

Untersuchungen zu einem flugzeugbasierten Digitalkamera-System mit direkter Sensororientierung

CHRISTIAN MULSOW¹, DIRK HANNUSCH²

Zusammenfassung: Am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) an der TU Dresden wurde im Rahmen eines Projektes mit der MILAN Flug GmbH ein flugzeugbasiertes RGB-Digitalkamera-System mit direkter Sensororientierung hinsichtlich seiner Genauigkeit und Nutzbarkeit zur Orthophotogenerierung untersucht. Als Bildsensor im System fungiert ein Rollei-Metric 6008 Body mit einem 4k x 4k Digitalrückteil, welcher gegenüber anderen Luftbildsystemen eine low-cost Variante darstellt. Die Informationen über die jeweilige Bildorientierung werden durch das AEROcontrol-System der IGI mbH bereitgestellt. Zur korrekten direkten Kameraorientierung ist eine integrierte Systemkalibrierung notwendig. Als Kalibrierparameter werden dabei unter anderem die Fehlausrichtung zwischen dem Bildsensor und dem IMU spezifischen Körpersystem (Boresight Alignment) bestimmt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde anhand von verschiedenen Datensätzen neben der Güte der Bestimmbarkeit der Fehlausrichtung ebenfalls die Langzeitstabilität der Kalibrierparameter untersucht. Zur Beurteilung der Qualität der direkten Georeferenzierung wurden ermittelte Objektkoordinaten mit den Ergebnissen aus einer passpunktbasierten automatischen Aerotriangulation exemplarisch verglichen. Die praktische Nutzbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse konnte im Rahmen einer Orthophotogenerierung unter Beweis gestellt werden.

1 Einleitung

Ein wesentlicher Schritt bei der Rekonstruktion räumlicher Objekte auf der Basis von Bildaufnahmen ist die relative und die absolute Sensororientierung. Diese wird in der klassischen Luftbildphotogrammetrie über eine Aerotriangulation bewerkstelligt. Fortschritte und Innovationen auf dem Gebiet der bildgebenden Sensoren (digitale Zeilen-Kameras, Laserscanner) führten zu einem Bedarf an Technologien zur direkten Bestimmung der Orientierungsdaten des jeweiligen Sensors zum Aufnahmezeitpunkt, da klassische Orientierungsverfahren der Photogrammetrie auf Grund der spezifischen Sensorcharakteristik nicht zum Tragen kommen. Dieser Bedarf kann im Bereich der luftgestützten Sensoren durch integrierte GPS-Inertial Systeme mit ausreichender Genauigkeit und Zuverlässigkeit abgedeckt werden. Derartige Systeme sind in der Praxis bereits seit mehreren Jahren im Einsatz. Bisher werden integrierte Gesamtsysteme hauptsächlich mit einem Pushbroom-Sensor betrieben, da hier eine direkte Sensororientierung unabdingbar ist. Die Verwendung von GPS/IMU Einheiten zur Orientierung von Flächensensoren ist ebenfalls möglich, ist aber aufgrund der hohen Beschaffungskosten nicht sehr verbreitet. Derartige Kombinationen eröffnen dem Anwender eine Reihe von Möglichkeiten zur signifikanten Erhöhung des Automatisierungsgrades und der Geschwindigkeit der Auswertung. Gerade für Firmen, welche schon im Besitz eines GPS/IMU- Systems sind (z.B. Firmen im Bereich Airborne-Laserscanning), bietet sich die Möglichkeit der Integration eines weiteren Sensors an, um parallel zur Akquisition des Ober-

¹ Dipl. Ing. Christian Mulsow, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Dresden, Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden,
e-mail: Christian.Mulsow@mailbox.tu-dresden.de

² Dipl. Ing. Dirk Hannusch, Milan Flug GmbH, Schäfereistraße 24, 03130 Spremberg,
e-mail: d.hannusch@milan-flug.de

flächenmodells Bilder des befliegenen Gebietes zur Orthobilderzeugung aufzunehmen. Aus dieser Überlegung heraus erweiterte die Milan Flug GmbH ihr luftgestütztes System aus einem Riegl-Laserscanner und einer GPS-IMU Einheit der Fa. IGI mbH um eine Rollei Metric Kamera mit digitalem Rückteil. In dieser Konfiguration wurde im Oktober 2003 ein Gebiet von ca. 10 km x 20 km in der Lausitz aufgenommen.

