

## Direkte Georeferenzierung von Bildern eines unbemannten Luftfahrzeuges mit LowCost-Sensoren



Philipp Glira, Christian Briese, Norbert Pfeifer, Wien

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

### Kurzfassung

Unbemannte Luftfahrzeuge können mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Bordsensoren ausgestattet werden. Dazu zählen typischerweise ein GNSS-Empfänger, eine inertielle Messeinheit, ein Magnetometer und ein Luftdrucksensor. Diese Sensoren dienen dazu, den Piloten bei seiner Flugmission zu unterstützen und ermöglichen die Durchführung von autonomen Flügen. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass diese Sensoren außerdem dazu verwendet werden können, um Bilder einer Kamera direkt zu georeferenzieren. Darunter versteht man die direkte Bestimmung (d.h. ohne Nutzung des Bildinhaltes) der Position (drei Koordinaten) und der Orientierung (drei Drehwinkel) der Kamera zum Aufnahmezeitpunkt der Bilder. Die Einführung dieser Beobachtungen in die Bündelblockausgleichung (integrierte Sensororientierung) vermeidet weitgehend Deformationen des Bildblockes, wie sie bei der Nutzung von nur wenigen Passpunkten auftreten können.

Als Flugplattform wurde ein Multikopter, basierend auf der *MikroKopter*-Plattform, eingesetzt. Die Flugplattform ist als offenes System konzipiert und erlaubt somit Modifikationen, welche die Aufzeichnung der Sensorrohdaten und deren Synchronisation mit der Kamera möglich machten.

Normalerweise werden für die direkte Georeferenzierung von Luftbildern nur der GNSS-Empfänger und die Sensoren der inertialen Messeinheit verwendet. Die in unbemannten Luftfahrzeugen typischerweise dafür eingesetzten MEMS-Sensoren zeichnen sich zwar durch ein geringes Gewicht aus, liefern aber nur eine geringe Messgenauigkeit. Daher ist die Erweiterung von GNSS und inertialer Messeinheit mit einem Magnetometer und einem Luftdrucksensor notwendig. Durch die Integration aller Sensoren zu einem Gesamtsystem kann damit die Genauigkeit der Positions- und Orientierungsbestimmung entscheidend verbessert werden.

Die Evaluierung der vorgeschlagenen Methode zeigt, dass die Position der Bilder mit einer Präzision von ca. 0.5 m (Lage) bzw. 1.0 m (Höhe) bestimmt werden kann. Die Orientierungswinkel können mit einer Präzision von ca. 1° (Roll und Nick) und 2° (Gier) bestimmt werden. Es kamen dazu ausschließlich die zur Flugsteuerung bereits vorhandenen Bordsensoren zum Einsatz.

**Schlüsselwörter:** Unbemannte Luftfahrzeuge, direkte Georeferenzierung, Orientierung, GNSS, IMU

### Abstract

Unmanned aerial vehicles (UAV) can be equipped with a large variety of different on-board sensors. The typical UAV setup consists of a GNSS antenna with a receiver, an inertial measurement unit (IMU), a magnetometer and an air pressure sensor. These sensors allow to assist the pilot on the ground and to carry out autonomous flights. This article demonstrates that these sensors can be additionally used to directly georeference the imagery taken from the UAV platform. This results in the estimation of the position (three coordinates) and orientation (three rotation angles) of the images without the usage of the image content. The integration of these observations into a bundle block adjustment (integrated sensor orientation) avoids a deformation of the image block, as it can occur if only few control points were used.

Within the practical examples, a multi-rotor system based on the *MikroKopter* platform was utilized. The open source character of the project allowed some minor code modification that allowed recording the raw sensor data and made the synchronisation with the camera trigger signal possible.

The direct georeferencing of aerial images is typically just based on GNSS and IMU observations. Due to the low measurement quality of the utilized MEMS sensors, the additional usage of a magnetometer and an air pressure sensor is essential to support the GNSS and IMU observations. By the integration of the observations of all sensors a significant increase of accuracy and reliability of the determined positions and orientations can be achieved.

The evaluation of the proposed method shows that the estimated position of the image can be determined with a precession of approx. 0.5 m (planar) and 1 m (height). The rotation angles can be determined with a precision of approx. 1° (roll and nick) and 2° (yaw). The direct georeferencing of the images of this practical test is just based on the sensor equipment that is already available on-board of the *MikroKopter* platform.

**Keywords:** Unmanned aerial vehicles, direct georeferencing, orientation, GNSS, IMU

## 1. Einleitung

Unbemannte Luftfahrzeuge (*unmanned aerial vehicles – UAV*) stellen für die Aufnahme von kleinräumigen Gebieten eine kostengünstige Alternative zur klassischen bemannten Luftbild-photogrammetrie dar.

Der Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen als Kameraträger für Luftaufnahmen im Nahbereich, begann bereits Ende der 70er-Jahre (Przybilla und Wester-Ebbinghaus, 1979) (Heckes, 1984). Dem routinemäßigen Einsatz standen damals noch Navigationsprobleme entgegen, die eine lückenlose Erfassung des aufzunehmenden Gebietes erschwerten. Zur Lösung dieses Problems, schlug Heckes damals vor: „Abhilfe würden im Flugkörper eingebaute elektronische Systeme bringen, die dem Piloten Informationen über die Position des Kameraträgers übermitteln (...)“. Diese Vision konnte dank der seitdem stattgefundenen Entwicklungen realisiert werden, wovon in diesem Kontext als am Wichtigsten zu nennen sind:

- (a) die Miniaturisierung von Sensoren,
- (b) der Aufbau von globalen Navigationssystemen,
- (c) die Entwicklung digitaler Kameras.

Die damals festgehaltene Navigationsproblematik konnte durch die Entwicklungen (a) und (b) gelöst werden. In Verbindung mit Entwicklung (c) genügen unbemannte Luftfahrzeuge heutzutage nahezu allen photogrammetrischen Anforderungen, sodass deren Einsatz in den letzten Jahren einen starken Aufschwung erlebt.

Das gegenwärtige Spektrum an potentiellen Aufnahmeplattformen ist sehr breit. Die verfügbaren Systeme unterscheiden sich stark in Bezug auf die mögliche Nutzlast, die max. Flugdauer, die max. und min. Flughöhe, die max. Reichweite, die Manövrierfähigkeit, die Fluggeschwindigkeit, den Start- und Landemodus, den automatisierten Flugmodus, die Transportfähigkeit, dem Windverhalten, den Vibrationen und natürlich die Kosten (UVS-International, 2013) (Eisenbeiss, 2009). Für photogrammetrische Aufnahmen werden überwiegend zwei Plattformarten eingesetzt: Flächenflieger und Multikopter. Flächenflieger fliegen verhältnismäßig schnell und hoch, womit sie sich für die Aufnahme großräumiger Gebiete (einige 100 m) sehr gut eignen. Dem gegenübergestellt fliegen Multikopter verhältnismäßig langsam und niedrig, sind sehr wendig und ermöglichen es typischerweise die Kamera an einer beliebigen Position in beliebige Richtungen zu schwenken. Damit ist nicht nur eine präzi-

sere Aufnahme kleinräumiger Gebiete möglich, sondern auch die von stark dreidimensionalen Objekten, wie etwa Gebäuden.

Von wichtigem Nutzen für die Photogrammetrie, ist die oft bereits vorhandene Ausstattung von unbemannten Luftfahrzeugen mit diversen Bordsensoren. Da die meisten unbemannten Luftfahrzeuge nur eine geringe Nutzlast erlauben, sind diese vorwiegend in MEMS-Technologie gefertigt (Micro-Electro-Mechanical Systems). Im Vergleich zu Sensoren bemannter Aufnahmeplattformen, verfügen sie daher nur über eine geringe Messgenauigkeit. In ihrer Minimalkonfiguration besteht die Bordsensorik typischerweise aus einem GNSS-Empfänger, einer inertialen Messeinheit (*Inertial Measurement Unit – IMU*), ein Magnetometer und einem Luftdrucksensor. Diese Sensoren schaffen die Voraussetzung zur Durchführung automatischer Flüge. Bei diesen werden im Zuge einer Flugplanung Wegpunkte definiert, die während der Bilderfassung sequentiell angeflogen werden. Bei Erreichen eines Wegpunktes ist die gezielte Auslösung der Kamera möglich, womit eine lückenlose Erfassung des aufzunehmenden Objekts gewährleistet werden kann. Ergänzende Aufnahmen zwischen diesen Punkten können zu einer weiteren Vervollständigung der Datenerfassung genutzt werden.

