

Bestimmung des photogrammetrischen Genauigkeitspotentials des Online-Systems ANTAR zur luftgestützten Verkehrsdatenerfassung

GÖRRES GRENZDÖRFFER UND SERGEY ZUEV¹

Zusammenfassung: Photogrammetrische Systeme mit GPS/INS stoßen immer mehr in Online-Anwendungen vor. Allerdings liegen die erzielten Genauigkeiten im Objektraum aus verschiedenen Gründen deutlich unter den theoretischen Möglichkeiten. In dem Beitrag werden verschiedenste Einzelfaktoren identifiziert und deren Einfluss im Rahmen von Testflügen systematisch analysiert. Durch eine konsequente Kalibrierung kann für das ANTAR-System eine deutliche Genauigkeitssteigerung erzielt werden.

1 Einleitung

Das DLR mit den Einrichtungen Verkehrsstudien, Optische Informationssysteme und dem Institut für Verkehrsforschung hat in den letzten Jahren ein Online-System zur großflächigen, detaillierten und differenzierten Erhebung von Verkehrsdaten aus der Luft entwickelt, das unter anderem im Rahmen der Fußball WM 2006 in Deutschland sehr erfolgreich eingesetzt wurde. Das Modul zur Verkehrsdatenerfassung besteht aus dem Kamerasystem ANTAR (Airborne Traffic Analyser) und der Auswertesoftware Traffic Finder für die automatisierte, echtzeitnahe Verkehrsdaten-Extraktion am Boden. Das ANTAR-System beinhaltet eine optische und eine Wärmebildkamera, sowie ein hochgenaues GPS/INS (Applanix 410) zur Online-Orientierung. Die Auswertesoftware Traffic Finder analysiert die eingehenden Bilder online und bestimmt die straßenbezogenen Verkehrsparameter (Ruhe et al, 2007). Bei der bisherigen Online-Prozessierung der ANTAR-Daten einer Dalsa 1M28 Kamera wird die äußere Orientierung durch das GPS-INS bestimmt. Die innere Orientierung der Kamera war ursprünglich weitgehend unbekannt. Bei der Online-Georeferenzierung werden einige Annahmen zur Vereinfachung der Prozessierung getroffen:

1. Es wird von einer ebenen Bezugsfläche ausgegangen. Geländeunterschiede im Bild werden nicht berücksichtigt. D.h. es wird keine Orthorektifizierung durchgeführt. Das ist bei der Aufnahme von Straßen und insbesondere Autobahnen auch eine zulässige Vereinfachung.
2. Die Mittlere Geländehöhe wird aus dem SRTM-Geländemodell abgegriffen. Die Höhen-genauigkeit des SRTM-Geländemodells von mehreren Metern führt ebenfalls zu signifikanten Lagefehlern im Objektraum. Auch hier fällt der Fehler in der Praxis nicht weiter auf, da die relative Genauigkeit zwischen benachbarten Bildern im Vordergrund steht.

¹ Dr.-Ing. G. Grenzdörffer, Universität Rostock, Institut für Management ländlicher Räume, J.-v.-Liebig Weg 6, 18059 Rostock, email: goerres.grenzdoerffer@uni-rostock.de
Dr.-Ing. S. Zuev, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Optische Informationssysteme, Rutherford Str.2, 12489 Berlin-Adlershof, email: sergey.zuev@dlr.de

Diese ist hoch solange der Fehler des DGM's bei benachbarten Bildern ähnlich ist. Zudem verringert die hohe Bildfrequenz ebenfalls den Fehler.

- Die Bore-site-Winkel sind genähert bekannt, werden jedoch nicht für jeden Flug neu bestimmt.

Die theoretische Lagegenauigkeit der GPS-INS Lösung bei der Online Prozessierung liegt bei einer Flughöhe von 500 m über Grund bei 0.13 - 0.43 m. Im Postprozessing liegt, bei einer Flughöhe von 500 m, der theoretische Erwartungswert des AN-TAR-Systems bei 0.07 - 0.13 m, d.h. deutlich im Subpixel-Bereich. Im Rahmen des Beitrags wird das tatsächlich erreichbare Genauigkeitspotential des AN-TAR-Systems anhand von zwei Testflügen indirekt bestimmt und auf die einzelnen Einflussfaktoren (innere und äußere Orientierung, Leverarm, Bore-site-winkel, DGM, Bildqualität (JPG-Komprimierung), detailliert eingegangen. Da die technischen Möglichkeiten und die Bedürfnisse für hochgenaue Online-Anwendungen, z.B. im Katastrophenschutz, Verkehrsüberwachung o.ä. stark steigen, ist eine systematische Auseinandersetzung über das erreichbare Online-Genauigkeitspotential und deren Einflußfaktoren von großer Bedeutung.

