 7$  Bilder zur Kalibrierung zur Verfügung standen.

Die Daten der Kalibrierstreifen erlauben es nun, ähnlich wie auch bei den Testbefliegungen Vaihingen/Enz, die Qualität der GPS/Inertial-Orientierungselemente durch Vergleich mit den rechnerischen Orientierungen aus einer AT abzuschätzen. Zusätzlich können aus den jeweiligen Streifen für jeden Tag die entsprechenden Systemkalibrierparameter abgeleitet und anschließend untereinander verglichen werden. Da an der Gesamtkonfiguration keine Änderungen vorgenommen wurden, reflektieren die Variationen der Kalibrierparameter die Stabilität der Systemkalibrierung über einen längeren Zeitraum (CRAMER & STALLMANN 2002).

### 3.1 Qualität operationeller GPS/Inertial-Positions- und -Winkelbestimmung

Mit dem Kalibrierstreifen steht ein Testfeld mit ausreichender Anzahl von Passpunkten zur Verfügung. Allerdings besteht dieses

Testfeld im Gegensatz zu dem oben genannten Testfeld Vaihingen/Enz nur aus einem einzelnen Streifen. Hinzu kommt die Befliegung mit einer Normalwinkelkamera, die bei gleichem Bildmaßstab eine schlechtere theoretische Genauigkeit für die Bestimmung der Projektionszentren im Vergleich zu einer Befliegung mit einer Weitwinkelkamera zulässt. Diese Punkte müssen bei den nachfolgend abgeleiteten Genauigkeiten für die GPS/Inertial-Orientierungselemente im operationellen Umfeld berücksichtigt werden.

Die Abb. 3 zeigt exemplarisch die für den Kalibrierstreifen ermittelten Winkeldifferenzen zwischen GPS/Inertial- und AT-Winkeln für den Flugtag am 05.02.2001. Dargestellt sind die individuellen Winkeldifferenzen für die  $2 \times 7$  Bilder der beiden geflogenen Kalibrierstreifen dieses Tages (Vormittag/Nachmittag).

Die aus den Differenzen abgeleiteten Mittelwerte der Winkeldifferenzen liegen für  $\Delta\omega$  und  $\Delta\varphi$  bei 0,002 deg (11'') und 0,006 deg (21'') und sind in  $\Delta\varphi$  und vor allem in  $\Delta\kappa$  im Vergleich zu den ebenfalls mit 64 Hz aufgezeichneten Daten der Testbefliegung Vaihingen/Enz 2000 deutlich schlechter. Die Variationen für  $\Delta\kappa$  betragen 0,01 deg (36''). Auffällig sind hier deutliche streifenabhängige Systematiken, die darauf hindeuten, dass in der Integration der GPS/Inertial-Daten die systeminternen Fehler der IMU nicht

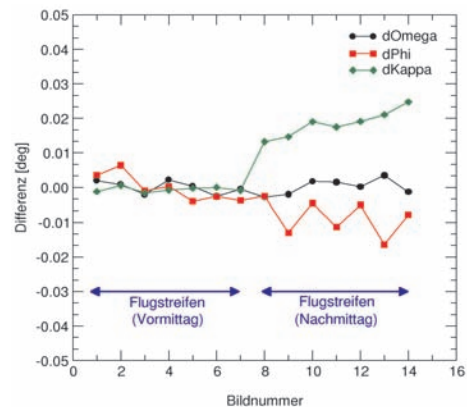


Abb. 3: Winkelvariationen Kalibrierstreifen (Flugtag 05.02.2001).