Die bereits vorhandene Bordsensorik kann aber auch dazu verwendet werden, die aufgenommenen Bilder direkt zu georeferenzieren. Darunter versteht man die direkte Bestimmung (d.h. ohne Nutzung des Bildinhaltes) von Position (Koordinaten X, Y und Z) und Orientierung (Drehwinkel Roll, Nick und Gier) der Kamera zum Aufnahmezeitpunkt der Bilder unter ausschließlicher Nutzung von Sensoren an Bord der Aufnahmeplattform.

Die bestimmten Positionen und Orientierungen der Bilder werden in die Bündelblockausgleichung auf zwei Arten eingeführt:

1. als Näherungen für die Parameter
2. als beobachtete Parameter unter Berücksichtigung ihrer Genauigkeit (integrierte Sensororientierung) (Kraus, 1996)

Trotz der moderaten Genauigkeit, mit der die Positionen und die Orientierungen bestimmt werden können, ist der zweite Punkt für die Bündelblockausgleichung von essentieller Bedeutung: Die Berücksichtigung als beobachtete Parameter, führt zu einer Stabilisierung des gesamten Bildblockes. Damit können Deformationen, wie sie in SfM-Ansätzen (*Structure from*

*Motion*) unter Nutzung nur weniger Passpunkte auftreten (Kraus, 2004), weitgehend vermieden werden. Ausdrücklich soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass das Ziel dieses Beitrages daher nicht die direkte Bestimmung von Objektpunkten (über Vorwärtsschnitt) ist, sondern die Beschaffung von Beobachtungen für die Bündelblockausgleichung, um eben derartigen Deformationen entgegenwirken zu können.

Der vorliegende Artikel versucht v.a. auf die folgenden beiden Fragen näher einzugehen:

1. Wie können die Bordsensoren zur direkten Georeferenzierung von Bildern genutzt werden?
2. Wie genau sind die damit geschätzten Positionen und Orientierungen der Bilder?

Im folgenden Abschnitt 1.1 werden verwandte Arbeiten zum Thema der Georeferenzierung von Bilddaten mit unbemannten Luftfahrzeugen vorgestellt.

Kap. 2 liefert einen Überblick zum eingesetzten Fluggerät. Darin werden die zur Verfügung stehenden Bordsensoren, sowie die eingesetzte Kamera und deren Kalibrierung beschrieben.

Kap. 3 beschreibt das Verfahren der direkten Georeferenzierung und die dazu eingesetzte Methode, bei der es sich um eine modifizierte Version der Strapdown-Rechnung handelt.

Kap. 4 enthält die Evaluierung der vorgestellten Methode. Diese erfolgt durch Vergleich der direkten Georeferenzierung mit der über Passpunkten durchgeführten indirekten Georeferenzierung der Bilder.

Kap. 5 liefert eine Zusammenfassung des Beitrags.

## 1.1 Forschungsstand

In ähnlichen Untersuchungen mit unbemannten Luftfahrzeugen, wurde bisher nur die Position mit Hilfe von Bordsensoren bestimmt, jedoch nicht die Orientierung der Aufnahmeplattform.

In H. Eisenbeiss u. Kolb (2009) wurde zur Ermittlung der Positionierungsgenauigkeit ein Rundprisma an einem unbemannten Helikopter (*SurveyCopter 1B*) montiert. Während des Fluges wurde dessen Position von einem zielverfolgenden Tachymeter (für eine unabhängige Trajektorienbestimmung) bestimmt. Die Positionsbestimmung mit Bordsensoren erfolgte durch die Integration von GNSS und inertialer Messeinheit in einem Kalman-Filter. Die aus dem Trajektorienvergleich ermittelten Präzisionen der

Positionskoordinaten sind 0.70 m für x, 0.40 m für y und 0.20 m für z. Der im Verhältnis größere Fehler in x-Richtung, wurde einem Synchronisationsfehler zugeschrieben. Die systematischen Fehler betragen bis zu 2 m.

In Bláha u. a. (2011) wurde für die Ermittlung der Referenztrajektorie ebenfalls ein Tachymeter eingesetzt. Für den Vergleich wurden die GNSS-Messungen im *post processing* mittels differentiellem GNSS ausgewertet. Dadurch konnte die Trajektorie mit einer Präzision von 0.35 m, 0.28 m und 0.38 m in x, y und z bestimmt werden. Die systematischen Fehler betragen für alle drei Koordinatenrichtungen etwa 0.40 m. Auch in dieser Studie wurde ein Multikopter eingesetzt (*AscTec Falcon 8*).

In Haala u. a. (2011) wurde ebenfalls nur die Position der Bilder mit Hilfe des GNSS-Empfängers bestimmt. Wie im vorliegenden Bericht werden die Präzisionen der Positionskoordinaten durch Gegenüberstellung mit einer Bündelblockausgleichung bestimmt; diese betragen 3.11 m für x/y, und 3.24 m für z. Ein Grund für die im Vergleich zu den obigen Untersuchungen schlechtere Präzision der Positionsbestimmung, könnte der Einsatz eines (im Vergleich zu Helikoptern bzw. Multikoptern) schnellen Flächenfliegers sein.

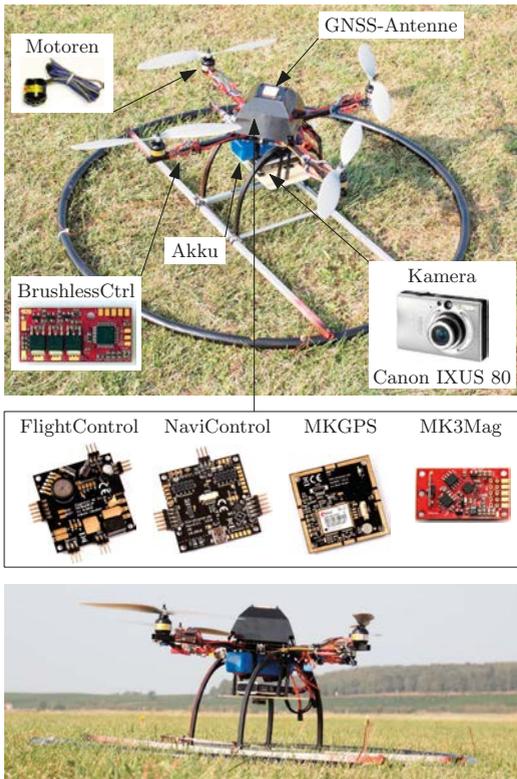
In Cramer u. a. (2013) wurden die GNSS-Rohdaten im *post processing* mittels differentiellem GNSS ausgewertet. Als GNSS-Empfänger kam dabei ein *u-blox LEA-6t* Modul zum Einsatz. Auch hier wurden die Positionskoordinaten mit den Werten der Bündelblockausgleichung verglichen. Dabei konnte eine Präzision der Positionskoordinaten von etwa 0.50 m in allen drei Koordinatenrichtungen festgestellt werden. Die systematischen Fehler betragen bis zu 6 m und waren stark flugstreifenabhängig; der Grund hierfür konnte nicht eindeutig festgestellt werden.

## 2. Das Fluggerät

### 2.1 Allgemeines

Die vorliegende Untersuchung wurden mit einem kostengünstigen unbemannten Helikopter, dem *MikroKopter*, durchgeführt (Abb. 1) (Busker u. Buss, 2013) (Briese u. Glira, 2011). Aufgrund seines Konstruktionsprinzips lässt sich der *MikroKopter* den sogenannten Multikoptern zuordnen. Diese zeichnen sich durch eine Anordnung von mehreren Rotoren in einer Horizontalebene aus. Die senkrecht nach unten wirkenden Rotoren erzeugen einen Auftrieb, der es erlaubt das Fluggerät senkrecht zu starten und zu landen. Während des Fluges wird die Rotorebene mit

Hilfe der Bordsensorik kontinuierlich horizontalisiert, womit das Fluggerät – Windstille vorausgesetzt – seine Lage beibehält. Um Vortrieb zu erzeugen wird die Rotorebene geneigt. Derartig konstruierte Fluggeräte sind, im Vergleich zu üblichen Helikoptern, für den Laien leichter manövrierbar und weisen eine geringere Absturzgefahr auf. Diese lässt sich noch weiter reduzieren, indem redundante Rotoren eingesetzt werden, z.B. statt nur vier Rotoren (Quadrokopter), sechs (Hexakopter) oder acht Rotoren (Oktokopter). Auch beim Ausfall eines Rotors ist somit noch eine sichere Landung des Fluggerätes möglich.