2 Problemstellung

Die Online-Genauigkeit eines des AN-TAR-Systems wird durch viele Einflussfaktoren bestimmt. In der nachfolgenden Tabelle sind die wichtigsten Faktoren aufgelistet und kurz beschrieben.

Fehlerquelle	Problem	Korrekturmöglichkeit durch Kalibrierung	Einfluss auf Systemgenauigkeit*
Innere Orientierung			
Bildhauptpunkt	Lage unbekannt	Gegeben, Voraussetzungen: gegenläufig aufgenommene Streifen, optimal zusätzliche Querstreifen	Systematischer Fehler, > 2 m (macht sich innerhalb eines Streifens nicht bemerkbar)
Brennweite	Circa Wert bekannt	Gegeben, Voraussetzungen: Hohe Reliefunterschiede im Untersuchungsgebiet oder verschiedene Flughöhen, Passpunkte; Optimal genaue Kenntnis der Lage der Projektionszentren.	Systematischer Fehler, > 2m (macht sich innerhalb eines Streifens gering bemerkbar, nimmt zum Bildrand hin zu)
Radialverzeichnung	Umfang unbekannt	Gegeben, Voraussetzungen: Konvergierende Aufnahmen, Passpunkte. Kann in Rahmen einer AT nur bedingt geschätzt werden.	Systematischer Fehler, der sich zum Rand hin stärker bemerkbar macht
Äußere Orientierung			
Zeitsynchronisation zw. GPS/INS und Framegrabber / Kamera	Der GPS/INS Zeitstempel stimmt nicht mit Auslösezeitpunkt überein	Nicht möglich	unsystematischer Fehler, der die Kalibrierung der Kamera erschwert
GPS/INS – Online vs. Postprozessing	Genauigkeitssteigerung durch Postprozessing	Gegeben durch GPS-Postprozessing mit hochgenauen Korrekturdaten	Mittel (< 1 m)

Leverarm	Schätzwert, Systematische Fehler durch Messung und unsystematische Fehler durch Vibrationen	Gegeben, Voraussetzung: Vergleich mit indirekter Bestimmung der Orientierung, Schwierigkeit: Trennung von systematischem und unsystematischem Anteil. Problem: Fehler in der inneren Orientierung wirken sich auf die Bestimmung des Leverarms aus.	Gering (5 – 20 cm)
Boresite-Winkel	Unbekannt, Systematischer Fehler	Gegeben: Voraussetzung Vergleich mit indirekter Bestimmung der Orientierungselemente. Problem: Fehler in der inneren Orientierung wirken sich auf die Bestimmung der Boresite-Winkel aus.	Mittel - Groß (< 2.5 m und 0.3°)
Externe Faktoren			
DGM	Unsystematischer Fehler, der sich in Abhängigkeit der Radialentfernung bemerkbar macht.	Nicht gegeben: da externer Fehler, Verbesserung durch Verwendung eines genaueren DGM's bzw. Orthorektifizierung	> 5 m
JPG-Komprimierung	Verringerung der Bildqualität, bzw. Problem bei automatischer Verknüpfungspunktsuche	Nicht gegeben: kann aber durch die Erhöhung der Bandbreite bzw. Einsatz neuer Funktechnik verringert werden	> 0.5 m

* Annahmen: Flug ANTAR-System in 500 m Höhe

Fazit: Der Erwartungswert für die Lagegenauigkeit der Online-Lösung des ANTAR-Systems liegt bei ca. < 6 m, da sich einige der oben genannten Fehler teilweise aufheben können bzw. nicht alle in vollem Umfang wirksam werden.