Im Rahmen einer Pilotstudie zur Erstellung eines operationellen Ablaufplanes zur Orthobilderzeugung auf der Grundlage der GPS/IMU-Aufzeichnungen sowie Scan- und Bilddaten ist das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung an der TU Dresden von der Milan Flug GmbH als Kooperationspartner beratend hinzugezogen worden. Wesentliche Inhalte des Projektes waren die Bestimmung des Boresight Alignment zu jedem Flugtag sowie eine Abschätzung der zu erwartenden Genauigkeiten in den Orthobildern. Auf diese Punkte wird in diesem Artikel ein besonderes Gewicht gelegt.

2 Technischer Aufbau und Datenakquisition

Im Rahmen des oben angesprochenen Orthophotoprojektes wurde das bereits seit einiger Zeit bei der Milan Flug GmbH im Einsatz befindliche System aus einem Riegl ESS 800-15 Laserscanner und einer GPS/IMU Einheit AEROCtrl-IIId der Firma IGI mbH um eine Rollei Digitalkamera erweitert. Diese bildgebende Sensoreinheit besteht aus einem Rollei Metric 6008-Body und einem 4k x 4k -Digitalrückteil (4096 x 4096 Pixel). Als Optik wurde ein 50mm Objektiv verwendet, woraus bei einer Sensorgröße von 36mm x 36mm ein Öffnungswinkel von 50 gon resultiert.



Abb.1 Aufbau mit Laserscanner, IMU-Einheit und Kamera (Abb. Kamera Rollei-Prospekt)

Als problematisch stellte sich die geringe Speicherrate von bestenfalls 3sec/Bild heraus (praktisch erreichte Bildrate 4,5sec/Bild). Aus diesem Grunde war es nicht möglich, ein klassisches Streifenmuster mit in Flugrichtung überlappenden Aufnahmen bei einer Flugeschwindigkeit von ~60 m/s sowie einer durch den Bildmaßstab und die Scanner-Reichweite vorgegebenen Flughöhe über Grund von 600m zu realisieren. Es wurde daher, wie in Abb.2 verdeutlicht, der Bildverband zur Orthobilderzeugung in einer Art Reißverschluss-Muster aufgenommen. Damit konnte eine lückenlose Aufnahme des Gebietes erreicht werden.

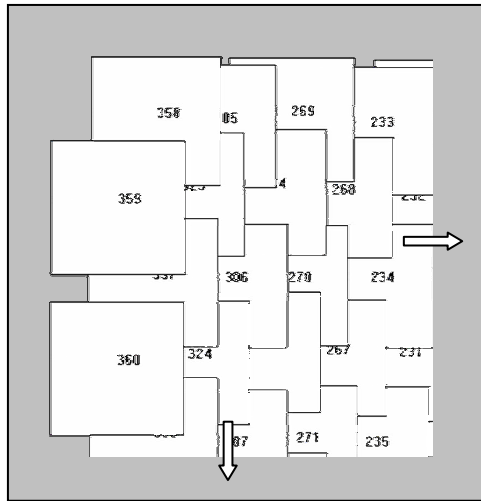


Abb.2 Aufnahmemuster für die Orthobilderzeugung

Für ein Boresight Alignment zur Bestimmung der Fehlausrichtung der IMU-Einheit zur Kamera auf Basis einer Bündelblockausgleichung hingegen ist diese Konfiguration des Bildverbands ungenügend. Als Abhilfe wurde daher ein Testfeld mehrmals befliegen, um Bildstreifen mit gegenseitiger Überlappung von 60-70% zu simulieren. Untenstehende Abb.3 mit Flugtrajektorien und Bildnummern verdeutlicht dieses Aufnahmeschema. Als Testfeld fungierte der Flugplatz Kamenz, auf welchem 23 signalisierte Passpunkte mit übergeordneter Genauigkeit via GPS und Totalstation zuvor aufgemessen wurden.