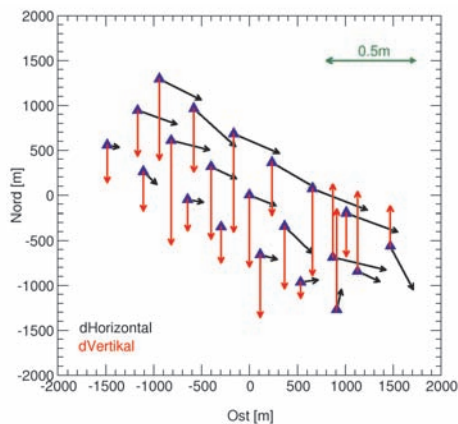
gänzlich eliminiert werden konnten. Diese systematischen Fehler sind für andere Flugtage dieser Kampagne noch deutlicher ausgeprägt. Bei ausreichender Satellitengeometrie und unter Beachtung der sonstigen Randbedingungen sollten derartige Effekte nicht auftreten. Sie lassen sich nur damit begründen, dass aufgrund zeitlicher Einschränkungen die Prozessierung der GPS/Inertial-Daten nicht mit der ausreichenden Sorgfalt durchgeführt wurde. Durch eine Wiederholung der GPS/Inertial-Datenverarbeitung könnte die Qualität deutlich verbessert werden. Diese Neuberechnungen sind aber mit zeitlichem und damit auch finanziellem Mehraufwand verbunden und werden daher in kommerziellen Anwendungen selten vorgenommen. Werden somit die Restfehler in den GPS/Inertial-Orientierungselementen nicht erkannt und korrigiert, wirken sie sich auch im weiteren Auswerteprozess im Rahmen der Systemkalibrierung (Bestimmung der Boresightalignment-Winkel) und der späteren direkten Georeferenzierung negativ aus.

Für das gezeigte Beispiel vom 05. 02. 2001 ergeben sich nach direkter Georeferenzierung Objektraumgenauigkeiten (RMS) von 19 cm bzw. 11 cm für Ost- und Nordkoordinate. Die Genauigkeit der Höhenkomponente liegt bei 38 cm (RMS). Der Wert für

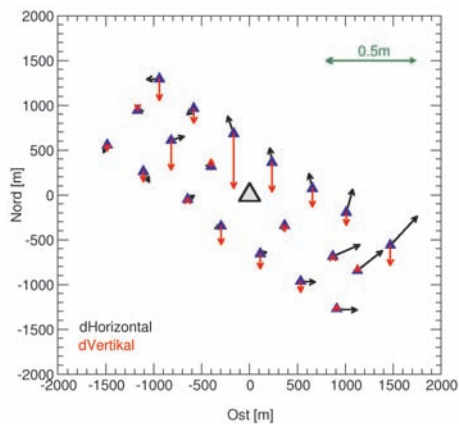
$\hat{\sigma}_0$  beträgt 29  $\mu\text{m}$ . Die Differenzvektoren sind in Abb. 4 für alle 21 Kontrollpunkte getrennt nach Lage- und Höhenkomponente dargestellt.

Deutlich sind größere Abweichungen zu erkennen, die in der Höhe Extremwerte von  $\pm 60$  cm erreichen. Die Lagevektoren weisen einen Trend in Südost-Richtung auf, die Vertikalkomponente zeigt ebenfalls systematische Verfälschungen. Derartige Fehler können im Regelfall nicht mehr akzeptiert werden, wobei der kritische Punkt vor allem darin liegt, dass diese Objektraumfehler ohne Kontrollpunkte im eigentlichen Befelegungsgebiet zunächst gar nicht nachgewiesen werden können – eine Situation, die aus Gründen der Zuverlässigkeit strikt zu vermeiden ist.

Daher sollte mindestens ein Punkt im Befelegungsgebiet für Kontrollzwecke zur Verfügung stehen, der ggf. auch als Passpunkt verwendet werden kann, um die Qualität der Punktbestimmung nachträglich durch eine integrierte Sensororientierung zu verbessern. Das Verfahren der integrierten Sensororientierung basiert auf den gleichen Eingangsdaten wie die direkte Georeferenzierung, allerdings werden die GPS/Inertial-Orientierungselemente als Beobachtungen mit entsprechender Genauigkeit in einer Parameterschätzung berücksichtigt. Gleichzeitig können weitere Korrekturterme einge-



**Abb. 4:** Qualität direkte Georeferenzierung (Flugtag 05. 02. 2001).



**Abb. 5:** Qualität integrierte Sensororientierung (Flugtag 05. 02. 2001).

führt werden um Restfehler in den Orientierungselementen zu kompensieren. Diese Vorgehensweise ist analog zu der Behandlung von Offset- und Driftparametern der GPS-gestützten AT. Die Verwendung von Passpunkten geringer Anzahl erlaubt die Korrektur globaler Offsetparameter, Verbesserungen z.B. der Bore sightalignment-Winkel sind aber auch ohne Verwendung von Passpunkten möglich.