Zur Untersuchung der oben genannten möglichen Einflussfaktoren auf die Online-Genauigkeit wurden 3 Testflüge durchgeführt, von denen der Testflug in Stuttgart-Filderstadt im Nachfolgenden stellvertretend vorgestellt werden soll.

3 Testflug Filderstadt

Die Befliegung des Untersuchungsgebiets Stuttgart-Filderstadt liegt in der Nähe des Flughafens Stuttgart. Das Untersuchungsgebiet mit einer Fläche von 700 * 500 m sollte in fünf Ost-West-Streifen und zwei Querstreifen befliegen werden. Der Helikopter wird üblicher Weise vom Piloten auf Sicht navigiert und verfügt somit nicht über ein Flugführungssystem. Aus diesem Grund wurde eine Querüberlappung von 60 % gewählt. Da der Höhenunterschied in dem Gebiet nur 34 m beträgt waren zwei verschiedene Flughöhen vorgesehen, Honkavaara, E. (2004). Der Bildflug erfolgte am 21.8.2006 in zwei verschiedenen Höhen. Die Flughöhe des ersten Bildflugs betrug im Mittel 560 m über Grund (min. 500 m – max. 600 m). Während des zweiten Flugs betrug die Flughöhe im Mittel 640 m über Grund (min. 560 m – max. 690 m). Insgesamt wurde das Gebiet mit 15 Streifen abgedeckt, die GSD des 1 K * 1 K großen Sensors reichte von 0.22 bis 0.3 m. Die tatsächliche Flugroute wich teilweise beträchtlich von der Sollroute ab und die für die pho-

togrammetrische Auswertung erforderlichen systematischen Bildflugmuster konnten nicht wie geplant realisiert werden.

3.1 Genauigkeitsuntersuchung der Online-Lösung

3.1.1 Relativgenauigkeit Bild-zu-Bild

Der relative Fehler zwischen benachbarten kurz hintereinander ausgelösten Bildern (Bild-zu-Bild Genauigkeit) ist für die Berechnung der Fahrgeschwindigkeit und anderen Parametern aus der Online-Lösung weit wichtiger als die in den nachfolgenden Kapiteln intensiv diskutierte Absolutgenauigkeit des Systems. Die Relativgenauigkeit wurde anhand der aus der Online-Lösung georeferenzierten Bilder im Geotiff-Format in zwei Flugstreifen anhand natürlicher Punkte ermittelt. Dabei wurden die projizierten Koordinaten der Punkte in allen Bildern gemessen, in denen der Punkt sichtbar war. Je nach Fluggeschwindigkeit konnte ein Punkt in 26 – 40 Bildern gemessen werden. Es wurden jeweils 3 Punkte pro Flugstreifen gemessen, die sehr ähnliche Ergebnisse aufwiesen ($R^2 > 0.85$). Das ist darauf zurückzuführen, dass systematische Fehler, wie z.B. Fehler in der Inneren Orientierung, Bore-site-Winkel, fehlende Orthoentzerrung bei dieser Art der Fehlerbetrachtung weitestgehend wegfallen. Übrig bleiben unsystematische Fehler, wie z.B. Fehler in der Zeitsynchronisation, GPS/INS-Messrauschen etc., sowie die Ungenauigkeit bei der Punktbestimmung an natürlichen Punkten bei stark komprimierten Bildern. Die Werte der relativen Genauigkeit schwanken zwischen den Flugstreifen. Die Standardabweichung für den Streifen 4-2 liegt bei 1.06 m in X und 1.20 m in Y. Bei dem Streifen 5-2 liegt die Genauigkeit bei 1.19 m in X und 0.62 m in Y. Die Ursachen für den relativen Fehler und deren Unterschiede zwischen den Flugstreifen sind in den genannten unsystematischen Fehlern zu suchen (Zeitsynchronisation, GPS/INS-Messrauschen, Punktbestimmung).

3.1.2 Absolutgenauigkeit

Der mittlere absolute Fehler im Objektraum, der aus der Online-Lösung heraus georeferenzierten Bilder wurde auf zweierlei Weise bestimmt.