**Abb. 1:** Der MikroKopter mit Kennzeichnung seiner wichtigsten Komponenten. In mittleren Teil sind die vier Platinen dargestellt, deren Sensoren für die direkte Georeferenzierung der Bilder verwendet wurden.

Der MikroKopter ist eines von mehreren am Markt erhältlichen Open-Source-Flugsystemen. *Open Source* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der zur Steuerung eingesetzte Quelltext (zumindest teilweise) offen ist, womit für diese Systeme die Erstellung von unzähligen software- und hardwareseitigen Erweiterungen möglich wird. Eine Vergleichstabelle der derzeit am Markt erhältlichen Open-Source-Flugsysteme findet man unter [www.multicopter.org](http://www.multicopter.org).

## 2.2 Die Sensoren

Der MikroKopter verfügt auf insgesamt vier Platinen (Abb. 1) über eine Vielzahl an bordseitigen Sensoren. Für die direkte Georeferenzierung von Bildern können davon genutzt werden:

- (1) ein GNSS-Empfänger (*u-blox LEA-6s*)
- (2) eine inertielle Messeinheit bestehend aus:
  - 3 Beschleunigungssensoren (*STMicroelectronics LIS344ALH*)
  - 3 Drehratensensoren (*Analog Devices ADXR5610*)
- (3) ein Magnetometer (*Philips KMZ51*)
- (4) ein Luftdrucksensor (*Freescale MPX 4115A*)

Üblicherweise werden in der Photogrammetrie zum Zwecke der direkten Georeferenzierung nur der GNSS-Empfänger und die Sensoren der inertialen Messeinheit verwendet. Handelt es sich aber, wie in diesem Fall, um sehr kostengünstige Sensoren, wird die Erweiterung mit ein Magnetometer und einem Luftdrucksensor notwendig. Bei Integration aller Sensoren zu einem Gesamtsystem, kann damit die Genauigkeit der Positions- und Orientierungsbestimmung entscheidend verbessert werden.

Beim DGPS-Empfänger (1) wird die Positionierungsgenauigkeit durch den Empfang von EGNOS-Korrekturdaten auf 1 bis 3m erhöht.

Die inertielle Messeinheit (2) setzt sich aus jeweils drei orthogonal zueinander angeordneten Drehratensensoren und Beschleunigungssensoren zusammen. Diese werden in Multikoptern ausschließlich zur Orientierungsbestimmung der Flugplattform eingesetzt. Für eine Anwendung der Trägheitsnavigation, zur Bestimmung von Positionsänderungen zwischen den GNSS-Realisierungen, liefern diese Sensoren eine zu geringe Genauigkeit (Kap. 3.2.1).

Die Orientierungsbestimmung kann durch die Kopplung mit ein Magnetometer (3) verbessert werden. Das Magnetometer misst die magnetische Flussdichte des Erdmagnetfeldes entlang dreier Koordinatenachsen, woraus das magnetische Azimut abgeleitet werden kann. Mit der über GNSS bestimmten Position kann dieses in ein geodätisches Azimut überführt werden.

Die Höhenkomponente der mit GNSS bestimmten Position kann durch die Kopplung mit einem Luftdrucksensor (4) verbessert werden. Aus den gemessenen Luftdruckänderungen kann über die barometrische Höhenformel eine Änderung der Flughöhe bestimmt werden.

Das Aufzeichnen der originären Messwerte (Rohdaten) der Sensoren ist in der ausgelieferten Version des *MikroKopters* nicht vorgesehen. Aufgrund des Open-Source-Charakters des Projekts konnten jedoch Modifikationen am Quelltext vorgenommen werden, durch die eine Aufzeichnung der Rohdaten für die Sensoren (2), (3) und (4) mit einer Messfrequenz von 20 Hz möglich wurde. Für den GNSS-Empfänger (1) ist dies nicht gelungen, womit auch keine Basislinienauswertung im post processing möglich war. Stattdessen musste auf die bereits vorhandene Ausgabe der Positionen in einer Messfrequenz von 2 Hz zurückgegriffen werden.

Bei den hier beschriebenen Sensoren handelt es sich um sogenannte MEMS (El-Sheimy, 2009). In Relation zu Makrosensoren, weisen Sensoren in MEMS-Bauweise ein geringes Signal/Rausch-Verhältnis auf; zudem unterliegt der Nullpunkt der Messwertausgabe in der Regel einer starken Drift. In Summe führt das zu einer vergleichsweise geringen Messgenauigkeit.

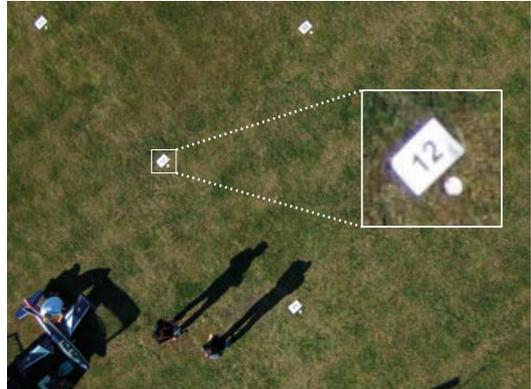
### 2.3 Die Kamera

Aufgrund ihres geringen Gewichts, wurde als bildgebender Sensor die Kompaktkamera *Canon IXUS 80* gewählt. Diese verfügt u.a. über einen CCD-Sensor mit 8 Megapixel und ein 3-faches optisches Zoomobjektiv mit Bildstabilisator. In Hinblick auf einen photogrammetrischen Flugeinsatz, ist vor allem die Kompatibilität der Kamera zum *Canon Hack Development Kit*<sup>1)</sup> wichtig. Dieses erweitert die Firmware der Kamera mit unzähligen Funktionen, von denen die Folgenden am wichtigsten sind:

- Speicherung des Bildsensorinhaltes im RAW-Dateiformat.
- Manuell einstellbare Belichtungszeit, Blendenwert, Fokusdistanz und ISO-Wert.
- Fernauslösung der Kamera über den Sender des Flugmodells oder andere Quellen.
- Wiederholte Kameraauslösung mit definierbarem Zeitintervall.

Die in diesem Experiment eingesetzte Kamerahalterung ist fest mit dem Rahmen der Flugplattform verbunden und erlaubt nur Aufnahmen in Nadir-Richtung, d.h. die Kamera kann nicht unabhängig von der Plattformorientierung geneigt werden. Die zu bestimmenden Verdrehungen (*misalignment*) zwischen der Kamera und der inertialen Messeinheit sind somit zeitlich konstant. Um die Schärfe der Bilder zu erhöhen, wurden die Verbindungen zwischen Kamerahalterung

und Flugkörper vibrationsgedämpft ausgeführt. Das Objektiv der Kamera wurde direkt unter dem GNSS-Modul platziert, sodass beim *lever-arm* der *boresight alignment* (Kap. 3) nur die Höhendifferenz zum Phasenzentrum der Antenne berücksichtigt werden muss.



**Abb. 2:** Beispiel eines aufgenommenen Bildes bei einer Flughöhe von etwa 25 m. Die Belichtungszeit beträgt 1/1000 s. Die Vergrößerung zeigt einen für die Evaluierung vermarkten Passpunkt.

Die Auslösung der Kamera erfolgt über ein mit dem *MikroKopter* verbundenes Kabel. Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Quelltextmodifikationen am *MikroKopter*, ermöglichen die Festlegung eines beliebigen Aufnahmeintervalls, sowie die für die Synchronisation mit den Sensordaten notwendige Registrierung der Aufnahmezeitpunkte der Bilder. In Abb. 2 ist ein Beispielbild dargestellt.

