

Das digitale flugzeuggetragene low-cost Fernerkundungssystem PFIFF

GÖRRES GRENZDÖRFFER, Rostock

Keywords: remote sensing, digital aerial photography, aerotriangulation, digital airborne imaging system, PFIFF-system

Zusammenfassung: Neben digitalen Kamerasystemen, die die analogen Reihenmesskammern zukünftig ersetzen sollen, sind in den letzten Jahren weltweit verschiedenste „low-cost“ Systeme entwickelt worden. Der Beitrag gibt eine Übersicht über die notwendigen Schlüsselkomponenten und den Stand flugzeuggetragener digitaler low-cost Fernerkundungssysteme. PFIFF als low-cost System des Instituts für Geodäsie und Geoinformatik Rostock wird im Hinblick auf das photogrammetrische Potential anhand mehrerer Beispiele vorgestellt. Ein Vergleich mit HRSC-Aufnahmen verdeutlicht die exzellenten radiometrischen Eigenschaften von PFIFF.

Summary: *PFIFF, a new low-cost digital airborne remote sensing system.* Beside high-end digital imaging systems which will replace standard photogrammetric cameras in the future, a large number of “low-cost” airborne systems were developed in the last years. A categorization in terms of their main components and their generated products is given. The system PFIFF, a digital airborne remote sensing system developed by the author, is described in detail with special respect to demonstrate the photogrammetric potential of PFIFF. Due to the excellent radiometric properties and the dynamics of the 12 bit digital colour sensor PFIFF has better radiometric performance than the HRSC-AX.

1 Einleitung

Die flächendeckende Einführung digitaler Aufnahmesysteme, die die analogen Reihenmesskammern zukünftig ersetzen werden, lässt noch etwas auf sich warten. Warum? Digitale Systeme wie z. B. DMC, ADS 40 oder UltraCam sind auf dem Markt und mittlerweile technisch ausgereift (GRUBER et al. 2003, HINZ et al. 2001, FRICKER 2001). Ein Gewinn versprechender Einsatz erscheint derzeit jedoch für viele, insbesondere kleinere Bildflugfirmen, nicht gegeben, vor allem aufgrund der hohen Systemkosten, die die vielfältigen Vorteile der digitalen Aufnahmetechnik, die z. B. GRUBER et al. 2003 eindrücklich beschrieben haben, nicht kompensieren können. Ganz anders verhält sich das im Bereich der so genannten „low-cost“ Systeme; hier hat sich ein vollständig digitaler Workflow, von der Aufnahme bis zum

Orthophoto bzw. DOM, etabliert. Die Einsatzschwerpunkte digitaler low-cost Systeme sind entweder neue Anwendungsfelder, wie z. B. Precision Farming, oder aber sie verdrängen die Reihenmesskammer in Bereichen, in denen diese zu teuer bzw. zu unflexibel ist, wie z. B. beim Laserscanning, bei der gleichzeitig eine digitale Kamera die Erdoberfläche aufnimmt. Grundsätzlich können digitale low-cost Systeme gegenüber einer Reihenmesskammer in folgenden Punkten überlegen sein:

- geringerer Preis pro Fläche, insbesondere für kleinere Gebiete von wenigen km² bzw. bei geringen Bodenauflösungen,
- kürzerer Turn-around-Zeitraum von der Aufnahme bis zum ersten Bild bzw. fertigen Produkt durch einen automatischen digitalen Workflow oder
- Kombination von Senkrecht und Schrägaufnahmen.

2 Kategorisierung digitaler low-cost Systeme

In den letzten Jahren sind weltweit vornehmlich an Forschungseinrichtungen verschiedenste digitale flugzeuggetragene Fernerkundungssysteme für unterschiedlichste Anwendungsschwerpunkte entwickelt worden. Entsprechend der Zielstellung sind Systeme unterschiedlicher Komplexität und Leistungsfähigkeit entstanden, z. B. BÄUMKER et al. 1999, BUCKLEY et al. FRANKE & MONTGOMERY 2000, HOLM & RAUTAKORPI 1999, MOSTAFA & SCHWARZ 2000, THOM & SOUCHON 1999, TOTH 1999. Neben den universitären Entwicklungen gibt es auch kommerzielle Systeme, z. B. ADAR von Positive Systems oder EMERGETM von Emerge, DAIS von Space Imaging (vgl. PETRIE 2003 für eine Übersicht der kommerziellen Lösungen).

Die genannten Systeme reichen von „low-end“ Systemen, die für die Aufnahme einzelner Senkrecht- oder Schrägaufnahmen geeignet sind, bis hin zu professionellen „high-end“ Systemen, die für eine direkte Georeferenzierung von Bildverbänden, Streifen oder Einzelaufnahmen geeignet sind. Unabhängig von der speziellen technischen Umsetzung sind für ein flugzeuggetragenes digitales Bildflugsystem mehrere Schlüsselkomponenten notwendig:

- Eine Digitale Kamera, die für den Bildflug geeignet ist. Das bedeutet, die Kamera muss extern gesteuert und mit Strom versorgt werden können. Sie sollte eine schnelle und kontinuierliche Bildfolge ermöglichen, die Daten sollten möglichst auf einem externen Medium speicherbar sein, um einen Wechsel des Datenträgers während des Bildfluges zu vermeiden. Besonders wichtig ist eine hohe Zuverlässigkeit der digitalen Kamera. Neben der Farbdigitalkamera, die in den meisten Systemen eingesetzt und über einen Mosaikfilter mit anschließender Farbinterpolation die RGB-Werte für jedes Pixel erzeugt, sind im low-cost Bereich auch Mehr-Kamera-Systeme entwickelt worden, die dann auch eine CIR-Aufnahme ermöglichen. Bei großmaßstäbigen Luft-

bildern bzw. bei schnell fliegenden Flugzeugen kann darüber hinaus noch eine elektronische oder mechanische Forward Motion Compensation (FMC) sinnvoll sein.