1. Durch einen Vergleich von 20 georeferenzierten Bildern auf denen Passpunkte sichtbar waren. Der Vergleich der in den Bildern gemessenen Lage der Passpunkte und deren wirklicher Position im Ortsraum ergibt einen Lagefehler, der alle Fehlerquellen (Innere und Äußere Orientierung, DGM ...) bei der Online-Prozessierung beinhaltet. Dabei werden die Beobachtungen für einen Passpunkt, der in mehreren Bildern zu sehen ist nicht gemittelt, sondern einzeln betrachtet. Der mittlere absolute Fehler (Standardabweichung) in x-Richtung betrug 3.51 m, in y-Richtung 2.20 m. Der mittlere Fehlervektor in xy-Richtung betrug 4.65 m.
2. Die Elemente der Äußeren Orientierung werden als feste Werte in eine passpunktlose Aerotriangulation eingeführt. Die Fehler treten an den als Checkpunkte eingeführten Passpunkten auf. Mit diesem Verfahren können der Einfluss der inneren Orientierung und etwaige Fehler des Geländemodells bestimmt werden. Dabei werden die Beobachtungen an den einzelnen Passpunkten, die in mehreren Bildern gemessen werden können zu jeweils einem Wert zusammengefasst. Untersucht wurde der im nachfolgenden noch detaillierter beschriebene Block mit 144 Bildern in zwei verschiedenen Varianten – mit und ohne Innerer Orientierung.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Fehler (Standardabweichung und Mittelwert) mit der ersten Art der Fehleranalyse der Online-Lösung in der Größenordnung übereinstimmt. Das kein flugrichtungabhängiger Fehler zu beobachten ist, ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass mehrere Beobachtungen an einem Passpunkt zu einem Wert gemittelt werden.

3.2 Aerotriangulation

Eine Aerotriangulation (AT) erfolgte an 144 Bildern aus 14 Flugstreifen mit der Software ERDAS Imagine LPS. Die Längsüberlappung der Bilder betrug zwischen 60 – 70 %, je nach Fluggeschwindigkeit des Helikopters. Die Querüberlappung ist sehr variabel. Als Startwerte für die automatische Messung der Verknüpfungspunkte wurden als Äußere Orientierung die Werte der prozessierten SBET-Lösung eingesetzt. Bei der AT wurden automatisch 2.104 Verknüpfungspunkte zwischen Bildern generiert. 25 Passpunkte wurden manuell in den entsprechenden Bildern gemessen. Bei der Aerotriangulation wurden die Passpunkte mit einer Genauigkeit von 5 cm eingeführt. Die GPS-Projektionszentren der Äußeren Orientierung wurden für die Lage (x, y, z) mit ebenfalls 5 cm Genauigkeit angenommen. Als Winkelgenauigkeit der GPS/INS-Lösung (ω , φ , κ) wurde 0.5° angenommen, um fehlerhafte Boresitewinkel kompensieren zu können. Im Ergebnis wurden die Klaffungen $X = 0.058$, $Y = 0.066$, $Z = 0.019$ [m] an den Passpunkten erzielt.

3.3 Simultankalibrierung der Inneren Orientierung

Die verwendete Software Leica LPS kann neben der Brennweite und der Hauptpunktlage auch die Radialverzeichnung r_v im Rahmen der Aerotriangulation mit zwei Parametern K_1 und K_2 schätzen (= Simultankalibrierung).

$$r_v = K_1 \times r_d^2 + K_2 \times r_d^4 \quad \text{eq. (1)}$$

wobei r_d = Radialentfernung vom Bildhauptpunkt in mm

Die Tangentialverzeichnung und weitere Parameter der inneren Orientierung (Scherung und Affinität) können mit der verwendeten Software nicht geschätzt werden. Die Parameter der inneren Orientierung sind untereinander stark korreliert, so dass bei einer gleichzeitigen Schätzung der Radialverzeichnung und der Bildpunktlage sowie der Brennweite größere Fehler bei der Bestimmung der einzelnen Parameter auftreten können. Diese fallen natürlich nicht bei der Lösung des untersuchten Blocks auf, da die Gesamtfehler durch die gleichzeitige Lösung aller Parameter minimiert werden. Kritisch ist insbesondere die Brennweite. Sie wird ohne Einbeziehung der Radialverzeichnung in der AT auf 24.98 mm geschätzt. Bei Berücksichtigung der Radialverzeichnung steigt der Wert auf ca. 25.26 mm. Dabei ist zu beachten, dass die Bestimmung der Brennweite im Rahmen einer Aerotriangulation grundsätzlich schwierig ist, da dies einen großen Höhenunterschied in den Bildern voraussetzt. Alternativ kann zur Erzeugung ausreichender Höhenunterschiede auch in zwei verschiedenen Höhen geflogen werden, wie im vorliegenden Fall geschehen. Erst eine unabhängige Überprüfung, d.h. Laborkalibrierung der inneren Orientierung, wie in Abb. 1 dargestellt, gibt eine zuverlässige Lösung, die sich natürlich in einem gewissen Umfang von der simultan ermittelten Lösung unterscheidet.