Wird für das in Abb. 4 gezeigte Beispiel ein Punkt in der Mitte des Testgebiets als Passpunkt eingeführt und anschließend eine integrierte Sensororientierung mit zusätzlicher Korrektur signifikanter Offsets in Position und Winkeln berechnet, so ergeben sich an den verbleibenden 20 Kontrollpunkten die in Abb. 5 dargestellten Differenzen.

Das  $\sigma_0$  kann auf 4  $\mu\text{m}$  verbessert werden. Die statistische Analyse der Differenzvektoren führt zu folgenden RMS-Werten: 8 cm (Ost), 7 cm (Nord), 11 cm (Vertikal). In allen drei Koordinatenachsen ergeben sich deutliche Genauigkeitssteigerungen. Vor allem in der Höhenkomponente ist eine signifikante Verbesserung um Faktor 3 möglich. Der Vergleich der Abb. 5 mit Abb. 4 verdeutlicht den Genauigkeitszuwachs. Die integrierte Sensororientierung erlaubt es durch die entsprechende Modellierung der Restfehler mit minimaler Anzahl von Passpunkten Objektivraumgenauigkeiten zu realisieren, die vergleichbar sind mit den Resultaten einer Standard-AT mit ausreichender Passpunktanzahl. Diese Genauigkeiten konnten erreicht werden, obwohl bei der GPS/Inertial-Datenintegration nicht das volle Genauigkeitspotenzial ausgeschöpft wurde. Es muss aber zusätzlich angemerkt werden, dass es im Gegensatz zur klassischen AT, mit ausreichender Passpunktbesetzung in Blockecken- bzw. am Blockrand (Neupunkte werden daher im gegebenen Passpunkttrahmen interpoliert), bei der integrierten Sensororientierung mit sehr wenigen Passpunkten (im Extremfall wie hier nur ein Passpunkt) aufgrund von Extrapolation zu größeren Abweichungen in passpunktfernen Bereichen des Gebiets kommen kann. Auch diese Effekte sind in Abb. 5 zu erkennen.

### 3.2 Stabilität Langzeitkalibrierung

Neben dem Nachweis der Genauigkeit der GPS/Inertial-Positions- und Winkelbestimmung unter operationellen Bedingungen erlauben diese Daten erste Abschätzungen zur Stabilität einer Gesamtsysteminstallation, bestehend aus Kamera und GPS/Inertial-Komponenten über längere Zeiträume (etwa 6 Wochen). Dazu wurden basierend auf den Kalibrierflügen für jeden Tag die Kalibrierparameter neu bestimmt und anschließend deren zeitliche Variationen untersucht. Die Gesamtsystemkalibrierung wird ebenfalls durch integrierte Sensororientierung bestimmt: Unter Einbeziehung der zur Verfügung stehenden Passpunkte werden die gewünschten Kalibrierparameter als unbekannte Größen in einer Parameterschätzung geliefert. In diesem Fall wurden drei verschiedene Typen von Kalibrierparametern bestimmt: Positionsoffsets, Bore sightalignment-Winkel und der Einfluss von Zusatzparametern zur Kamerasselbstkalibrierung. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchungen sind nachfolgend zusammengefasst:

Für fast alle Kalibrierflüge sind signifikante Offsets in der Vertikalkoordinate nachweisbar. Diese Offsets sind nicht konstant, sondern können innerhalb von zwei aufeinanderfolgenden Flugtagen in einem Bereich von 10–40 cm variieren. Deutlich kleinere horizontale Offsets bis max. 20 cm sind demgegenüber nur für wenige Flugtage signifikant bestimmbar. Obwohl Positionsoffsets dieser Größenordnung für eine qualitativ hochwertige differenzielle GPS-Phasenlösung bei sorgfältiger Datenprozessierung nicht zu erwarten sind, sind sie aus vielen Praxisanwendungen der GPS-gestützten AT bereits bekannt und werden dort über die zusätzlichen Offset- und Driftparameter kompensiert. Die Offsets müssen aber nicht zwingend aufgrund globaler Verschiebungen oder Fehler der GPS-Trajektorie hervorgerufen sein, sondern können auch durch Inkonsistenzen zwischen physikalischer Realität und mathematischem Modell verursacht werden. Für den Zusammenhang zwischen angenommener Kammer-

konstante und resultierender Vertikalkomponente ist diese Problematik offensichtlich. Insgesamt erscheint es hinsichtlich einer Langzeitkalibrierung sinnvoll, eine mittlere Korrektur der Vertikalkomponente vorzunehmen. Allerdings müssen bei Verwendung dieser Langzeitkalibrierung alle Abweichungen von dieser mittleren Korrektur bei einer späteren direkten Georeferenzierung in Kauf genommen werden.