- Ein Flug-Management-System zur Navigation in der Luft und zur Auslösesteuerung der Kamera. Dabei kann die Auslösesteuerung entweder in bestimmten Zeitintervallen erfolgen oder über die Vorgabe bestimmter Zielkoordinaten.
- Ein GPS/(INS) zur Erfassung der genähernten bzw. exakten Parameter der äußeren Orientierung. Die Genauigkeit des GPS/INS bestimmt die Möglichkeit zur direkten Georeferenzierung. Während GPS/INS mit Genauigkeiten ($x, y, z < 1 \text{ m}, \omega, \phi, \kappa < 0.4^\circ$) den Prozess der Aerotriangulation stark automatisieren können, ist bei Genauigkeiten von ($x, y, z < 0.1 \text{ m}, \omega, \phi, \kappa < 0.01^\circ$) eine hochgenaue direkte Georeferenzierung möglich.
- Eine (stabilisierte) Aufhängung, um die Vibrationen des Flugzeugs nicht auf die Kamera zu übertragen und die Flugzeugbewegungen zu kompensieren. Bei einer stabilisierten Plattform kann über eine Kompensation des Triftwinkels zusätzlich noch die Querüberlappung minimiert werden.

Die Effizienz eines digitalen Aufnahmesystems stellt für den Entwickler bzw. Käufer immer einen Kompromiss im Hinblick auf die mögliche Aufnahmekonfigurationen, den Aufwand der Datenprozessierung, den Zeitaufwand und den Systempreis dar. Mit der Nutzung von aufeinander abgestimmten leistungsfähigen Komponenten können der Bildflug und die Auswertung sehr effizient und nahezu vollautomatisch gestaltet werden. Auf der anderen Seite steigt der Systempreis unter Umständen dramatisch und macht dadurch ein großes Auftragsvolumen bzw. einen großen Datendurchfluss notwendig. Insgesamt können fünf verschiedene Kategorien digitaler flugzeuggetragener Systeme unterschieden werden (siehe Tab. 1):

1. low-end Systeme, die Senkrecht- und Schrägaufnahmen („hübsche Bilder“) erzeugen können,

Tab. 1: Kategorisierung flugzeuggetragener digitaler „low-cost“ Systeme.

	<i>Low-end</i>	<i>Low-Mid-end</i>	<i>Mid-end</i>	<i>Mid-High-end</i>	<i>High-end</i>
Digitale Video-/Consumer Kamera Digitale Mittelformatkamera Photogrammetrische/multi- spektrale Spezialkamera	×	×	×	×	×
GPS GPS /L1-DGPS RTK-GPS	×	×	×	×	×
Einfaches GPS-Flug-Management System	×	×			
Automatische Bildfolgeauslösung		×	×	×	×
Flug Management System mit Event Marker			×	×	×
Stabilisierte Plattform				×	×
GPS-INS ($x, y, z < 1 \text{ m}$, $\omega, \varphi, \kappa < 0,4^\circ$)				×	
GPS-INS ($x, y, z < 0,1 \text{ m}$, $\omega, \varphi, \kappa < 0,01^\circ$)					×
Verarbeitungszeit ¹	N/A	1 h/100 h	45 min/75 h	15 min/75 h	5 min/8 h
Preis ²	< 5 000 €	< 10 000 €	< 50 000 €	< 100 000 €	< 500 000 €

¹ für einzelne Orthobilder/100 Orthobilder, grobe Zeitschätzung, um die Differenzen zu verdeutlichen

² grobe Schätzung des Systempreises, ohne die Kosten für die photogrammetrische Auswertesoftware.

2. low- bis mid-end Systeme, mit denen Orthophotos erzeugt werden können,

3. mid-end Systeme, die eine direkte Georeferenzierung von Blöcken ohne automatische Erzeugung von Verknüpfungspunkten ermöglichen,

4. mid- bis high-end Systeme, die eine direkte Georeferenzierung von Blöcken mit automatischer Erzeugung von Verknüpfungspunkten zulassen und

5. high-end Systeme, die eine direkte Georeferenzierung von Blöcken, Streifen und einzelnen Aufnahmen gewährleisten.

3 Der Bildflug mit einem kleinen Sportflugzeug

Um für kleine Gebiete flexible Schräg- und Senkrechtaufnahmen machen zu können, ist

der Einsatz von speziellen Vermessungsflugzeugen vielfach zu aufwendig. In verschiedensten Projekten werden deshalb auch einmotorige Sportflugzeuge bzw. Ultra-Light Flugzeuge verwendet. Da Ballons und Modellflugzeuge keine signifikante Flächenleistung erbringen, wird im Folgenden nur der low-cost Bildflug mit Hilfe kleiner Sportflugzeuge näher betrachtet. Dabei gibt es grundsätzlich drei Möglichkeiten, mit Sportflugzeugen Senkrechtaufnahmen zu machen:

1. Tür ausbauen und der Kopilot hängt sich – selbstverständlich gut angeschnallt und mit einer eng anliegenden Schwimmbrille o.ä. versehen – aus dem Flugzeug und macht die Aufnahmen.

2. Die Kamera wird außen am Flugzeug montiert, ohne die Statik des Flugzeugs zu

beeinträchtigen, z. B. Alphanluftbild 2003. Von Vorteil ist vor allem, dass ohne großen Aufwand jedes Flugzeug eines Bautyps verwendet werden kann. Allerdings muss die Kamerasteuerung von innen realisiert werden.

3. Ein Sportflugzeug mit einer kleinen Bodenluke. Ein Durchmesser von 10–15 cm ist für die meisten Objekte durchaus ausreichend. Die Bodenluke sollte sich im Bereich der hinteren Sitzbank befinden, die zu diesem Zweck einfach ausgebaut wird. Es ist darauf zu achten, dass sich die Bodenluke nicht direkt hinter dem Auspuff befindet.