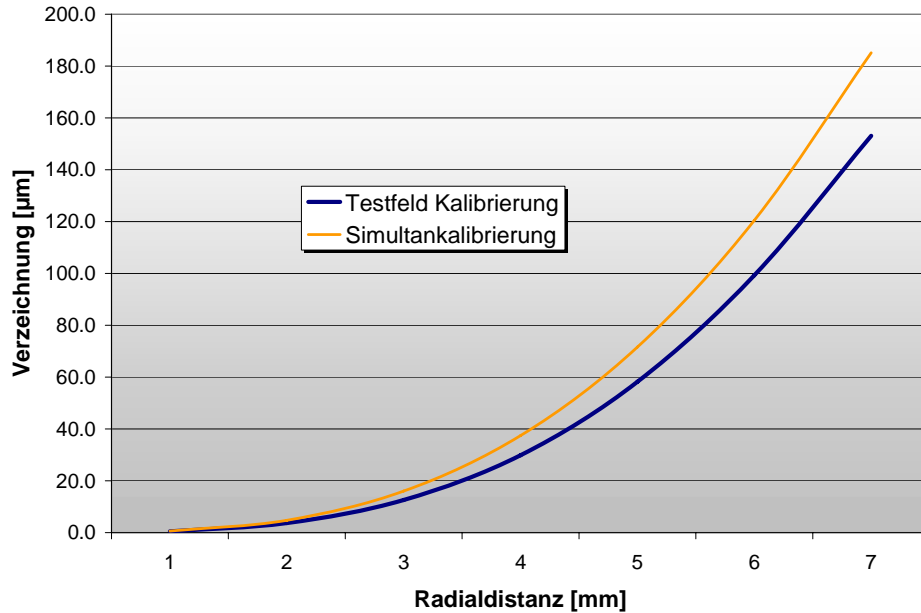


Abb. 1: Vergleich Simultan- und Laborkalibrierung der Radialverzeichnung DALSA Kamera 1M28 (Pixelgröße 10.6 µm) mit 25 mm B2514ER Pentax Objektiv

4 Boresite Alignment

Mit dem Vergleich der indirekten Orientierung durch die Photogrammetrie und der direkten Orientierung durch GPS/INS können die Boresitewinkel bestimmt werden. Dies sind kleine konstante Winkeloffsets, zwischen dem Kamerakoordinatensystem und dem Koordinatensystem des Inertialsensors. Die Boresitewinkel können zur Verbesserung der Online-Lösung beitragen, da die Genauigkeitsuntersuchung der Online-Lösung deutliche systematische Anteile gezeigt hat. Zur Bestimmung der Boresitewinkel mit dem Ziel einer Verbesserung der Online-Lösung wurde eine Kalibrierung durchgeführt. Dazu wurden die gemessenen Koordinaten der Passpunkte und der Verknüpfungspunkte in das Modul CalQC der Applanix-Software eingeführt. Da die Ergebnisse nicht eindeutig waren, sind mehrere Iterationen bzw. Konfigurationen gerechnet worden. Die Parameter und Ergebnisse einer Kalibrierung mit 4 Passpunkten und 20 Checkpunkten sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst:

Tab. 1: Parameter und Ergebnisse der Bestimmung der Boresitewinkel mit dem Programm CalQC

	x / ω	y / φ	z / κ
RMS of GCP Residuals (Meter)	0.015	0.042	0.003
RMS of Check Points Residuals (Meter)	0.368	0.559	1.079
Boresight Angles (Deg)	0.144	0.329	-0.049
RMS Boresight Angles (Deg)	0.167	0.156	0.142

Die obige Konfiguration verdeutlicht die Genauigkeit der Kalibrierung im Objektraum an den Checkpunkten, die deutlich hinter den Ergebnissen der photogrammetrischen Entzerrung bleibt.