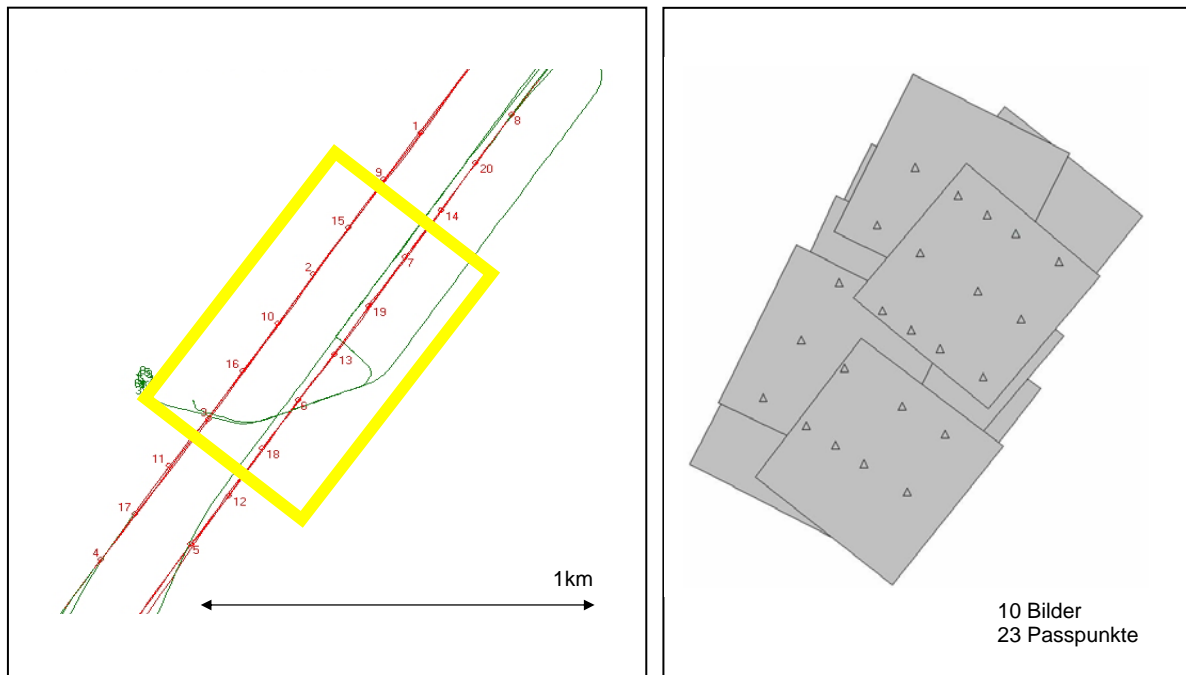


Abb.3 Testfeldbefliegung; Flugstreifen- und Passpunktanordnung

Die Aufnahmeconfiguration war bei den drei durchgeführten Testfeldbefliegungen identisch. Leider wurden keine Querstreifen über dem Feld aufgenommen, womit eine Möglichkeit zur Minderung von etwaigen Korrelationen zwischen den unbekanntem Parametern ausgelassen wurde. Der Bildmaßstab betrug in allen Aufnahmen ca. 1:12000, womit mit einer Bodenauflösung von ~ 11 cm erreicht wurde.