Im Gegensatz zu gebräuchlichen zweimotorigen Vermessungsflugzeugen (z. B. Cessna 404, DO 28D) mit einer Standardbodenluke weisen Sportflugzeuge, wie z. B. eine einmotorige Cessna 172, einige Besonderheiten auf, die auch für den Bildflug Konsequenzen haben, siehe Tab. 2.

Die dargestellten Unterschiede zwischen einem Vermessungsflugzeug und einem Sportflugzeug führen für die low-cost Anwendung zu folgenden Konsequenzen:

- Während ein schnelles zweimotoriges Flugzeug binnen eineinhalb Stunden jedes Aufnahmegebiet innerhalb Deutschlands erreichen kann, führt die geringe Anfluggeschwindigkeit bei Sportflugzeugen zu

einer regionalen Beschränkung des Einsatzgebiets bei den üblichen instabilen Wetterlagen. Die größere Reichweite der Vermessungsflugzeuge bedeutet eine bessere Auslastung des Flugzeugs bei den vorherrschenden zyklonalen Wetterlagen, die von West nach Ost durchziehen. Aus der bisherigen Erfahrung ist aufgrund der Überschaubarkeit der Witterungsbedingungen sowie aus Kostengesichtspunkten ein Bildflug mit der Cessna 172 im Radius von maximal 1,5–2 Flugstunden sinnvoll.

- Die größere Motorleistung eines Vermessungsflugzeugs, das gleichzeitig mit größeren Tanks ausgestattet ist, erlaubt einen schnellen Aufstieg auf die gewünschte Höhe und einen langen kontinuierlichen Bildflug. Mit der Steiggeschwindigkeit von 500 ft./min. dauert es mit der Cessna 172 ca. 20 Minuten, bis die maximale Flughöhe des unkontrollierten Luftraums von 10.000 ft. (= 3.050 m) erreicht ist. Deshalb kann es bei in der Nähe des Flughafens liegenden Projekten durchaus ratsam sein, in geringerer Höhe zu arbeiten.
- Die vergleichsweise geringe Bildfluggeschwindigkeit der Cessna 172 bedeutet einerseits, dass der Überflug eines Untersuchungsgebietes länger dauert, was ein höheres Witterungsrisiko aufziehender Bewölkung bedeutet. Mit der Bildflug-

Tab. 2: Vergleich Vermessungsflugzeug und Sportflugzeug vom Typ Cessna 172.

	Cessna 172	Vermessungsflugzeug*
Fluggeschwindigkeit (Anflug) [km/h]	150–200	300–700
Fluggeschwindigkeit (Bildflug) [km/h]	140–180	180–300
Anzahl Motoren	1	(1)–2
Max Flugdauer [h]	5	6–8
Steiggeschwindigkeit [m/s]	2,5	5–8
Max. Steighöhe [m]	3 500	8 000–10 000
Durchmesser Bodenluke	14 cm	57 cm
Navigation	Sichtflug	Instrumentenflug
Preis pro Flugstunde	120–300 €	400–1000 €

* durchschnittliche Werte gängiger Flugzeugtypen – Quelle: ALBERTZ & KREILING 1989

geschwindigkeit ist auch die Flächenleistung pro Stunde verbunden, die bei einem Vermessungsflugzeug annähernd doppelt so groß ist. Andererseits verringert die geringe Fluggeschwindigkeit auch die Bewegungsunschärfe.

- Damit jede Schönwetterlage genutzt werden kann, ist ein Vermessungsflugzeug mit einer Instrumentenflugausrüstung (IFR) ausgestattet, die auch Starts z. B. aus einer Bodennebelsituation heraus ermöglichen. Bei diesen Situationen muss ein Sportflugzeug üblicherweise am Boden bleiben, denn für einen Start nach Sichtflugregeln (VFR) ist eine Sichtweite von mindestens 5 Kilometern notwendig.
- Um auch bei kleinen Befliegungsgebieten wirtschaftlich Bildflüge durchführen zu können, sind die Kosten für das Flugzeug pro Stunde von ausschlaggebender Bedeutung. Hier liegt die eigentliche Stärke eines Sportflugzeugs, welches in der Anschaffung und im Unterhalt wesentlich günstiger ist als ein spezielles Vermessungsflugzeug, das ausschließlich für den Bildflug genutzt wird.

Bildwanderung

Um Unschärfen zu vermeiden, muss die Bildwanderung, die durch die Vorwärtsbewegung des Flugzeugs während der Aufnahme entsteht, berücksichtigt und ggf. kompensiert werden. Während dieser Effekt bei einer Reihenschicht durch eine mechanische FMC kompensiert werden kann, muss für den digitalen low-cost Bildflug erst geprüft werden, ob dieser Effekt wegen der geringeren Fluggeschwindigkeit eines Kleinflugzeugs überhaupt relevant ist. Die theoretische Bildwanderung b_w eines Objekts beträgt:

$$b_w = \frac{c \cdot v_g \cdot t}{H_g} \quad (1)$$

wobei c die Kammerkonstante [m], v_g die Geschwindigkeit des Flugzeugs über Grund [m/s], t die Belichtungszeit [s] sowie H_g die Flughöhe [m] ist. Anhand der Parameter wird deutlich, dass die Bewegungsunschärfe bei langen Belichtungszeiten, mit

größer werdendem Bildmaßstab und höherer Geschwindigkeit des Flugzeugs zunimmt. Für die photogrammetrische Bildauswertung ist jedoch die praktische Bildwanderung von Bedeutung, die ungefähr die Hälfte der theoretischen Bildwanderung ausmacht.