Dies kann zum einen auf die schlechte zeitliche Synchronisation zurück zu führen sein und zum anderen auf die ungenau bestimmte innere Orientierung. Eine Trennung der beiden Faktoren kann nur durch eine Laborkalibrierung der Inneren Orientierung erfolgen.

Die Anwendung der Verbesserungen der Boresite-Winkel auf die äußere Orientierung ergibt ein sicheres Maß für die tatsächliche Genauigkeit im Objektraum. Dabei gibt es die Möglichkeit die Bedeutung der inneren Orientierung auf die 3D-Genauigkeit zu ermitteln. Die nachfolgenden Graphiken untersuchen dies für den oben vorgestellten Block an 23 Passpunkten, sowohl für die Online-Lösung (VNAV) als auch für Postprocessing Lösung (SBET), Abb. 2 und Abb. 3.

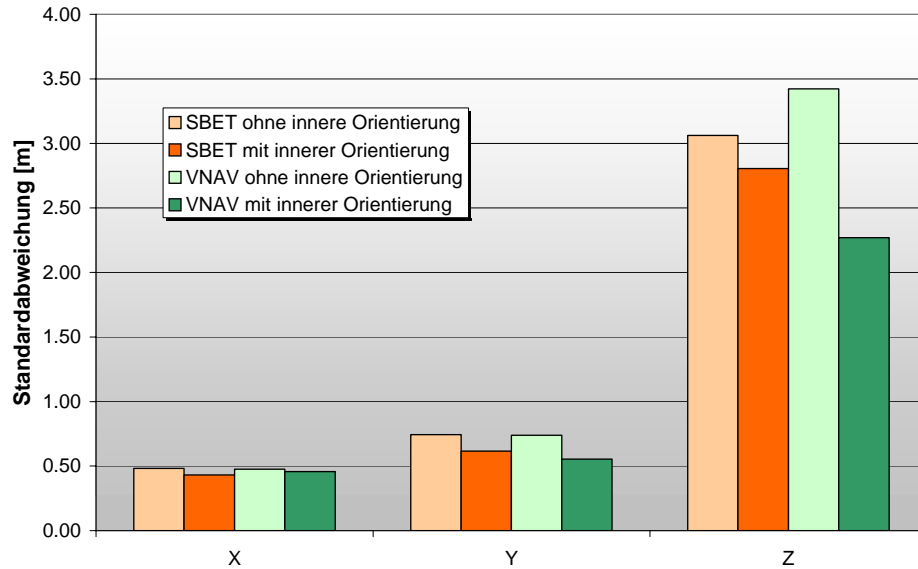


Abb. 2: Vergleich der Standardabweichungen an Passpunkten bei direkter Orientierung durch Online-Lösung und Postprocessing - mit und ohne Anwendung der Inneren Orientierung

