



# Neigungsbestimmung photogrammetrischer Sensoren mit dem NAVSTAR/Global Positioning System

HOLGER SCHADE, Stuttgart

## Zusammenfassung

Durch die Entwicklung des NAVSTAR/Global Positioning Systems und durch den rapiden Preisverfall von Inertialnavigationssystemen ergeben sich für die direkte Erfassung der Parameter der äußeren Orientierung photogrammetrischer Bilder vollständig neuartige Perspektiven. Durch diese Systeme ist eine deutliche Reduktion der Kosten speziell bei der Datenerfassung für Geo-Informationssysteme zu erwarten. Der vorliegende Aufsatz beschäftigt sich mit der Nutzung von GPS-Multi-Antennensystemen für die Positions- und Neigungsbestimmung von flugzeuggetragenen, photogrammetrischen Sensoren. Die grundlegenden Prinzipien und die Genauigkeitsigenschaften der GPS-Neigungsbestimmung werden näher diskutiert und anhand empirischer Untersuchungen verifiziert. Die Ergebnisse dieses Versuchs basieren auf einer gut kontrollierten, photogrammetrischen Blockbefliegung, die im April 1994 durchgeführt wurde.

## Attitude determination of photogrammetric sensors with the NAVSTAR/Global Positioning System

With the development of the NAVSTAR/Global Positioning System and with the rapidly decreasing costs of inertial navigation systems new perspectives emerge for photogrammetric applications. Using this state of the art technology the direct measurement of exterior orientation parameters of photogrammetric sensor systems becomes feasible. This paper concentrates on the usage of GPS multi-antenna systems for airborne, kinematic position and attitude determination in photogrammetric applications. The basic principles and a theoretical accuracy analysis of GPS attitude determination will be presented. The theoretical considerations are verified with a well-controlled empirical testflight under conventional photogrammetric conditions.

## 1. Einleitung

Durch den intensiveren Einsatz von Geo-Informationssystemen in der Privatwirtschaft und in der öffentlichen Verwaltung hat sich das Anforderungsprofil an die heutige Photogrammetrie stark verändert. Der Bedarf an flächendeckenden, aktuellen, einfach zu handhabenden und kostengünstigen Datenerhebungsverfahren steht verstärkt im Vordergrund. Der Kostenfaktor scheint im Zusammenhang mit der GIS-Datenerhebung bestimmend zu sein, selbst wenn darunter die hohe geometrische Genauigkeit der konventionellen photogrammetrischen Verfahren leidet. Die „neue“ Photogrammetrie, die diesen gesteigerten Anforderungen gewachsen ist, ist im wesentlichen gekennzeichnet durch integrierte Sensorsysteme mit verbesserter spektraler und temporaler Auflösung bei der Datenaufzeichnung und einen hohen Grad der Automatisierung im Auswerteprozess. In der näheren Vergangenheit spielen auch vermehrt Verfahren zur direkten Orientierung von Bilddaten eine wesentliche Rolle, um die Kosten der photogrammetri-

schen Auswertung zu senken und die Geschwindigkeit des Auswerteprozesses zu erhöhen.

Zur geometrischen Rekonstruktion von Objekten aus Bilddaten ist es notwendig, die äußere Orientierung des auszuwertenden Bildes zu bestimmen. Nur mit der Kenntnis der Position  $(X_0, Y_0, Z_0)$  und Lage  $(\omega, \phi, \kappa)$  der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme können beliebig gemessene Bildpunkte in das übergeordnete Landeskoordinatensystem transformiert werden, in dem letztendlich die zu erfassenden Daten vorliegen müssen. Im konventionellen photogrammetrischen Auswerteprozess werden bisher die Parameter der äußeren Orientierung meist über inverse photogrammetrische Verfahren bestimmt. Mindestens drei koordinatenmäßig bekannte Punkte (Paßpunkte) werden im Bild identifiziert und gemessen. Durch die Inversion der perspektiven Abbildungsbeziehung (siehe z. B. KRAUS [1990]) können damit die Parameter der äußeren Orientierung, z. B. über einen räumlichen Rückwärtsschnitt, mit hoher Genauigkeit be-

stimmt werden. Offensichtlich ist die Bereitstellung der Paßpunkte und die damit verbundenen Kosten ein wesentlicher Faktor, der die Wirtschaftlichkeit photogrammetrischer Verfahren deutlich mindert. Seit der Entwicklung der Photogrammetrie gibt es daher große Bestrebungen, die Abhängigkeit der Bildorientierung von Paßpunkten zu verringern. Das höchste Ziel der Bildorientierung wäre demnach eine völlige Unabhängigkeit von Paßpunkten und damit die direkte Messung der Orientierungsparameter während des Fluges. Bereits um 1930 wurde unter anderem in Finnland versucht, einzelne Parameter der äußeren Orientierung mit Hilfe von Statoskopmessungen und Horizontmeßkammern zu bestimmen (z. B. LOFSTRÖM [1937]). Seit dieser Zeit wurde eine Vielzahl von Sensoren, speziell aus dem Bereich der Radiopositionierung, wie z. B. HIRAN, SHORAN, LIDAR oder LORAN, zur direkten Messung von Orientierungsparametern getestet. Der Erfolg und die Akzeptanz dieser Systeme war jedoch nur gering, da die Genauigkeitseigenschaften dieser Systeme und die damit verbundenen operationellen Rahmenbedingungen den hohen Anforderungen der Photogrammetrie meist nicht genügten. Neben der direkten Messung von Orientierungsparametern sind natürlich auch rechnerische Verfahren, wie z. B. die Aerotriangulation, zur Verringerung der notwendigen Paßpunktzahl entwickelt worden (z. B. ACKERMANN [1969], ACKERMANN [1970]).