#### 2.3.1 Kamerakalibrierung

Die Kamera wurde mit Hilfe eines 3D-Testfeldes kalibriert. Dieses besteht aus 60 retroreflektierenden Passpunkten, deren Position mit einer Genauigkeit von 1 mm bekannt ist. Insgesamt wurden 36 Aufnahmen dieses Testfeldes gemacht. Die Bestimmung der Kalibrierungsparameter (Elemente der inneren Orientierung und Verzeichnungsparameter) erfolgte im Zuge einer Bündelblockausgleichung. Hierzu wurden in der Ausgleichung die zu bestimmenden Kalibrierungsparameter als freie Parameter behandelt. Die gemessenen Bildpunkte liefern die, für die Parameterbestimmung notwendigen, Beobachtungen.

In früheren Arbeiten (Kienast, 2006) wurde eine Instabilität der Kalibrierungsparameter in Abhängigkeit der Wirkungsrichtung der Gravitationskraft festgestellt. Daher wurde auch dieser Aspekt untersucht. Dazu wurde die Kamera, zwischen jeweils zwei Aufnahmen des Testfeldes, in

1) <http://chdk.wikia.com>

90°-Schritten um die horizontale Aufnahmeachse gedreht. Insgesamt wurden so, in jeder Winkelstellung (0°, 90°, 180°, 270°), neun Aufnahmen gemacht.

Die für die Kamerakonstante  $c$  und den Bildhauptpunktskoordinaten  $x_0$  und  $y_0$  ermittelten Werte sind in Tab. 1 dargestellt. Eine signifikante Abhängigkeit der geschätzten Parameter von der Wirkungsrichtung der Gravitationskraft konnte nicht festgestellt werden.

	Wert	$\sigma$
$x_0$ [px]	1284.58	0.79
$y_0$ [px]	-941.22	0.64
$c$ [px]	2786.03	1.60

Tab. 1: Ergebnisse der Kamerakalibrierung. Der Bildhauptpunkt  $H$  ist durch seine Koordinaten  $x_0$  und  $y_0$  beschrieben (siehe auch Abb. 4). Die Kamerakonstante  $c$  beschreibt den senkrechten Abstand des Projektionszentrums von der Bildebene.

Die Residuen der Bildkoordinaten haben eine Standardabweichung von 0.2 px. Der ebenfalls bestimmte Effekt der radialen und tangentialen Verzerrung ist in Abb. 3 dargestellt.

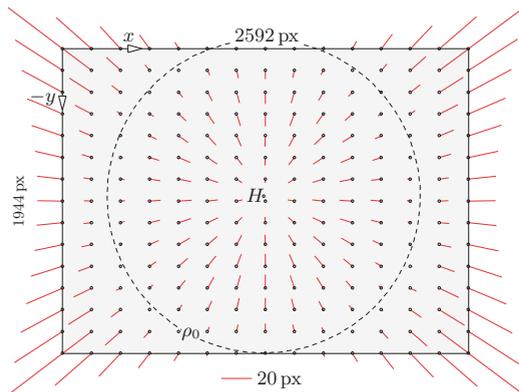


Abb. 3: Wirkungsfigur der radialen und tangentialen Verzerrung für die eingesetzte Kamera Canon IXUS 80 in 10-facher Skalierung ( $H$ ...Bildhauptpunkt, Normalisierungsradius  $\rho_0 = 1000$  px)

### 3. Direkte Georeferenzierung

#### 3.1 Allgemeines

Als direkte Georeferenzierung bezeichnet man die direkte Messung von Position und Orientierung (Elemente der äußeren Orientierung) der Kamera unter ausschließlicher Nutzung von Bordsensoren der Aufnahmeplattform.

Die Position bezieht sich auf das Projektionszentrum der Kamera und wird, als Koordinaten-triplet  $(X_0^n, Y_0^n, Z_0^n)$ , in einem übergeordneten Koordinatensystem, dem Navigationskoordinatensystem (Hochindex  $n$ ), angegeben (Abb. 4). Die Orientierung beschreibt die Verdrehung der Kamera bezüglich des Navigationskoordinatensystems und kann in Form dreier eulerscher Winkel angegeben werden. In der Navigation verwendet man dazu üblicherweise die Winkel Roll, Nick und Gier ( $r_0^n, n_0^n, g_0^n$ ) (engl. roll, pitch, yaw). Der zeitliche Bezug von Position und Orientierung ist der Belichtungszeitpunkt der Bilder.

natensystem (Hochindex  $n$ ), angegeben (Abb. 4). Die Orientierung beschreibt die Verdrehung der Kamera bezüglich des Navigationskoordinatensystems und kann in Form dreier eulerscher Winkel angegeben werden. In der Navigation verwendet man dazu üblicherweise die Winkel Roll, Nick und Gier ( $r_0^n, n_0^n, g_0^n$ ) (engl. roll, pitch, yaw). Der zeitliche Bezug von Position und Orientierung ist der Belichtungszeitpunkt der Bilder.

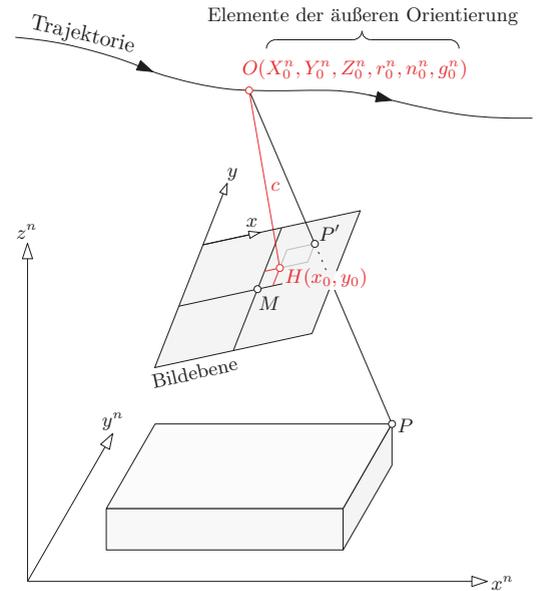


Abb. 4: Bei der direkten Georeferenzierung werden die Elemente der äußeren Orientierung mit Sensoren an Bord der Flugplattform bestimmt. Diese beschreiben Position und Orientierung der Kamera zum Zeitpunkt der Bildaufnahme.

Gemeinsam mit den Elementen der inneren Orientierung ( $c, x_0, y_0$ ) kann damit, über die Kollinearitätsgleichungen, der photogrammetrische Abbildungsprozess von Objektpunkten  $P$  in die Bildebene  $P'$  beschrieben werden.

Bei der direkten Georeferenzierung müssen die Abstände und Verdrehungen zwischen allen Sensoren im Rahmen einer Gesamtsystemkalibrierung bestimmt werden (*boresight alignment*). Nur dann können die bestimmten Positionen und Orientierungen auf das Projektionszentrum der Kamera reduziert werden. Wegen ihrem Hebeleffekt, sind laut Cramer u. a. (2000), vor allem die sogenannten *misalignment*-Winkel kritisch, die die Verdrehung zwischen den zur Winkelbestimmung eingesetzten Sensoren und der Kamera beschreiben.

Im Gegensatz zur direkten Georeferenzierung werden bei der indirekten Georeferenzierung

die Elemente der äußeren Orientierung über die Beobachtung von Passpunkten in den Bildern bestimmt.

### 3.2 Methode

In Abb. 5 sind die eingesetzten Sensoren und deren Integration, zur Bestimmung von Position und Orientierung, schematisch dargestellt. Es wird zunächst der zeitliche Verlauf dieser Größen bestimmt. Durch Berücksichtigung des *bore-sight alignments* werden diese auf die Kamera bezogen. Die anschließende Interpolation zu den Belichtungszeitpunkten der Bilder, liefert die gesuchten Elemente der äußeren Orientierung für jedes einzelne Bild.

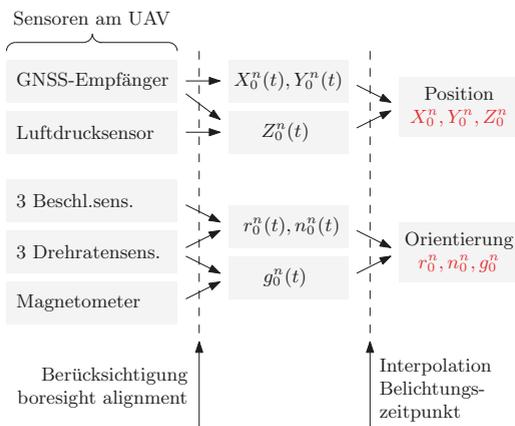


Abb. 5: Für die Positionsbestimmung wurden die Messungen des GNSS-Empfängers und des Luftsdrucksensors verwendet. Für die Orientierungsbestimmung hingegen jene der inertialen Messeinheit und des Magnetometers. Anhand der Pfeile kann erkannt werden, welche Sensormesswerte für die Parameterschätzung kombiniert wurden.