Die aufgezeichneten GPS/IMU Daten wurden von der IGI Auswertesoftware aufbereitet und in Form eines patb-Files dem weiteren Auswerteprozess zur Verfügung gestellt. Dabei werden an den GPS-Koordinaten Korrekturen zur Kompensation der Exzentrizität zwischen

GPS-Empfänger und Kamera angebracht und die Orientierungen des Körpersystems (IMU) über Hebelarmkorrekturen und Umrechnungen in photogrammetrische Winkel (Omega, Phi, Kappa) überführt (für eine ausführliche Darstellung siehe auch [Bäumker 2001]). Die Fa. IGI mbH gibt für die AEROcontrol-IIid Einheit eine Standardabweichung der Zentrumskoordinaten von 0.1m an. Die Orientierung kann mit einer Genauigkeit von 0.005/0.005/0.01 Grad für Omega/Phi/Kappa bestimmt werden. Diese Werte wurden in Tests am IFP der Universität Stuttgart bestätigt [Cramer 2003] und sogar übertroffen. A priori lässt sich daraus für dieses System und die Aufnahmekonfiguration eine theoretische Referenzierungsgenauigkeit für Bodenpunkte von besser als 0.2m in der Lage ableiten.

3 Kalibrierung - Boresight Alignment

Die gemeinsam prozessierten GPS und IMU Daten enthalten die zeitlich referenzierten Informationen über die Lage der GPS/IMU Einheit während des Bildfluges. Durch eine zeitliche Taktung können Bild- und GPS/IMU-Daten temporal zu einander referenziert werden. Die Position und die Ausrichtung GPS/IMU Einheit muss nun in einen räumlichen Bezug zur Kamera gebracht werden. Die Offsetvektoren zwischen Kamera und GPS/IMU Einheit wurden vorab durch einfaches Ausmessen am Boden bestimmt. Für die genaue Bestimmung der Ausrichtung zwischen IMU und Kamera hingegen ist eine Kalibrierung über eine Aerotriangulation unumgänglich. Der ebenfalls im System integrierte Laserscanner wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Da beim Einbau auf eine möglichst parallel zur IMU-Einheit ausgerichtete Montage der Kamera geachtet wurde, sind die zu bestimmenden Winkelbeträge der Fehlausrichtung kleiner als 5 gon.

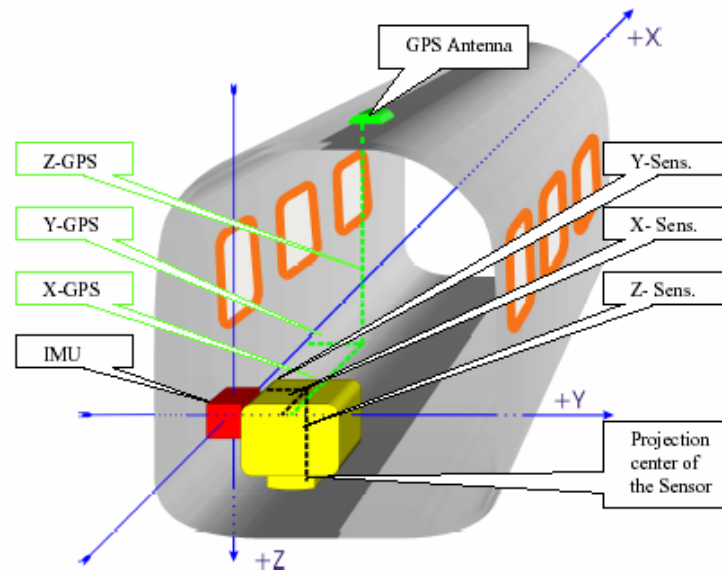


Abb. 4 Exzentrizitäten und Ausrichtungen zwischen den verschiedenen Systemkomponenten (IGI AEROcontrol-IIid Handbuch)

Die analytische Bestimmung der Offsetwinkel wurde an der TU-Dresden mit den Programmen Leica Photogrammetry Suite (LPS) und ORIMA durchgeführt. Zunächst wurden die Bilder des Kalibrierfluges in LPS ausgewertet. Dieser Prozess umfasste die Bildpunktmesung der Passpunkte, die automatische Messung von Verknüpfungspunkten sowie eine Vorab-Triangulation der Bilder und diente der Schaffung der Voraussetzungen für die darauf folgende Bestimmung der Offsetwinkel in ORIMA. Als Eingangswerte gehen dann die