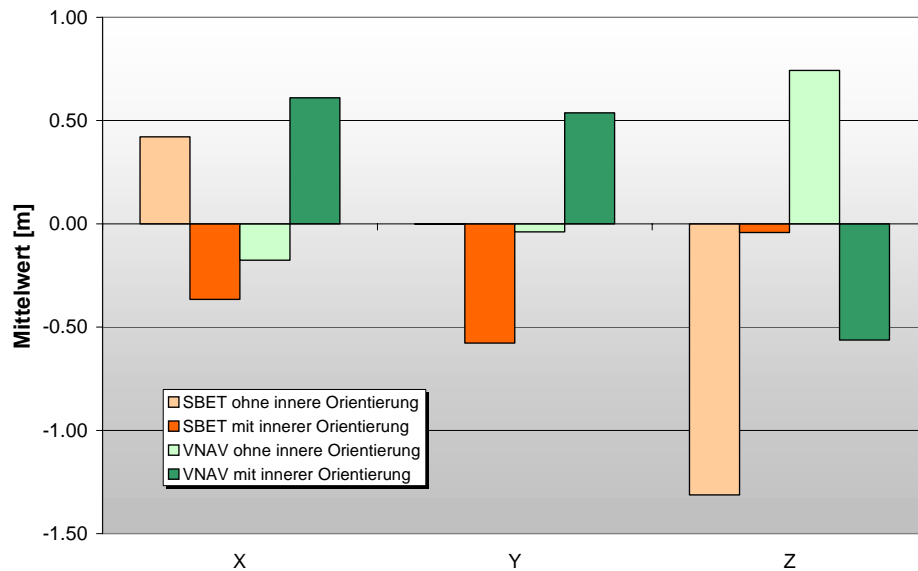


Abb. 3: Vergleich der Mittelwerte an Passpunkten bei direkter Orientierung durch Online-Lösung und Postprocessing - mit und ohne Anwendung der Inneren Orientierung

Die Graphiken zeigen, dass bei den Standardabweichungen in X,Y kein signifikanter Unterschied zwischen der Online-Lösung und der Postprocessing-Lösung besteht. Die Höhengenaugkeit ist um den Faktor 5 – 6 schlechter als die Lagegenauigkeit. Die Anwendung der inneren Orientierung führt zu einer Verbesserung der Genauigkeiten im Objektraum um ca. 10 – 15 %. Die Anwendung der inneren Orientierung zeigt, dass insbesondere die Verbesserung der Brennweite zu einer deutlichen Genauigkeitssteigerung in der Höhe führt. Die Veränderung der Radialverzerrung und der Hauptpunktlage hingegen sind in ihrer Wirkung untergeordnet.

Als Ergebnis bleibt festzuhalten, dass die berechneten Boresite-Winkel deutlich zur Verbesserung der Online-Lösung beitragen können, da die Größenordnung der Fehler an den Checkpunkten in etwa der potentiellen Genauigkeit der direkten Online-Orientierung entspricht. Der Boresitewinkel von über 0.3° in der Nickrichtung kann auch als wesentliche Ursache für die beobachteten flugrichtungsrichtungsabhängigen Fehler der Online-Lösung gesehen werden. Das theoretische Potential der Postprocessing Lösung konnte nicht erreicht werden. Dazu ist die Bestimmung der Boresite-Winkel zu ungenau gewesen. Schließlich ist der RMS der Boresitewinkel in der gleichen Größenordnung wie die Boresitewinkel selber.

5 Zusammenfassung

Die wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Untersuchungen für den Block Filderstadt lassen sich wie folgt zusammen fassen. Innerhalb eines Streifens ist die Relativgenauigkeit (= Bild-zu-Bild Genauigkeit) zwischen benachbarten Bildern bei einer Flughöhe von 500 m hoch ($\pm 1\text{m} \approx 4$ Pixel). Damit liegt die Online-Genauigkeit innerhalb der erwarteten Werte. Die Genauigkeit der indirekten photogrammetrischen Georeferenzierung der Bilder liegt im Subpixelbereich und unterstreicht das hohe geometrische Potential der Kamera. Durch die Bestimmung der Boresitewinkel konnte eine durchgreifende Verbesserung der direkten Georeferenzierung erzielt werden. Dabei konnte das theoretische Potential der Online-Lösung annähernd erreicht werden. Das theoretische Potential der Postprocessing-Lösung konnte nicht erreicht werden. Ursachen dafür sind in erster Linie mögliche Fehler in der inneren Orientierung (die nachträglich durch die Laborkalibrierung behoben wurden) bzw. in den unsystematischen zeitlichen Synchronisationsfehlern zwischen GPS/INS und den Bildern zu suchen. Diese unsystematischen Fehler induzieren weitere Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Boresitewinkel.

6 Literaturverzeichnis

- Ruhe, M. et al (2007): Ruhe, M., Kühne, R., Ernst, I., Zuev, S., Hipp, E.; Air borne systems and data fusion for traffic surveillance and forecast for the Soccer World Cup. In: 86th Annual Meeting Transportation Research Board, TRB 2007, papers CD-ROM, Washington, January 2007.
- HONKAVAARA, E. (2004): In-flight calibration for direct georeferencing.- Proceedings of the XX ISRPS Congress 12.7.-23.7.2004, Istanbul Vol. XXXV, Part B., Commission I/6, pp. 166-171.