#### 3.2.1 Positionsbestimmung

Für die Positionsbestimmung wurden ausschließlich die Messdaten des GNSS-Empfängers und des Luftsdrucksensors verwendet. Die gemessenen Luftsdruckänderungen stehen in direktem Zusammenhang zur Flughöhenänderung. Dieser Zusammenhang wird durch die barometrische Höhenformel beschrieben. Die aus den Luftsdruckmessungen abgeleiteten Höhenänderungen, können daher dazu verwendet werden, um die Genauigkeit, der vom GNSS-Empfänger gemessenen Höhe, zu verbessern. Diese Verbesserung wird bereits geräteintern vorgenommen und kann daher nicht näher beschrieben werden.

Die Integration mit der inertialen Messeinheit, unter Anwendung der Trägheitsnavigation,

führte bei der Trajektorienbestimmung zu keiner Genauigkeitssteigerung. Dies lässt sich auf die geringe Messgenauigkeit, der am *MikroKopter* eingesetzten MEMS-Sensoren zurückführen. Wie bereits in (Woodman, 2007) demonstriert, konnten daher die komplementären Eigenschaften von GNSS und inertialer Messeinheit, nicht zur Verfeinerung der Trajektorie genutzt werden. (Anmerkung: diese Erkenntnis steht im Widerspruch zur Publikation von El-Sheimy (2009), bei der die Integration von GNSS und inertialer Messeinheit zu akzeptablen Ergebnissen führte.)

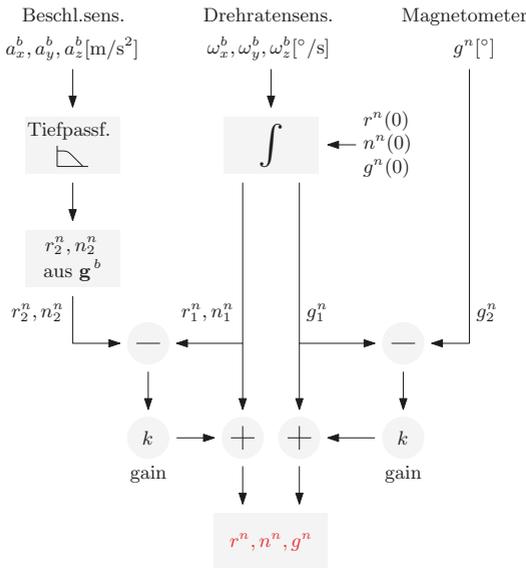
#### 3.2.2 Orientierungsbestimmung

Für die Orientierungsbestimmung wurden die Messdaten der inertialen Messeinheit und des Magnetometers verwendet (Abb. 6).

Die inertielle Messeinheit besteht aus drei jeweils orthogonal zueinander angeordneten Drehraten- und Beschleunigungssensoren. In einem körpergebundenen Koordinatensystem (*body-System* – Hochindex *b*) werden die Drehraten ( $\omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b$  -Einheit [°/s]) um den drei Achsen und die Beschleunigungen ( $a_x^b, a_y^b, a_z^b$  -Einheit [m/s<sup>2</sup>]) entlang der drei Achsen erfasst. Damit werden alle rotatorischen und translatorischen Bewegungen der Plattform bestimmt.

In der Trägheitsnavigation wird die Orientierung üblicherweise nur unter Nutzung der Drehratsensoren bestimmt: ausgehend von bekannten Initialisierungswerten ( $r^n(0), n^n(0), g^n(0)$ ) erhält man die zu bestimmende Orientierung durch die fortlaufende Integration der gemessenen Drehraten ( $\omega_x^b, \omega_y^b, \omega_z^b$ ). Aufgrund der verhältnismäßig geringen Messgenauigkeit von MEMS-Sensoren, liefert diese Integration der Drehraten bereits nach kurzer Zeit eine inakzeptable Genauigkeit (*angle random walk*) (Woodman, 2007). Daher ist es notwendig das Integral durch absolute Winkelmessungen zu stützen. Roll- und Nickwinkel können dazu im Ruhezustand der inertialen Messeinheit von den gemessenen Beschleunigungen abgeleitet werden; für den Gierwinkel ist dies nicht möglich. Dieser kann aber von den Messungen des Magnetometers abgeleitet werden, indem das gemessene magnetische Azimut in ein geodätisches Azimut – das dem Gierwinkel entspricht – umgerechnet wird.

Für die Nullpunktsbestimmung der Beschleunigungssensoren und des Magnetometers wurde ein Winkelmesstisch konstruiert, mit dem beliebige Winkelkombinationen simuliert werden können. Der konstante Anteil des Nullpunktfehlers wurde als Differenz zwischen Soll- und



**Abb. 6:** Schematischer Ablauf zur Schätzung der Orientierungswinkel Roll, Nick und Gier. Der beim Integrieren der Drehraten wachsende Fehler, wird durch Absolutwinkelbestimmungen korrigiert (Stützung). Für Roll und Nick werden diese aus den Beschleunigungen abgeleitet. Das Magnetometer liefert den für die Stützung notwendigen Gierwinkel direkt.

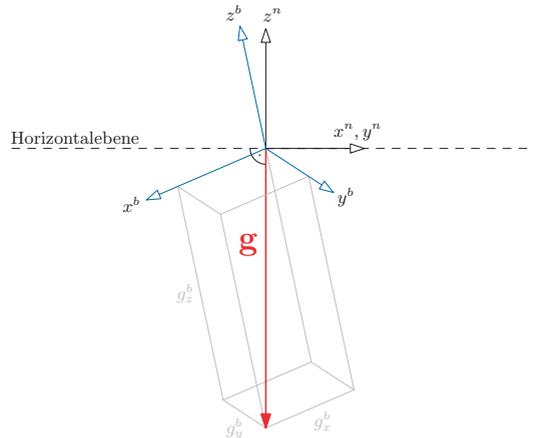
Istwinkel im Ruhezustand bestimmt. Der kleinere zeitlich variierende Anteil wurde vernachlässigt. (Eine Alternative zum Winkelmesstisch ist die Montage der inertialen Messeinheit auf einem Tachymeter.)

Die Stützung des Integrals durch Absolutwerte für Roll-, Nick- und Gierwinkel ist in Abb. 6 dargestellt. Die aus der Integration der Drehraten bestimmten Winkel, werden mit  $(r_1^n, n_1^n, g_1^n)$  bezeichnet. Der vom Magnetometer stammende Gierwinkel wurde als  $g_2^n$  bezeichnet.

Die Ableitung von Absolutwerten für Roll- und Nickwinkel  $(r_2^n, n_2^n)$  basiert darauf, dass im Ruhezustand die Beschleunigungssensoren einer inertialen Messeinheit vorwiegend den Gravitationsvektor  $\mathbf{g}$  messen (Abb. 7), m. a. W., die Beschleunigungssensoren werden als Neigungsmesser eingesetzt. Aus den gemessenen Komponenten der Gravitation  $(g_x^b, g_y^b, g_z^b)$  können die gesuchten Winkel durch Anwendung der trigonometrischen Funktionen bestimmt werden.

Dazu wird zunächst der z-Einheitsvektor des Navigationskoordinatensystems  $\mathbf{e}_{z_n}$ , ausgedrückt im körpergebundenen Koordinatensystem, berechnet:

$$\mathbf{e}_{z_n}^b = -\frac{\mathbf{g}^b}{\|\mathbf{g}^b\|} \quad (1)$$



**Abb. 7:** Die drei zueinander orthogonal angeordneten Beschleunigungssensoren messen im körpergebundenen Koordinatensystem die Komponenten der Gravitation  $\mathbf{g}$ . Daraus können die Winkel Roll und Nick abgeleitet werden.