GPS/IMU Daten, die Bildpunktmessungen und die Kameraparameter in die Ausgleichung in ORIMA ein. Der Parameterumfang für die Bündelblockausgleichung kann in ORIMA optional um die gesuchten Offsetwinkel erweitert werden. Nicht berücksichtigt wurden Parameter für eventuelle Fehler in den Offsetbeträgen (Hebelarm) zwischen IMU und Kameraprojektionszentrum, um die Lösung zu stabilisieren und Korrelationen zu minimieren. Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser kurze Hebelarm bei der Systeminitialisierung messtechnisch hinreichend genau bestimmt werden konnte. Auf Grund von Dateninkonsistenzen in den Passpunktkoordinaten und GPS-Daten wurden als zusätzliche Unbekannte zunächst Parameter für eine Datumstransformation der GPS-Projektionszentren (ohne Systemrotationen) in die Berechnung eingeführt. Nachdem für alle drei Testfeldbefliegungen die Winkelfehlbeiträge und die Datums-Translation ermittelt wurden, erfolgte eine Mittelung der Transformationsparameterwerte. Diese Beträge wurden dann a priori an den GPS-Zentren angebracht und abermalig die Berechnung der Winkelfehlbeiträge durchgeführt. Die Resultate sind in folgenden Diagrammen dargestellt (Abb.5).

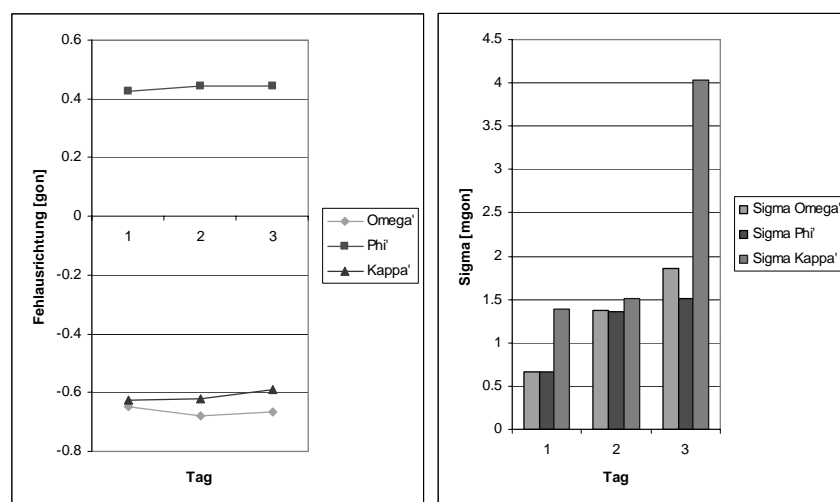


Abb.5 Misalignment-Winkel und zugehörige Standardabweichungen

Die Beträge der jeweiligen Misalignment-Winkel unterscheiden sich signifikant voneinander (4 bis 16- fache der Standardabweichung), womit zunächst auf eine Instabilität der Ausrichtung zwischen INS und Kamera geschlossen werden kann. Eine Langzeitstabilität ist demnach nicht gegeben und damit eine Kalibrierung des Systems für jeden Aufnahmeflug erforderlich. Auffällig ist das Ansteigen der Standardabweichungen für die ausgeglichenen Parameter der Fehlausrichtung. Anscheinend sank die Güte der Daten im Laufe der Messkampagne. Dieser Fakt spiegelt sich auch in den übrigen Qualitätsparametern aus der Ausgleichung wieder (Tab.1).