Die Bestimmung der Boresightalignement-Winkel ist wesentlich von einer qualitativ hochwertigen GPS/Inertial-Datenverarbeitung abhängig. Es ist sehr einfach nachvollziehbar, dass sich Restsystematiken in den GPS/Inertial-Winkeln, wie sie z. B. in Abb. 3 gezeigt wurden, voll auf die Schätzung der Boresightwinkel niederschlagen. Um daher eine realistische Abschätzung der Stabilität des Boresightalignments zu treffen, werden diejenigen Flugtage, an denen deutliche systematische Fehler in der GPS/Inertial-Winkelbestimmung erkennbar sind (u. a. Flugtag 05. 02. 2001), von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Nach Ausschluss dieser Daten lassen sich für die drei Boresightwinkel Variationen von  $\sigma_{\delta\omega} = 0,0032 \text{ deg } (11'')$ ,  $\sigma_{\delta\phi} = 0,0050 \text{ deg } (18'')$ , bzw.  $\sigma_{\delta\kappa} = 0,0026 \text{ deg } (9'')$  nachweisen. Diese Werte liegen mit Ausnahme von  $\delta\phi$  im Bereich des zu erwartenden Genauigkeitspotenzials der GPS/Inertial-Winkelbestimmung und können daher als Maß für die physikalische Stabilität des Boresightwinkel-Alignments über einen längeren Zeitraum interpretiert werden.

Bei der Kalibrierung eines Gesamtsystems muss neben den GPS/Inertial-Sensoren auch wie bisher die Kamera als wesentliche Komponente berücksichtigt werden. Daher wurden für alle Kalibrierstreifen Zusatzparameter zur Kompensation von Bildfehlern mitbestimmt. Für die hier untersuchte Kamera liegen die Korrekturen im Bereich von  $10 \mu\text{m}$  im Bild. Die Verzeichnungen zeigen für alle Flugtage gewisse Ähnlichkeiten, können aber im Detail variieren, sodass nicht davon ausgegangen werden darf, dass derartige Effekte bereits im Vorhinein vollständig zu korrigieren sind. Diese Tatsache ist bereits aus der Zeit erster

Untersuchungen zur Verwendung der Selbstkalibrierung in Bündelprogrammen bekannt.

Aus diesen Erfahrungen können nun Folgerungen für die Verwendung von Kalibrierparametern über längere Zeiträume abgeleitet werden. Es ist demnach davon auszugehen, dass bei geeigneter Befestigung der IMU die Boresightwinkel auch über längere Zeiträume stabil bleiben. Wichtig ist aber deren korrekte Bestimmung, die eine optimale Verarbeitung der GPS/Inertial-Daten voraussetzt. Die Variationen der Zusatzparameter können nicht vollständig a priori erfasst und korrigiert werden. Daraus resultierende Restfehler müssen mit etwa  $10 \mu\text{m}$  im Bild abgeschätzt werden. Der größte Fehlerinfluss für die hier untersuchten Flüge wird durch die Variationen in den Positionsoffsets hervorgerufen, vor allem in der Vertikalkomponente. Diese Offsets lassen sich nicht reproduzieren und ihr Fehlerbudget bei der Objektpunktbestimmung ist für den hier geflogenen Bildmaßstab deutlich größer als der Einfluss der Variationen in Boresightwinkeln und Zusatzparametern. Wird daher für alle Testflüge nur ein Parametersatz von mittleren Kalibriertermen angesetzt, ergeben sich bei der nachfolgenden direkten Georeferenzierung in der Vertikalkomponente die größten Abweichungen. Solche Fehler können nur durch eine flugtag-spezifische Verbesserung der Systemkalibrierung oder durch integrierte Sensororientierung im eigentlichen Befliegungsgebiet kompensiert werden (siehe Abb. 5). Alle weiteren Details zu den hier nur auszugsweise präsentierten Untersuchungen können CRAMER (2002) entnommen werden.