Für die in Hofmann-Wellenhof u. a. (2003) beschriebene Parametrisierung der Rotationswinkel, erhält man daraus Roll- und Nickwinkel wie folgt:

$$n_2^n = \arcsin\left(-\frac{e_{z_n, x}^b}{g_{z_n}^b}\right) \quad (2)$$

$$r_2^n = \arcsin\left(\frac{e_{z_n, y}^b}{\cos n_2^n}\right) \quad (3)$$

Unbemannte Luftfahrzeuge – und im Speziellen unbemannte Helikopter – vibrieren während des Fluges typischerweise sehr stark. Diese Vibrationen werden von den Beschleunigungssensoren als hochfrequentes Rauschen aufgezeichnet. Aus diesem Grund ist die Anwendung eines Tiefpassfilters auf die gemessenen Beschleunigungen vor der Ableitung von Roll- und Nickwinkel unbedingt notwendig. In Crossbow (2012) wird dafür empfohlen, die Grenzfrequenz bei etwa 100 Hz oder kleiner zu wählen.

Wie in Abb. 6 ersichtlich, kann nun die Differenz zwischen den durch Integration der Drehraten bestimmten Winkel und denen, die aus den Beschleunigungen abgeleitet wurden, gebildet werden:

$$\begin{pmatrix} \Delta r^n \\ \Delta n^n \\ \Delta g^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_2^n \\ n_2^n \\ g_2^n \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} r_1^n \\ n_1^n \\ g_1^n \end{pmatrix} \quad (4)$$

Um das Integral zu stützen, kann ein – durch den Faktor  $k$  (gain) definierter – Teil dieser Differenzen zu  $r_1^n$  bzw.  $n_1^n$  addiert werden:

$$\begin{pmatrix} r^n \\ n^n \\ g^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_1^n \\ n_1^n \\ g_1^n \end{pmatrix} + k \cdot \begin{pmatrix} \Delta r^n \\ \Delta n^n \\ \Delta g^n \end{pmatrix} \tag{5}$$

Der Faktor  $k$  legt also fest, wie stark die Stützung durch die Beschleunigungssensoren sein soll. Wählt man bspw.  $k=0$ , erfolgt keine Stützung und die Werte für Roll- und Nickwinkel werden ausschließlich aus der Integration der Drehraten abgeleitet. Bei Wahl von  $k=1$  hingegen werden die Winkel nur aus den gemessenen Beschleunigungen abgeleitet. Legt man  $k$  jedoch zwischen 0 und 1 fest, können die Vorteile beider Sensoren kombiniert werden – man spricht von einer Sensorfusion. Empfehlenswert ist eine Festlegung von  $k$  sehr nahe bei Null, denn dann liefern die Drehratensensoren die kurzzeitigen Winkeländerungen, während die Beschleunigungssensoren über längere Zeiträume das Integral korrigieren. Einen Vorschlag für die Wahl von  $k$  findet man in (Crossbow 2012). Für den in dieser Studie eingesetzten Multikopter, wurde  $k=0.02$  gewählt.

Wie eingangs bereits erwähnt, kann die Neigung aus Beschleunigungen nur dann bestimmt werden, wenn sich die inertielle Messeinheit im Ruhezustand befindet. Näherungsweise trifft das bei Multikoptern dann zu, wenn sich das Fluggerät in Schwebelage (also bspw. an einem programmierten Wegpunkt) befindet oder sich nur sehr langsam bewegt. Bei hoch dynamischen Flugplattformen hingegen wird in (Wendel, 2007) vorgeschlagen, die trajektorienbedingten Beschleunigungen mit Hilfe der GNSS-Positions- und Geschwindigkeitsmessungen zu schätzen und diese dann von den gemessenen Beschleunigungen zu subtrahieren, womit nur noch der Gravitationseinfluss überbleibt. Die Stützung durch den vom Magnetometer stammenden Gierwinkel hingegen ist immer möglich, da dieser unabhängig von der Dynamik des Flugkörpers Gültigkeit hat.

## 4. Evaluierung

### 4.1 Allgemeines

Für die Evaluierung wurde ein aus 24 Punkten bestehendes Passpunktfeld in Siegendorf (Burgenland) eingerichtet (Abb. 8). Die Passpunkte ermöglichen die (von der direkten Georeferenzierung unabhängige) Bestimmung von Position und Orientierung der Bilder im Zuge einer Bündelblockausgleichung (indirekte Georeferenzierung). Aufgrund der geringen Messgenauigkeit der eingesetzten MEMS-Sensoren, können die

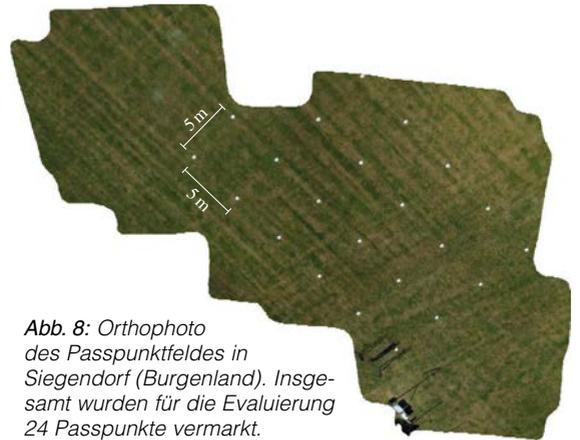


Abb. 8: Orthophoto des Passpunktfeldes in Siegendorf (Burgenland). Insgesamt wurden für die Evaluierung 24 Passpunkte vermarket.

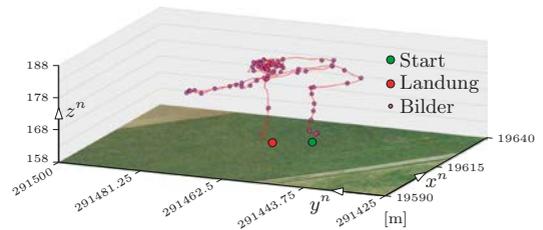


Abb. 9: Trajektorie des Evaluierungsfluges. Vermutlich wegen eines Kalibrierungsfehlers des Magnetometers wurde nur die ersten drei programmierten Wegpunkte angefliegen. Start und Landung wurden manuell vom Piloten durchgeführt.

über die Bündelblockausgleichung bestimmten Werte als Referenz für eine quantitative Beurteilung der direkten Georeferenzierung herangezogen werden.

### 4.2 Die Datenaufnahme

Die für die Aufnahme geflogene Trajektorie ist in Abb. 9 dargestellt. Die Vorgabe eines Wegpunktfluges sollte sicherstellen, dass das Passpunktfeld vollständig und mit homogener Überlappung aufgenommen wird. Der Wegpunktflug wurde aber – vermutlich wegen einer Fehlkalibrierung des Magnetometers – nach dem dritten Wegpunkt abgebrochen. Somit ist die angestrebte vollständige Erfassung nicht gelungen, wie auch an den zwei fehlenden Passpunkten in Abb. 8 erkannt werden kann. Kennwerte zum Flug sind in Tab. 2 enthalten.

Flugzeit	412 s
Anzahl direkt georef. Bilder	72
Anzahl indirekt georef. Bilder	53
Trajektorie $\Delta x^n$	34.7 m
Trajektorie $\Delta y^n$	27.4 m
max. Flughöhe	25.5 m
Belichtungszeit der Bilder	1/1000 s

Tab. 2: Kennwerte der Passpunktfeldbefliegung

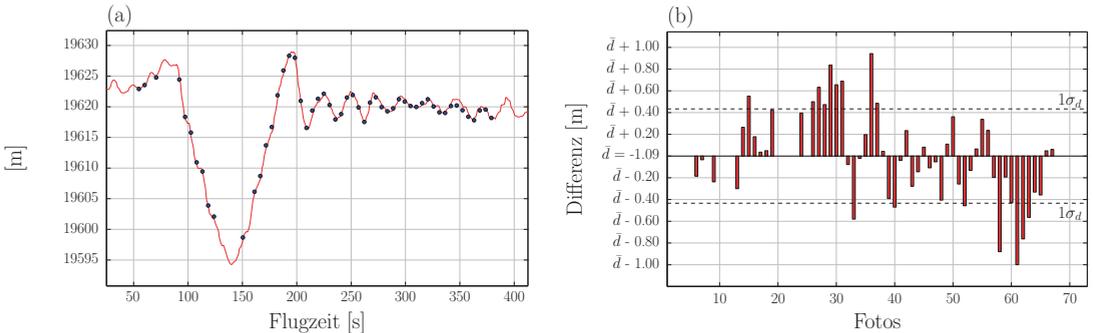


Abb. 10: (a) Zeitlicher Verlauf der X-Koordinate während des Fluges. Die rote Linie entspricht den aus der direkten Georeferenzierung bestimmten Werte. Die blauen Punkte markieren die Sollwerte aus der indirekten Georeferenzierung der Bilder. Der systematische Fehleranteil der Differenzen (Mittel) wurde hier – zwecks besserer Vergleichbarkeit – bereits korrigiert. (b) Differenzen der einzelnen Fotos bezüglich des Mittelwertes  $\bar{d}$ .