	1. Tag	2. Tag	3. Tag
Sigma 0 [Pixel]	0,38	0,32	0,51
RMS Omega _{IMU} [mgon]	2,6	4,6	5,7
RMS Phi _{IMU} [mgon]	3,0	6,6	6,7
RMS Kappa _{IMU} [mgon]	6,4	11,5	31,2
RMS GPS in X [mm]	7	7	6
RMS GPS in Y [mm]	10	9	5
RMS GPS in Z [mm]	10	12	9
Sigma X _{Proj.-zentrum} [mm]	6	16	15
Sigma Y _{Proj.-zentrum} [mm]	6	16	15
Sigma Z _{Proj.-zentrum} [mm]	7	15	15

Tab. 1 Genauigkeitsangaben der Bestimmung des Bore sight Alignments über erweiterte AT

Die ursächlichen Faktoren für diesen Qualitätsabfall sind zunächst nicht eindeutig lokalisierbar. Als mögliche Ursachen können Instabilitäten der Kamera angeführt werden. Es ist zu vermuten, dass durch die Beschleunigungskräfte während Start und Landung die innere Orientierung der Kamera beeinflusst wurde (Verschiebung des Hauptpunktes). Ein Indiz für diese Annahme ist die abnehmende Genauigkeit des Boresight Alignment mit Zunahme des zeitlichen Abstandes zum Kalibrierzeitpunkt. Eine simultane Kalibrierung der Kamera zu jedem Kalibrierflug zur Überprüfung dieses Verdachtsmomentes war aufgrund der zu diesem Zweck unzureichenden Aufnahmekonfiguration nicht realisierbar, sollte aber für zukünftige Projekte vorgesehen werden.

Zur Überprüfung der berechneten Beträge der Fehlausrichtung und zur Beurteilung der Brauchbarkeit der Daten zur Orthophotoproduktion wurden die IMU-Orientierungswinkel um den Winkeloffset verbessert und abermalig eine Bündelausgleichung mit fixierten (verbesserten) Zentrumskoordinaten und Orientierungen gerechnet. Die auftretenden Restklaffungen an den Passpunktkoordinaten können nun als Maß für die Beurteilung der Güte der direkten Georeferenzierung herangezogen werden.

Tag	Restklaffung in X [m]	Restklaffung in Y [m]	Restklaffung in Z [m]	Sigma x [Pixel]	Sigma y [Pixel]
1	0,04	0,04	0,21	0,64	0,68
2	0,06	0,06	0,32	0,66	0,84
3	0,06	0,14	0,28	0,73	0,98

Tab.2 Restklaffungen der Passpunkte nach erfolgter Bündelausgleichung mit fixierten und verbesserten GPS-Zentren und Orientierungen, Standardabweichungen der Bildpunktkoordinaten der Passpunkte

Wie aus Tab. 2 ersichtlich kann auch hier ein Abfallen der Güte der Referenzierung mit fortschreitender Dauer der Messkampagne beobachtet werden. Auffällig ist die signifikante Zunahme der Restklaffung an den Bildkoordinaten der Passpunkte in y-Richtung, welche in diesem Fall in Flugrichtung orientiert ist. Hier kann ein weiteres Indiz für die Theorie der instabilen Kamera erkannt werden, da die oben angesprochenen Beschleunigungskräfte primär in Flugrichtung wirken.

Die Lagegenauigkeit der Georeferenzierung kann bei als fehlerfrei angenommener Höhenreferenz mit 6cm für den 1. Tag, mit 8cm für den 2. Tag sowie mit 15cm für den 3. Tag abgeschätzt werden und war damit jedenfalls ausreichend für die vom Auftraggeber geforderte Genauigkeit von 20cm (gemäß Anforderungen ALK). Die abgeschätzte Lagegenauigkeit entspricht den Herstellerangaben und den Erwartungen an das System.

4 Orthophotogenerierung

Das primäre Ziel dieser Messkampagne war die Erzeugung von Orthophotos auf der Basis der Bilddaten und eines aus den aufgenommenen Laserscanner-Daten erzeugten Geländemodells. Sämtliche dafür notwendigen Daten konnten im Rahmen *eines* Aufnahmefluges simultan durch das integrierte GPS/IMU-Laser-Kamera-System akquiriert werden. Die Vorteile eines derartigen Systems liegen auf der Hand. Zum einen wird das GPS/IMU-System für beide bilderzeugenden Systeme genutzt und damit eine spannungsfreie Datenfusion garantiert, zum anderen können im erheblichen Maße Flugkosten und -zeiten eingespart werden. In Abb. 6 ist der Ablaufplan der Orthophotogenerierung schematisch dargestellt.