Für die digitale Photogrammetrie ist ein elektronisches FMC entwickelt worden, das durch synchrones Auslesen der CCD-Zeilen mit der Fluggeschwindigkeit erreicht wird, vgl. HINZ et al. 2001. Die damit maximal erzielte Genauigkeit liegt bei 0,5 Pixel. Diese Technik ist für die nachfolgend noch genauer vorgestellte Rollei db23 nicht anwendbar, da sie eine exakte hardwareseitige Steuerung des Auslesevorgangs erfordert. Allgemein gesprochen wird eine elektronische FMC nur für spezielle „photogrammetrische“ CCD-Chips eingesetzt. Um die Bildwanderung bei einem Flug mit einer Geschwindigkeit von < 70 m/s zu unterdrücken, ist eine Belichtungszeit von $1/250$ – $1/500$ s. in der Regel ausreichend. Abb. 1 verdeutlicht die Notwendigkeit einer FMC für verschiedene Bodenauflösungen in Abhängigkeit der Geschwindigkeit des Flugzeugs.

Abbildung 1 verdeutlicht, dass für kleinmaßstäbige Anwendungen (z. B. in der Landwirtschaft) die Bildwanderung keine praktische Bedeutung hat. Für großmaßstäbige Befliegungen (z. B. für Stadtbefliegungen) mit Bodenauflösungen < 20 cm, kann die Bildwanderung problematisch werden, vor allem dann, wenn die Lichtverhältnisse Belichtungszeiten von $1/500$ s. nicht zulassen. Zukünftig wird das Problem der Bild-

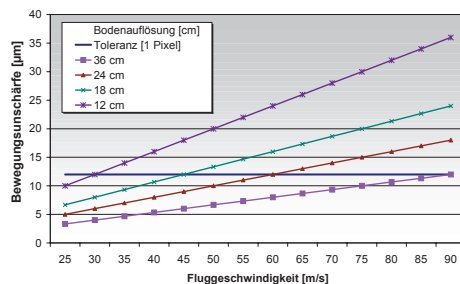


Abb. 1: Theoretische Bildwanderung der Rollei db23 in Abhängigkeit der Fluggeschwindigkeit bei einer Belichtungszeit von $1/250$ s.

wanderung noch kritischer, da bei immer größeren CCD-Chips mit $4K \times 4K$ die Bildelementgrößen immer kleiner werden ($6-9 \mu\text{m}$).

4 PFIFF

PFIFF, ein digitales flugzeuggetragenes Fernerkundungssystem, wurde vom Autor ursprünglich für die speziellen Anforderungen des Precision Farmings entwickelt (GRENZDÖRFFER 2002). Diese Anforderungen – geringe Kosten, hohe Bodenauflösung und schnelle Datenprozessierung – sind natürlich auf viele andere Anwendungen übertragbar.

System Komponenten von PFIFF

Bis zum Juli 2002 bestand das Herzstück von PFIFF aus einem Farbdigitalrückteil Rollei DSP 104 mit einer Auflösung von 2010×2018 Pixel. Dieser Sensor konnte im Sommer 2002 durch eine Rollei db23, ein Nachfolgemodell mit einer höheren Auflösung und einer sehr viel kürzeren Bildfolgezeit, ersetzt werden; siehe Tab. 3 für die technischen Details der Kameras. Mit der Bildfolgezeit von weniger als 2 Sekunden sind seitdem photogrammetrische Bildflüge

(60%-Längsüberlappung) mit Bodenaufösungen von 11–15 cm möglich. Beide digitale Rückteile sitzen auf einem Rolleiflex 6008 Integral Kamerakörper und einem Zeiss Distagon 4/50-Objektiv. Die Digitalkamera wird über einen Laptop gesteuert, auf dem auch die Daten gespeichert werden.

Andere wichtige Komponenten von PFIFF sind das GPS-gestützte Flug-Management-System und der Navigationsrechner, der die automatische Auslösesteuerung der Kamera übernimmt. Gleichzeitig werden die Auslöseverzögerung bestimmt und Näherungswerte der äußeren Orientierung aufgezeichnet. Die Auslösesteuerung ist mit dem PPS-Signal des GPS gekoppelt, um eine optimale zeitliche Synchronisation mit dem externen geodätischen L1/L2-GPS-Empfänger zu gewährleisten. Für einen Photoflug wird das System temporär in eine Cessna 172 mit einer kleinen Bodenluke von ca. 12 cm Durchmesser eingebaut, Abb. 2 verdeutlicht das Systemdesign.

Beim Einsatz einer Digitalkamera für den Bildflug sind nicht nur die Größe des CCD-Chips von Bedeutung, sondern auch viele andere Eigenschaften der Kamera, z. B. Bildfolgezeit, Massenspeicher, Previewoption, mechanische Stabilität, zeitliche Exzentrizität, Zuverlässigkeit und die radio-

Tab. 3: Technische Parameter der Rollei DSP 104 und der Rollei db23.

	Rollei DSP 104	Rollei db23
Kamera Typ	Rolleiflex 6008 mit angekoppeltem digitalen Rückteil	Rolleiflex 6008 mit fixiertem digitalen Rückteil
Auflösung	2010×2018	3056×2032
Pixel Größe	$15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$	$12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$
Sensor [mm]	$30,15 \times 30,27$	$36,67 \times 24,38$
Farbtiefe pro Kanal	12 Bit	12 Bit
min. Bildfolgezeit	ca. 7^1 sec. (RapidShot Mode)	ca. 1.8^1 sec.
Gewicht (inkl. Kamera)	ca. 2200 g	ca. 1500 g
Anbindung an Computer	SCSI II, Apple Powerbook G3	Firewire, MS-Windows Notebook
Software	Rollei DSP 104 Vers. 2.1.5	Phase One 2.7

¹ Wert für zwei aufeinander folgende Aufnahmen, für sichere Bildfolgen in einem Streifen sind 50% zu addieren.