### 4.3 Gegenüberstellung von direkter und indirekter Georeferenzierung

Die, für die Bestimmung von Referenzdaten durchgeführte Bündelblockausgleichung, wurde im Programm Orpheus (Kager u.a., 2002) berechnet. Die Präzisionen der bestimmten Positionskordinaten der Bilder  $X_0^n$ ,  $Y_0^n$  und  $Z_0^n$  betragen im Mittel 2.2, 2.6 und 0.8 cm. Die Orientierungswinkel der Bilder  $r_0^n$ ,  $n_0^n$  und  $g_0^n$  haben im Mittel Präzisionen von 0.075°, 0.064° und 0.015°. Die Näherungswerte für die Ausgleichung wurden durch Anwendung des Rückwärtsschnittes nach Müller-Killian (Kraus, 2004) bestimmt. Insgesamt konnten so 53 der 72 aufgenommenen Bilder über Passpunkte indirekt georeferenziert werden. Auf eine Orientierung der restlichen 19 Bilder über Verknüpfungspunkte wurde bewusst verzichtet, da sich deren Messung in der aufgenommenen Wiese als zu unsicher erwies.

Die Abbildungen 10 und 11 zeigen exemplarisch den Verlauf von  $X_0^n$  und  $r_0^n$ . Der durch direkte Georeferenzierung ermittelte zeitliche Verlauf dieser Parameter ist in rot dargestellt. Die aus der Bündelblockausgleichung stammenden Sollwerte sind als blaue Punkte dargestellt. Für die Evaluierung der in Kap. 3.2 beschriebenen Methode, wurden die Differenzen dieser Sollwerte zum bestimmten zeitlichen Verlauf gebildet (siehe dazu auch Glira (2012), S.88-99). In Tab. 3 sind die Standardabweichung und das Mittel dieser Differenzen aufgelistet.

#### 4.3.1 Beurteilung der Positionsgenauigkeit

Die Lagekoordinaten konnten mit einer Präzision von etwa einem halben Meter bestimmt werden. Die Präzision der Höhenkoordinate ist um etwa Faktor 2 schlechter als jene der Lagekoordinaten. Dies entspricht den Erwartungen. Die Mittel der

Differenzen sind als Datumsfehler des GNSS-Empfängers zu deuten. Diese liegen innerhalb der im Datenblatt des GNSS-Empfängers angegebenen Genauigkeit von 2.5 m. Der im Mittel ebenfalls enthaltene Effekt des *boresight alignments* ist im Vergleich zum Datumsfehler sehr klein. Eine Trennung dieser Systematiken anhand der erhobenen Daten, ist aufgrund der hohen Korrelation, nicht möglich.

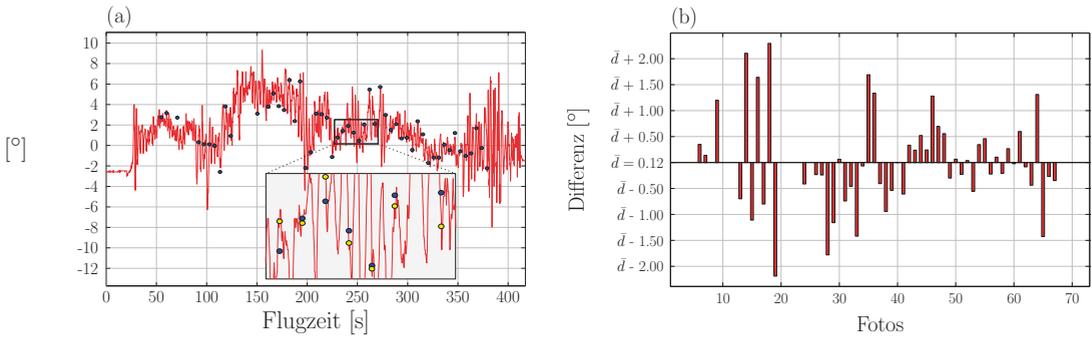
	$\sigma_d$	Mittel $\bar{d}$
$X_0^n$	0.43 m	-1.09 m
$Y_0^n$	0.57 m	0.36 m
$Z_0^n$	0.87 m	-1.40 m
$r_0^n$	0.91°	0.12°
$n_0^n$	0.94°	-1.92°
$g_0^n$	2.43°	-18.24°

Tab. 3: Standardabweichung  $\sigma$  und Mittel der Differenzen  $\bar{d}$  zwischen direkter und indirekter Georeferenzierung

#### 4.3.2 Beurteilung der Orientierungsgenauigkeit

Die Orientierungswinkel Roll und Nick konnten mit einer Präzision von etwa 1° bestimmt werden. Die signifikant schlechtere Präzision des Gierwinkels ist u.a. darauf zurückzuführen, dass das Magnetometer nur ganzzahlige Azimutwerte aufzeichnet. Die mittleren Differenzen für Roll und Nick konnten in weiteren Untersuchungen bestätigt werden und können daher als Verdrehungen des *boresight alignments* gedeutet werden. Die große mittlere Abweichung des Gierwinkels ist auf die bereits erwähnte Fehlkalibrierung des Magnetometers zurückzuführen.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Schätzung der systematischen Fehler mit Hilfe von Pass-



**Abb. 11:** (a) Zeitlicher Verlauf des Rollwinkels während des Fluges. In der Vergrößerung erkennt man die Problematik der Synchronisation: die gelben Punkte sind die ermittelten Werte der direkten Georeferenzierung. Bei starker Flugdynamik führt eine ungenaue Synchronisation mitunter zu sehr großen Fehlern, da diese Werte zu einem leicht falschen Zeitpunkt interpoliert werden (gut zu erkennen z.B. beim äußersten rechten Punkt). (b) Differenzen der einzelnen Fotos bezüglich des Mittelwertes  $\bar{d}$ .

punkten zu einer entscheidenden Verbesserung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der direkten Georeferenzierung führen. Der vollständige Verzicht auf Passpunkten ist daher – trotz direkter Georeferenzierung der Bilder – nicht zu empfehlen.

Für die eingesetzte Kamera führt ein  $1^\circ$  falscher Roll- oder Nickwinkel (bei einer typischen Flughöhe von 25 m – siehe Tab. 2) im Nadir zu einem Lageversatz von 0.43 m. Entsprechend bewirkt ein  $2^\circ$  falscher Gierwinkel einen Lageversatz von 1.30 m im Bildeck.

## 5. Zusammenfassung

Unbemannte Luftfahrzeuge stellen für die Aufnahme von kleinräumigen Gebieten eine interessante Alternative zur klassischen bemannten Luftbildphotogrammetrie dar. Sie sind kostengünstig, flexibel einsetzbar, können automatisiert fliegen und ermöglichen Aufnahmen hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung.

Aufgrund einiger guter Eigenschaften werden in der Photogrammetrie oft unbemannte Helikopter eingesetzt. Mehrere Sensoren an Bord erfüllen hier flugunterstützende Funktionen und ermöglichen zudem die autonome Befliegung des aufzunehmenden Gebiets. Diese Sensoren können aber auch dazu „missbraucht“ werden um die aufgenommenen Bilder direkt zu georeferenzieren. Darunter versteht man die Bestimmung von Position und Orientierung der Kamera zum Aufnahmezeitpunkt der Bilder.

Diese Untersuchung wurde mit einem kostengünstigen Multikopter durchgeführt, dem *Mikro-Kopter*. Die Offenlegung des Quelltextes dieses Systems erlaubte diverse Quelltextadaptionen, wodurch u.a. die Aufzeichnung der Sensorroh-

daten und deren Synchronisation mit der Kamera möglich war.

Für die direkte Georeferenzierung werden in der Regel nur Messdaten des GNSS-Empfängers und der Sensoren der inertialen Messeinheit herangezogen. Aufgrund der geringen Messgüte der eingesetzten MEMS-Sensoren, ist aber die Erweiterung mit ein Magnetometer und einem Luftdrucksensor notwendig. Durch Integration aller Sensoren zu einem Gesamtsystem kann damit die Genauigkeit der Positions- und Orientierungsbestimmung entscheidend verbessert werden. Als Kamera wurde eine handelsübliche Kompaktkamera der Fa. *Canon* eingesetzt. Die Kamerakalibrierung erfolgte mit Hilfe eines 3D-Passpunktfeldes.