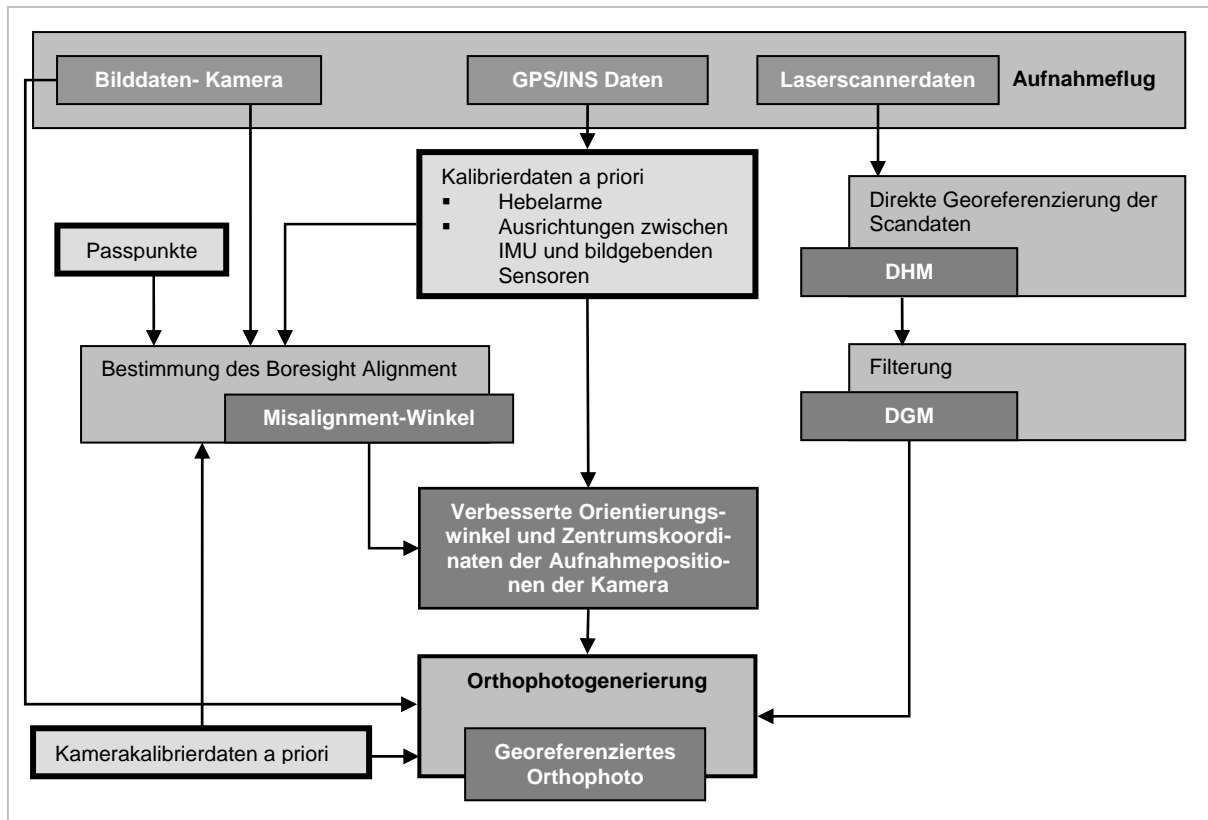


Abb.6 Workflow & Dataflow Orthophotogenerierung

Zur Kontrolle der Güte der generierten Orthophotos wurden diese in einem Viewer georeferenziert geladen und die Überlappungsbereiche hinsichtlich Stimmigkeit visuell beurteilt. An Kanten (Straßen, Wege) kann anhand der Diskrepanzen zwischen den Bildern eine Abschätzung der Referenziergenauigkeit der Bilddaten erfolgen. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Randbereiche dreier einander überlappender Orthophotos.