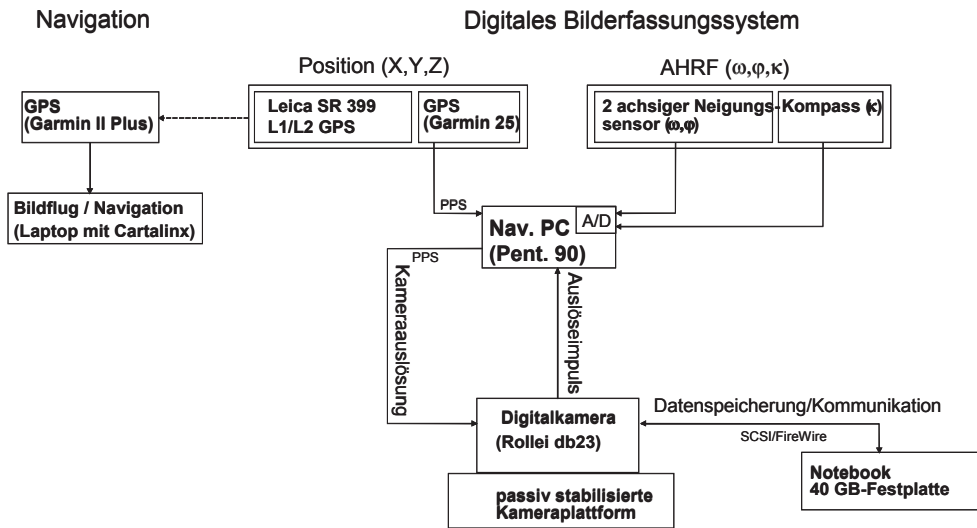


Abb. 2: Digitales low-cost Fernerkundungssystem PFIFF.

metrischen Eigenschaften. Deshalb ist die Kamera aufwendig radiometrisch und geometrisch getestet und kalibriert worden. Für die photogrammetrische Auswertung wurde die Innere Orientierung der Kamera bestimmt. Bei der DSP 104, bei der das digitale Rückteil nicht fixiert ist, war insbesondere die Hauptpunktlage variabel und musste über eine Simultankalibrierung für jeden Flug extra bestimmt werden. Mit dem fixierten digitalen Rückteil der Rollei db23 ist dieser Arbeitsschritt nicht mehr notwendig. Die Untersuchung der Linearität, der spektralen Charakteristika der RGB-Bandfilter und des Signal-Rausch-Verhältnisses verdeutlichte die Überlegenheit der digitalen Variante gegenüber einer analogen Kamera.

5 Praktische Erfahrungen mit PFIFF

Zwischen 1999 und 2003 wurden einzelne Komponenten und PFIFF als Gesamtsystem in mehr als 65 Bildflügen mit insgesamt über 7.000 Aufnahmen getestet. Der erste „photogrammetrische“ Testflug im November 2000 verdeutlichte das hohe geometrische Potential des Systems, das eine Subpixel-Genauigkeit durch die Verwendung eines hochgenauen GPS-Empfängers im Rahmen einer passpunktlosen Aerotriangula-

tion ermöglicht (GRENZDÖRFFER 2002). Um das photogrammetrische Potential von PFIFF für verschiedene Anwendungsfelder mit Bodenauflösungen von 15–70 cm zu verdeutlichen, werden im Folgenden zwei Projekte näher vorgestellt.

5.1 Beispiel 1 – Projekt Teterow

Der Block Teterow, geflogen am 14. 2. 2003 mit einer Fläche von 5,3 km × 4,3 km, bestand aus 32 Aufnahmen, die in 4 Flugstreifen aus einer Höhe von ca. 2.400 m aufgenommen wurden. Die sich daraus ergebende Bodenauflösung betrug 70 cm/Pixel. Ziel des Fluges war eine Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von PFIFF im Hinblick auf die Erfassung winterlicher Überschwemmungsereignisse (Abb. 3).

Als GPS-Referenzstation konnte auf die SAPOS-Station Güstrow zurückgegriffen werden, die ca. 30 km vom Untersuchungsgebiet entfernt lag. Dennoch konnten bei der GPS-Prozessierung die Phasenmehrdeutigkeiten problemlos gelöst werden. Zur Bestimmung der genauen Aufnahmeposition muss die Auslöseverzögerung zwischen dem Auslöseimpuls und der tatsächlichen Aufnahme berücksichtigt werden. Dazu wurde für das Projektionszentrum die registrierte