Die Positionen der Bilder werden durch Integration des GNSS-Empfängers mit dem Luftdrucksensor bestimmt. Der Luftdrucksensor wird verwendet um die GNSS-Höhenkomponente zu verbessern. Diese Verbesserung wird bereits geräteintern vorgenommen.

Die Orientierungen der Bilder werden durch die Integration der Sensoren der inertialen Messeinheit und dem Magnetometer bestimmt. Die Beschleunigungssensoren und das Magnetometer liefern die zur Stützung des Drehratenintegrals notwendigen Absolutmessungen. Der Grad der Stützung kann so gewählt werden, dass die kurzzeitigen Winkeländerungen von den Drehratensensoren stammen, währenddessen die Stützung durch Absolutmessungen über längere Zeiträume erfolgt.

Die Integration der gemessenen Positionen und Orientierungen in die Bündelblockausgleichung (unter Berücksichtigung ihrer Genauigkeit) als Beobachtungen, vermeidet eine Deformation

des Bildblockes, wie sie bei der Verwendung von nur wenigen Passpunkten aufgrund unkompenzierter Systematik auftreten kann (integrierte Sensororientierung).

Die Evaluierung der vorgeschlagenen Methode erfolgte durch die Gegenüberstellung von direkter und indirekter Georeferenzierung der Bilder. Für die indirekte Georeferenzierung wurde ein Passpunktfeld eingerichtet. Während eines 412 s langen Fluges wurden 72 Bilder aufgenommen, wovon 53 indirekt georeferenziert werden konnten. Die Positionen der Bilder konnten mit einer Präzision von ca. 0.5 m (Lage) bzw. 1.0 m (Höhe) bestimmt werden. Die Orientierungen der Bilder konnten mit einer Präzision von ca. 1° (Roll und Nick) bzw. 2° (Gier) bestimmt werden. Der systematische Fehleranteil sollte mit Hilfe von wenigen Passpunkten korrigiert werden.

Zukünftige Untersuchungen sollen klären, ob und wie die erzielten Genauigkeiten verbessert werden können. Neben dem Einsatz von unbemannten Helikoptern ist auch der Einsatz von Flächenflugzeugen, zur Aufnahme von großräumigen Gebieten, geplant.

#### Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projektes PRO-SA („Hochaufgelöste Messungen der Geomorphodynamik in sich schnell verändernden proglazialen Systemen der Alpen“). Es handelt sich dabei um ein geowissenschaftliches Gemeinschaftsprojekt, das von der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft – Projektnr. BE 1118/27-1) und dem FWF (Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung – Projektnr. 1893) gefördert wird.

Das Ludwig Boltzmann Institut für Archäologische Prospektion und Virtuelle Archäologie (archpro.lbg.ac.at) basiert auf der internationalen Kooperation der Ludwig Boltzmann Gesellschaft (A), der Universität Wien (A), der Technischen Universität Wien (A), der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (A), dem Land Niederösterreich (A), Airborne Technologies GmbH (A), RGZM-Römisch-Germanisches Zentralmuseum Mainz (D), RAÄ-Swedish National Heritage Board (S), IBM VISTA Universität Birmingham (GB) und NIKU-Norwegian Institute for Cultural Heritage Research (N).

#### Literaturverzeichnis

[Bláha u. a. 2011] *Bláha, M.; Eisenbeiss, H.; Grimm, D.; Limpach, P.*: Direct Georeferencing of UAVs. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-1/C22, UAVg 2011, Conference on Unmanned Aerial Vehicle in Geomatics, Zurich, Switzerland (2011)

[Briese u. Glira 2011] *Briese, C.; Glira, P.*: Reed mapping by unmanned aerial vehicles. In: International Symposium on Advanced Methods of Monitoring Reed Habitats in Europe (2011)

[Busker u. Buss 2013] *Busker, I.; Buss, H.*: MikroKopter. www.mikrokopter.de. Version: Juli 2013

[Cramer u. a. 2013] *Cramer, M.; Haala, N.; Rothermel, M.; Leinss, B.; Fritsch, D.*: UAV- gestützte Datenerfassung für Anwendungen der Landesvermessung – das Hessigheim-Projekt. In: DGPF Tagungsband 22 / 2013 – Dreiländertagung DGPF, OVG, SGPF (2013)

[Cramer u. a. 2000] *Cramer, M.; Stallmann, D.; Haala, N.*: Direct Georeferencing Using GPS/Inertial Exterior Orientations for Photogrammetric Applications. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 33 Part B3 (2000)

[Crossbow 2012] *Crossbow*: IMU Application Note. www.xbow.com. Version: Januar 2012

[Eisenbeiss 2009] *Eisenbeiss, H.*: UAV Photogrammetry, ETH Zürich, Diss., 2009

[El-Sheimy 2009] *El-Sheimy, N.*: Emerging MEMS IMU and Its Impact on Mapping Applications. In: Photogrammetric Week 2009, 2009

[Glira 2012] *Glira, P.*: Direkte Georeferenzierung von Bildern eines unbemannten Luftfahrzeuges mit LowCost-Sensoren, Technische Universität Wien, Diplomarbeit, 2012. [http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat\\_207408.pdf](http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_207408.pdf)

[H. Eisenbeiss u. Kolb 2009] *H. Eisenbeiss, W. S.; Kolb, M.*: Genauigkeitsanalyse der 3D- Trajektorie von Mini-UAVs. In: DGPF Tagungsband 18 / 2009 (2009)

[Haala u. a. 2011] *Haala, N.; Cramer, M.; Weimer, F.; Trittler, M.*: Performance Test on UAV-based Photogrammetric Data Collection. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVIII-1/C22, Zurich, Switzerland (2011)

[Heckes 1984] *Heckes, J.*: Überblick über Flugsysteme für photogrammetrische Luftaufnahmen im Nahbereich. (1984)

[Hofmann-Wellenhof u. a. 2003] *Hofmann- Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; Collins, J.*: Navigation. Springer-Verlag Wien New York, 2003

[Kager u. a. 2002] *Kager, H.; Rottensteiner, F.; Kerschner, M.; Stadler, P.*: Orpheus 3.2.1 – User Manual. 2002

[Kienast 2006] *Kienast, J.*: Untersuchung einer relativ zum terrestrischen Laserscanner Riegl LMS- Z420i kalibrierten Kamera hinsichtlich Stabilität dieser Kalibrierung., Technische Universität Wien, Diplomarbeit, 2006

[Kraus 1996] *Kraus, K.*: Photogrammetrie Band 2: Verfeinerte Methoden und Anwendungen. Ferd. Dümmlers Verlag, 1996

[Kraus 2004] *Kraus, K.*: Photogrammetrie Band 1 – Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. deGruyter Verlag, Berlin, 2004

[Przybilla u. Wester-Ebbinghaus 1979] *Przybilla, H.-J.; Wester-Ebbinghaus, W.*: Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug. In: Bildmessung und Luftbildwesen. Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung. (1979)

[UVS-International 2013] *UVS-International*: RPAS - Remotely Piloted Aircraft Systems – The Global Perspective. Yearbook 2013/2014. 2013

[Wendel 2007] *Wendel, J.*: Integrierte Navigationssysteme – Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation. Oldenbourg Verlag München Wien, 2007

[Woodman 2007] *Woodman, O. J.*: An introduction to inertial navigation. In: Technical Report (Number 696) – University of Cambridge (Computer Laboratory) (2007)

### **Anschrift der Autoren**

**Dipl.-Ing. Philipp Glira**, Technische Universität Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsgruppe Photogrammetrie E120.7, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien.

E-Mail: philipp.glira@geo.tuwien.ac.at

**Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Briese**, Technische Universität Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsgruppe Photogrammetrie E120.7, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien.

LBI for Archaeological Prospection & Virtual Archaeology, Hohe Warte 38, A-1190 Wien.

E-Mail: christian.briese@geo.tuwien.ac.at

**Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Pfeifer**, Technische Universität Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, Forschungsgruppe Photogrammetrie E120.7, Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien.

E-Mail: norbert.pfeifer@geo.tuwien.ac.at