Abb.7 Visueller Vergleich der Randbereiche dreier einander überlappender Orthophotos

Es lässt sich erkennen, dass das der Grad des „Zusammenpassens“ der Kanten nicht homogen ist. In dem Beispiel Abb. 7 laufen die Kanten der horizontal verlaufenden Straßen nahezu nahtlos ineinander über, wobei der auf diese Straße mündende Weg in den Bildern nicht deckungsgleich dargestellt wird (Diskrepanz ~ 2 Pixel bzw. ~20 cm). Diese geometrischen Inkorrektheiten liegen in dem a priori abgeschätzten Genauigkeitsbereich (Abschnitt 3). Die beobachtete Inhomogenität ist auch ein Indiz für ein nicht optimal modelliertes Gelände. Zum einen liegt das DGM als Meterraster vor, womit mit Interpolationsfehlern bei der differentiellen Entzerrung zu rechnen ist. Geländekanten, welche insbesondere bei Kunstbauten wie Straßen und Wegen auftreten werden zudem schon bei der Rastererstellung aus der Laser-scannerpunktwolke nur noch unzureichend repräsentiert. Als weitere Fehlerquelle bei der DGM-Erzeugung sei auch hier die Filterung benannt. Bei dem in diesem Falle großen Öffnungswinkel der Aufnahmeoptik (50 gon) kommen eben benannte Fehler im DGM besonders in den Randbereichen des Ergebnisbildes der differentiellen Entzerrung zum Tragen. Eine umfassende Kontrolle der Orthophotos durch Anmessen von Kontrollpunkten, wie in [Ip 2004] beschrieben, war in diesem Falle nicht möglich, da für das eigentlichen Messgebiet keine Referenzdaten vorlagen.

5 Fazit

Flugzeugbasierte integrierte Systeme zur vollständigen geometrischen und radiometrischen Erfassung von Erdoberflächen mit der Möglichkeit zur direkten Georeferenzierung der akquirierten Daten werden aufgrund des großen Automationspotentials schon in naher Zukunft eine weite Verbreitung in der operationellen Photogrammetrie finden. Dabei können für Gebiete mit beschränkter Ausdehnung oder die Aufnahme von Korridoren „low cost“ Lösungen auf Basis eines 4k x 4k Flächensensors bereits eine interessante Lösung darstellen. Wie die Ergebnisse zeigen, werden die Qualitäten einer herkömmlichen Aerotriangulation zwar noch nicht ganz erreicht, aber für die Abwicklung von Projekten, welche nicht den höchsten Genauigkeitsanforderungen genügen müssen, sind derartige Systeme im höchsten Maße interessant.

Wie die Ergebnisse zeigen, ist das Genauigkeitspotential der untersuchten Gerätekombination noch nicht ausgeschöpft, da Instabilitäten der verwendeten Kamera nicht ausgeschlossen werden konnten. Eine simultane „On the Job“ Kalibrierung oder die Verwendung einer stabileren Kamera kann hier Abhilfe schaffen.

Literaturverzeichnis

- BÄUMKER, M. & HEIMES, F.-J., 2001: Neue Kalibrations- und Rechenverfahren zur direkten Georeferenzierung von Bild- und Scannerdaten mittels der Positions- und Winkelmessungen eines hybriden Navigationssystems. In: Proceedings 11. Internationale Geodätische Woche, Obergurgl, Ötztal/Tirol, 18.-24.2.2001
- CRAMER, M., 2003: Erfahrungen mit der direkten Georeferenzierung. In: Zeitschrift Photogrammetrie - Fernerkundung – Geoinformation PFG, Ausgabe 4/2003 S.267-278
- HIMLE, S., 2001: Sensor integration and data fusion in praxis. In: Photogrammetric Week 01, 2001, S.239- 247
- IP, A. ET AL, 2004: Orthophoto Production Using Directly Georeferenced Digital Images. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, März 2004, S. 261/262