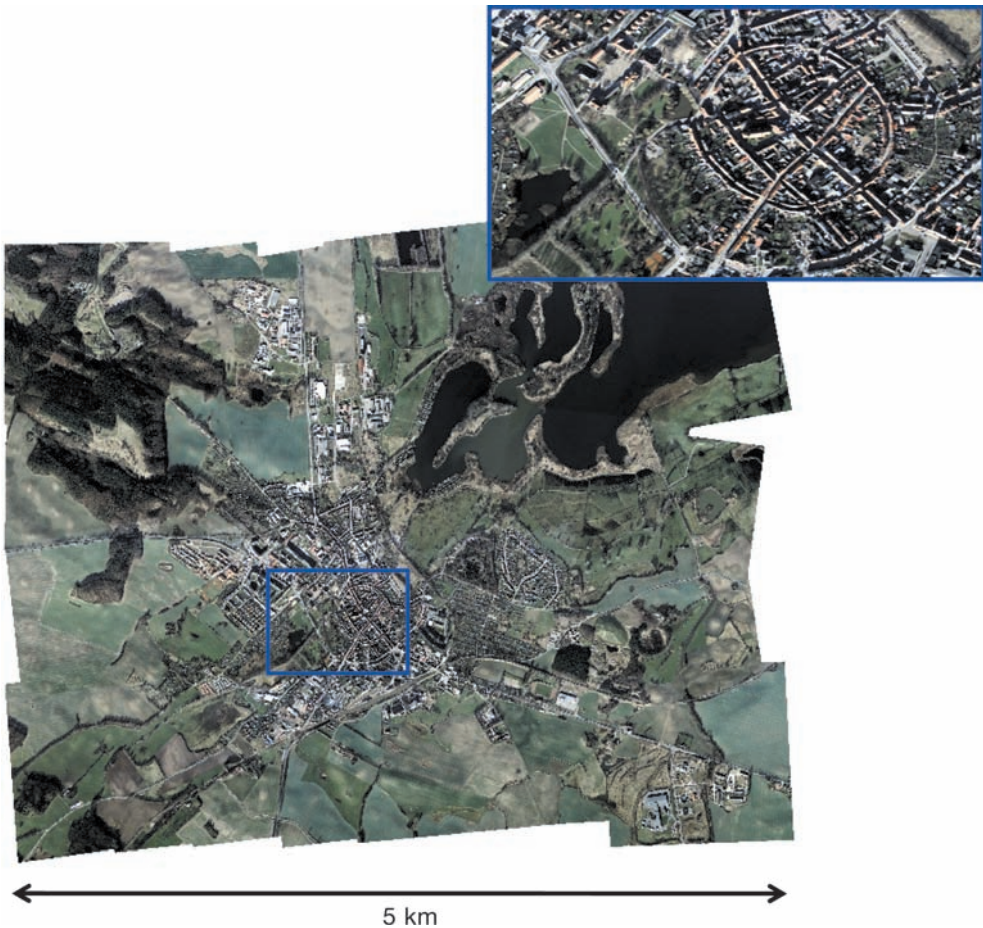


Abb. 3: Block „Teterow“, 14. 02. 02 aus 32 Bildern, Bodenauflösung 70 cm.

Auslöseverzögerung durch eine lineare Interpolation zwischen den mit 1 Hz aufgezeichneten GPS-Positionen interpoliert. Der Vektor Antenne-Kamera besteht nur aus einem Offset und kann als konstant angenommen werden, da die GPS-Antenne auf dem Dach des Flugzeugs direkt über der Kamera positioniert ist. Die Bilder wurden binnen drei Tagen nach dem Flug in der oben beschriebenen Art und Weise ohne Passpunkte mit der Software ERDAS Orthobase ortho-rectifiziert. Der arbeitsintensivste Schritt stellt die manuelle Bestimmung der initialen Verknüpfungspunkte dar. Darauf aufbauend konnten pro Bild ca. 25 weitere Verknüpfungspunkte automatisch generiert werden.

Die innere Genauigkeit des Blocks (RMS), die anhand der Verknüpfungspunkte bestimmt wird, lag bei 0,39 Pixel. Die äußere Genauigkeit wurde durch 4 Vollpasspunkte ermittelt, die zuerst als Checkpunkte in die Aerotriangulation eingeführt wurden. Die Abweichungen an diesen Punkten lag bei 0,97 m in X, 1,47 m in Y und 1,19 m in Z. Durch die anschließende Einbindung der vier Passpunkte in die Aerotriangulation konnte die absolute Lagegenauigkeit auf 0,13 m in X, 0,30 m in Y und 1,08 m in Z gesteigert werden, was eine Subpixelgenauigkeit in der Lage bedeutet. Die um den Faktor 3–4 schlechtere Höhengenaugkeit gegenüber der Lagegenauigkeit liegt auf-

grund des geringen Basisverhältnisses von 0,24 durchaus im erwarteten Rahmen.

Bei der Mosaikierung ländlicher Gebiete ist in erster Linie darauf zu achten, dass Hot-Spot-Effekte eliminiert werden, um ein radiometrisch homogenes Ergebnis des Mosaiks zu erhalten. Die Differenzen, die z. B. durch den über das DGM nicht korrigierten Lageversatz von Bäumen und Gebäuden in benachbarten Aufnahmen verursacht werden, sind gering und müssen bei der Ausgabe nicht berücksichtigt werden. Deshalb konnte eine einfache automatisierte Mosaikierung durchgeführt werden, bei der die Schnittlinien automatisch generiert und die Helligkeitsunterschiede über ein Fading ausgeglichen werden (Abb. 3).

5.2 Beispiel 2 Kühlungsborn

Bei der Bildflugplanung für Flüge mit einer hohen Bodenauflösung müssen mehrere spezielle Aspekte bedacht werden. Die Bildflüge finden in Flughöhen von 500–1000 m über Grund, d. h. insbesondere im Sommer bei starker Konvektion in turbulenten Luftschichten statt. Bei Bodenauflösungen von 11–15 cm werden die minimale Bildfolgezeit der Digitalkamera sowie die Bildbewegung bei normalen Bildfluggeschwindigkeiten von 140–200 km/h über Grund zum Problem. Ein Flug bei minimierter Fluggeschwindigkeit von 110–140 km/h entspannt zwar das Problem der Bildfolgezeit und der Bildwanderung, gleichzeitig verringert sich die Lagestabilität des Flugzeugs zusätzlich, was zu höheren Roll-, Nick- und Kursbewegungen des Flugzeugs führt. Durch das Fehlen einer aktiven Stabilisierung ist deshalb bei der Bildflugplanung eine 35–50%ige Querüberlappung einzuplanen.

Der Bildflug der Stadt Kühlungsborn erfolgte am 24. 7. 2003 bei idealem, aber turbulentem Bildflugwetter gegen 11:00 Uhr. Die Flughöhe betrug ca. 800 m, was einer Bodenauflösung von 19 cm entspricht. Bei dem Bildflug wurden 218 Aufnahmen gemacht, von denen im weiteren 187 für die Aerotriangulation verwendet wurden.

Die Auswertung der Daten erfolgte in einem ersten Schritt über eine passpunktlose

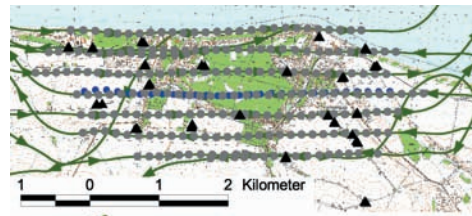


Abb. 4: Bildmittenübersicht Bildflug Kühlungsborn, (Kreise = Bildmittelpunkte, Dreiecke = Passpunkte).