#### 4 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden Ergebnisse der direkten Georeferenzierung unter Verwendung des AEROcontrol-IId-Systems in Kombination mit klassischen Luftbildkameras in verschiedenen Testumgebungen präsentiert. Unter den kontrollierten Bedingungen spezieller Testfeldbefliegungen können Objektpunktgenauigkeiten erreicht werden, die sich von den Ergebnissen der

klassischen AT nur um den Faktor 1,5–2 unterscheiden. Diese Genauigkeiten sind sehr zufriedenstellend und auch für andere Flüge und vergleichbare Systeme nachgewiesen. Voraussetzungen zum Erreichen dieser Genauigkeiten sind eine optimale GPS/Inertial-Datenintegration und die korrekte Kalibrierung des Gesamtsystems. Unter operationellen Flug- und Auswertebedingungen können diese Kriterien aber nicht garantiert werden, vor allem dann nicht, wenn an die Verwendung von Kalibrierparametern über längere Zeiträume gedacht wird. In diesem Fall erlaubt das Verfahren der integrierten Sensororientierung die nachträgliche Verbesserung der Systemkalibrierung und die umfassende Kontrolle der Auswertung. Die Verwendung aller Beobachtungen in einer gemeinsamen Parameterschätzung liefert höchste Genauigkeit und Zuverlässigkeit.

Die GPS/Inertial-Orientierungselemente können darüber hinaus im Rahmen der automatischen AT für die Initialisierung von Startwerten und die Überbrückung texturschwacher Bereiche verwendet werden. Erste Erfahrungen aus der Praxis belegen den positiven Einfluss, allerdings muss die effiziente Integration der Zusatzdaten aus GPS/Inertial-Systemen in die automatische AT noch weiter untersucht werden.

## Literatur

- CRAMER, M., 2001: Performance of IGI AERO-control-IIId GPS/inertial system. – Final report, Institute for Photogrammetry (ifp), University of Stuttgart, Germany, digital verfügbar unter [www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2001/cramer\\_igi01.pdf](http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2001/cramer_igi01.pdf), 16 Seiten.
- CRAMER, M., 2002: Investigations on long term stability of system calibration for direct georeferencing. – Final report, Institute for Photogrammetry (ifp), University of Stuttgart, Germany, digital verfügbar unter [www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2002/igi\\_final\\_report.pdf](http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/2002/igi_final_report.pdf), 38 Seiten.
- CRAMER, M. & STALLMANN, D., 2002: System calibration for direct georeferencing – International Archives on Photogrammetry and Remote Sensing IAPRS, Volume XXXIV, Com. III, Part A: 79–84, ISPRS Commission III Symposium, Graz, September 2002.
- HEIPKE, C., JACOBSEN, K. & WEGMANN, H. (Eds.), 2002: Integrated sensor orientation – Test report and workshop proceedings. – OEEPE official publications No.43, digital verfügbar unter [www.oeepe.org/publications/pdf/no\\_43.pdf](http://www.oeepe.org/publications/pdf/no_43.pdf), 302 Seiten.
- HOFMANN, O., KALTENECKER, A. & MÜLLER, F., 1993: Das flugzeuggestützte, digitale Dreizeilenaufnahme- und Auswertesystem DPA – erste Erprobungsergebnisse – In: FRITSCH & HOBBIE (Eds.): Photogrammetric Week '93, Wichmann Verlag, Heidelberg, Seiten 193–204.
- IGI 2003, AEROoffice User Manual Vers. 4.07, Kreuztal, Germany, 2003.
- ŠKALOUD, J., CRAMER, M. & SCHWARZ, K. P., 1996: Exterior orientation by direct measurement of camera position and attitude – International Archives on Photogrammetry and Remote Sensing IAPRS, Volume XXXI, Part B3: 125–130, ISPRS Kongress, Wien, Juli 1996.
- WEWEL, F., SCHOLTEN, F., NEUKUM, G. & ALBERTZ, J. (1998): Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC – Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie. – Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG), **1998** (6): 337–348.

Anschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. MICHAEL CRAMER  
 Institut für Photogrammetrie (ifp)  
 Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str.  
 24D, D-70174 Stuttgart  
 Tel.: 0711–121 4118, Fax: 0711–121 3297  
 e-mail: michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de

Manuskript eingereicht: April 2003  
 Angenommen: Mai 2003