Aerotriangulation. Als Ergebnis der ersten Triangulation waren Restklaffungen von 10–100 cm zwischen den Bildern durch Passpunkte zu schließen. Auf dem georeferenzierten Näherungsergebnis wurden natürliche Passpunkte im Bild gesucht und eine GPS Vermessung durchgeführt. Dabei wurden 17 Doppelpasspunkte und vier Einzelpasspunkte gemessen, um eine hohe Redundanz und damit eine möglichst hohe Genauigkeit zu erzielen (Abb. 4). Von den Passpunkten wurden 37 in die Triangulation eingeführt. Um systematische Restfehler der zeitlichen Synchronisation, GPS-Drift und Offsets durch die Datumstransformation zu kompensieren, wird bei der Aerotriangulation zusätzlich der Bildhauptpunkt Simultankalibrierung mit einer Standardabweichung von 2 μm für die Kammerkonstante und 10 μm für die Bildhauptpunktlage durchgeführt. Das Ergebnis der abschließenden Aerotriangulation unter Verwendung der Passpunkte ergab Restklaffungen (1σ) von etwa 7 cm in X, 8 cm in Y und 27 cm in der Höhe. An den 3140 Verknüpfungspunkten liegen die Restklaffungen bei 6 cm in der Lage und 28 cm in der Höhe. Der RMSE in den Bildkoordinaten liegt bei 0,33 Pixel.

Das digitale Geländemodell des Landesvermessungsamtes (DGM 25) war Grundlage für die anschließende Orthobilderzeugung. Ein Orthophotomosaik ist ein digital erstelltes Produkt, das weder ein einzelnes real aufgenommenes Foto darstellt, noch geometrisch überall einer Karte entspricht. Der Nutzer will jedoch beides: ein wunderschönes Bild auf der einen Seite und auf der anderen Seite die absolute Präzision ohne

Tab. 4: Vergleich von Bildflügen mit niedriger und hoher Bodenauflösung.

	Hohe Bodenauflösung (Pixel 12–25 cm / $h_g = 500\text{--}1000\text{ m}$)	Geringe Bodenauflösung (Pixel 40–70 cm / $h_g = 2000\text{--}3000\text{ m}$)
Bildflugplanung	Querüberlappung 35–50%	Querüberlappung 25–30%
Bildflug	<ul style="list-style-type: none"> – turbulent – Omega max. 6–10° – Kappa $\pm 25^\circ$ vom Sollkurs – Auslöseintervall am Limit – Bildwanderung kritisch 	<ul style="list-style-type: none"> – ruhig – Omega max. 3–5° – Kappa $\pm 10^\circ$ vom Sollkurs – Auslöseintervall im grünen Bereich – Bildwanderung unkritisch
Datenprozessierung	<ul style="list-style-type: none"> – Passpunkte sinnvoll – Lokale GPS-Transformationsparameter – Präzises DGM notwendig – Mosaikierung mit händischen Cutlines – Farbanpassung manuell 	<ul style="list-style-type: none"> – Passpunkte nicht notwendig – Regionale GPS-Transformationsparameter – DGM mittlerer Genauigkeit – Mosaikierung mit automatischen Cutlines – Farbanpassung automatisch
Automationsgrad	geringer	höher

sichttote Bereiche. Dies stellt, wenn die Möglichkeiten für ein automatisches „True Orthophoto“ nicht gegeben sind, insbesondere in urbanen Räumen einen Zielkonflikt dar, der nur durch Handarbeit gelöst werden kann und eine manuelle Definition von so genannten Cutlines zwischen benachbarten Bildern erfordert.

Anhand der zwei Beispiele wird deutlich, dass die Erfahrungen bei dem Bildflug und der Datenprozessierung von Aufnahmen aus 2000–3000 m Höhe nicht einfach auf Bildflüge mit Flughöhen von 500–1000 m übertragen werden können, siehe Tab. 4.

5.3 Vergleich mit der HRSC-AX Kamera

Für die Hansestadt Rostock und Umgebung wurde am 9. 4. und 10. 4. 2002 ein Bildflug mit der HRSC-AX-Kamera des DLR durchgeführt, für technische Details vgl. SCHOLTEN et al. 2001. Die Bodenauflösung des Nadirkanals betrug 16 cm. Daneben wurden von dem DLR auch ein optimiertes RGB-Mosaik mit ebenfalls 16 cm ausgeliefert. Der direkte Vergleich der beiden Aufnahmen bei gleicher Bodenauflösung zeigt z. B. an den Fahrbahnmarkierungen, dass das Bild von PFIFF schärfer und detailrei-

cher ist als die HRSC-AX-Aufnahme (Abb. 5a/b).

**Abb. 5a:** Detail PFIFF Aufnahme (01. 10. 2002), Auflösung 16 cm.**Abb. 5b:** Detail HRSC-AX Aufnahme (10. 04. 2002), Auflösung 16 cm.

Der Vergleich ist natürlich etwas verzerrt, da unterschiedliche atmosphärische Einflüsse bei der Bildaufnahme im Hinblick auf den Bildkontrast zu berücksichtigen sind. Nichtsdestotrotz sind das beobachtete höhere SNR und die bessere Point Spread Funktion bei PFIFF auch auf systematische Unterschiede zurückzuführen:

1. *Geringere Flughöhe, höherer Kontrast.* Der Bildflug mit PFIFF fand in einer Höhe von 650 m statt, verglichen 3 700 m für die HRSC. Der kontrastmindernde Einfluss der Atmosphäre nimmt mit der Flughöhe zu. Dies gilt umso mehr, sobald die Peblosphären-grenze von ca. 1 000–2000 m überschritten wird.

2. *Farbinterpolation ist besser als Kanalkombination.* Das RGB-Bild der HRSC ist ein Produkt, das aus Informationen von drei zu synchronisierenden Farbkanälen besteht, die nicht alle in der Fokalebene der nadirblickenden Optik angeordnet sind und Informationen aus unterschiedlichen Blickrichtungen liefern. Bei einer Matrixkamera hingegen wird die Farbinformation für alle Bildelemente aus der Nachbarschaft interpoliert, wobei sich die entsprechenden Algorithmen in den letzten Jahren stark verbessert haben

3. *Mehr Photonen ergeben ein besseres SNR.* Die Größe eines Bildelements der HRSC beträgt $6,5 \mu\text{m}$ mit einer sehr kurzen Integrationszeit von 0,6 ms. Demgegenüber liegt die Bildelementgröße der db23 bei $12 \mu\text{m}$ und die Integrationszeit beträgt 2 ms.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der wichtigste Aspekt beim Bildflug ist die unbedingte Zuverlässigkeit aller Systemkomponenten. Dieser Punkt steht allerdings in einem gewissen Widerspruch zu einer universitären Entwicklung, bei der immer wieder neue Komponenten hinzugefügt bzw. geändert werden. Nichtsdestotrotz hat sich PFIFF als ein zuverlässiges System für die digitale Bilderfassung bewährt. Augenblicklich stellt insbesondere für urbane Anwendungen die große Anzahl der Aufnahmen mit den damit verbundenen Datenmengen

von mehreren Gigabytes eine große Herausforderung dar, die eine rasche Prozessierung und Lieferung der Ergebnisse behindern. Der Prozess der Aerotriangulation mit oder ohne Passpunkten erfordert immer noch einen großen manuellen Arbeitsaufwand, da ein Minimum an Verknüpfungspunkten manuell identifiziert werden müssen. Für eine automatische Verknüpfung benachbarter Bilder sind Winkelinformationen mit einer Genauigkeit von besser als 0.4° in ω , φ , κ notwendig. Aus diesem Grund soll PFIFF zukünftig um ein GPS/INS in dieser Genauigkeitskategorie erweitert werden. Um insbesondere bei Bildflügen in niedrigen Höhen mit starken Turbulenzen die Querüberlappung reduzieren zu können und damit natürlich auch die notwendige Flugzeit sowie die Anzahl der Bilder steht eine aktive Stabilisierung, die den Triftwinkel kompensiert, ebenfalls auf der längerfristigen to-do Liste.

7 Literatur

- ALBERTZ, J. & KREILING, W., 1989: Photogrammetrisches Taschenbuch. – 4. Aufl., 292 S., Wichmann Verlag.
- Alphaluftbild, 2003: <http://www.alpha-luftbild.de/>
- BÄUMKER, M., BRECHTKEN, R. & HEIMES, F.-J., 1999: Direkte Georeferenzierung mit dem Luftaufnahmesystem LEO. – Internationale Geodätische Woche, Obergurgl 22. 02. 1999, 10 p.
- BUCKLEY, S.J., MILLS, J.P., CLARKE, P.J., EDWARDS, S.J., PETHIK, J. & MITSHELL, H.L., 2002: Synergy of GPS, Photogrammetry and INSAR for Coastal Zone Monitoring. – ISPRS, IGU, CIG Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa 2002, ISPRS Commission IV, WG IV/7.
- FRANKE, J. & MONTGOMERY, B., 2000: Experiences with a small format imaging system integrating airborne DGPS. – 20. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Berlin 11.–13. 10. 2000, Band 9: 245–255.
- GRENZDÖRFFER, G., 2002: Konzeption, Entwicklung und Erprobung eines digitalen integrierten flugzeuggetragenen Fernerkundungssystems für Precision Farming (PFIFF). – Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C: Vol. 552: 142 S.

- GRUBER, M., LEBERL, F. & PERKO, R., 2003: Paradigmenwechsel in der Photogrammetrie durch digitale Luftbildaufnahme? – PFG 2003 (4): 285–298.
- HINZ, A., DÖRSTEL, C. & HEIER, H., 2001: DMC – The Digital Sensor Technology of Z/I-Imaging. – In: FRITSCH, D. & SPILLER, R. (Hrsg.): Photogrammetric Week '01. – S. 93–103, Wichmann Verlag.
- HOLM, M. & RAUTAKORPI, S., 1999: Experiences of automatic creation of image mosaics and digital surface models using airborne digital camera data. – In: El-Hakim, S.F. & Gruen, A. (Eds.): Videometrics VI. – Proceedings of SPIE Vol 3641–14 (Videometrics VI, 28.–29. 1. 1999, San José, CA, USA): 139–150.
- MOSTAFA, M.M.R. & SCHWARZ, K.-P., 2000: A multi-sensor system for airborne image capture and georeferencing. – PE & RS, Vol. 66 (12): 1417–1423.
- PETRIE, G., 2003: Airborne digital frame cameras. – Geoinformatics 7, Oct./Nov. 2003, Vol. 6: 18–27.
- SCHOLTEN, F., WEWEL, F. & SUJEW, S., 2001: Einsatz digitaler Kameras im Auflösungsbereich von 5 cm–1 m – Die neue HRSC-AX Kamera-Generation in der geometrischen Analyse. – Publikation der DGPF, Band 10, 21. Wissenschaftlich Technische Jahrestagung 4.–6. 9. 2001 in Konstanz, S. 101–111.
- THOM, C. & SOUCHON, J.-P., 1999: The IGN digital camera system in progress. – In: FRITSCH, D. & SPILLER, R. (Eds.): Photogrammetric Week '99. – pp. 89–94, Wichmann Verlag.
- TOTH, C. (1999): Experiences with frame CCD arrays and direct georeferencing. – In: FRITSCH, D. & SPILLER, R. (Eds.): Photogrammetric Week'99. – pp. 95–108, Wichmann Verlag.

Anschrift des Verfassers:

Dr.-Ing. GÖRRES GRENZDÖRFFER
 Universität Rostock
 Institut für Geodäsie und Geoinformatik
 Justus-von-Liebig-Weg 6, D-18059 Rostock
 Tel.: 0381-498 2183, Fax: 0381-498 2188
 e-mail:
 goerres.grenzdorffer@auf.uni-rostock.de

Manuskript eingereicht: November 2003

Angenommen: Januar 2004