Durch die Entwicklung des NAVSTAR/Global Positioning Systems (GPS) und den rapiden Preisverfall von Inertialnavigationssystemen ergeben sich für die direkte Messung von Orientierungsparametern neue Perspektiven. Das außerordentlich hohe Genauigkeitspotential dieser Navigationssysteme und speziell von GPS für die Positionsbestimmung von photogrammetrischen Sensoren wurde bereits sehr früh erkannt und in empirischen Versuchen nachgewiesen (FRIESS [1990]). Genauigkeiten im Bereich von 3–5 cm wurden unter typischen flugzeuggetragenen, kinematischen Rahmenbedingungen erreicht, was selbst für die höchsten photogrammetrischen Genauigkeitsanforderungen ausreichend ist. Die Einbeziehung der gemessenen Positionsdaten zur

weiteren Paßpunktverminderung in der Aerotriangulation sowie die Positionsbestimmung von nicht abbildenden Sensoren wurden am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, im Rahmen des SFB 228, untersucht und entwickelt (ACKERMANN/SCHADE [1993], FRIESS [1990], LINDENBERGER [1993], ACKERMANN/LINDENBERGER/SCHADE [1992]). Durch die einfache Handhabung, die Robustheit und die hervorragenden Genauigkeitseigenschaften findet speziell die GPS-gestützte Aerotriangulation in der Praxis zunehmend Verbreitung.

Die GPS-Satellitensignale können jedoch nicht nur für die Positionsbestimmung verwendet werden. Durch die Nutzung von neu entwickelten, kommerziell erhältlichen Multi-Antennen-GPS-Empfängern oder mehreren Einzelpfängern sind auch die Neigungswinkel einer Antennenplattform durch interferometrische Messungen der Satellitensignale zu bestimmen (siehe z. B. HARTL/WEHR [1986], ROTH/SINGH [1986]). Auf der Grundlage dieses Verfahrens soll im folgenden das Genauigkeitspotential der GPS-Neigungsmessung und dessen Anwendung in der Photogrammetrie näher beleuchtet werden.

## 2. Genauigkeitsanforderungen an die Neigungsmessung

Bevor auf die theoretischen Grundlagen der GPS-Neigungsmessung und die empirischen Genauigkeitsuntersuchungen eingegangen wird, sollten zunächst die Anforderungen der Photogrammetrie an ein System zur Neigungsbestimmung diskutiert werden. Die geforderte Neigungsgenauigkeit für photogrammetrische Anwendungen kann aus der benötigten geometrischen Genauigkeit des Bildes ( $d_s$ ) und von der Brennweite der verwendeten Kamera ( $c$ ) näherungsweise abgeleitet werden ( $d\alpha = \alpha \tan(d_s/c)$ ). Typischerweise liegt die maximale Auflösung eines hochauflösenden photogrammetrischen Filmes im Bereich von 40–80 Linienpaare/mm, was einer durchschnittlichen Pixelgröße von 10–25  $\mu\text{m}$  entspricht. Um Mischpixel durch falsche Neigungsinformation zu vermeiden, sollte die maximale Verschiebung eines Bildpunktes durch einen Neigungsfehler geringer als 1 Pixel (besser als 10–25  $\mu\text{m}$ ) sein. Normalerweise liegen die Brennwei-

Tab. 1

Anwendung	Pixel Größe [µm]	Kamera Brennweite [cm]	geforderte Genauigkeit [mgon]
Kataster Punktbestimmung	10	8	8
		15	4
		30	2
	25	8	20
		15	10
Orthophoto	100	15	42
CCD-Kameras	10	1,5	42
		5	12
	30	1,5	130
		5	38

ten der Objektiv von Luftbildkamern zwischen 8 cm (Extra-Weitwinkel) und 30 cm (Normalobjektiv), wonach sich geforderte Neigungsgenauigkeiten im Bereich von 2–20 mgon ergeben. Für die Generierung von Orthophotos zur Kartenherstellung wird in der Regel von geometrischen Genauigkeiten im Bereich von 100 µm ausgegangen, was einer geforderten Neigungsgenauigkeit von 40 mgon entspricht.

In den letzten Jahren wurden verstärkt CCD-Kameras verschiedenster Qualität für die Erfassung von GIS-Daten eingesetzt. (z. B. BABEY/ANGER [1989], HOFMANN [1988], LOHMANN/RAUCHFUSS [1994]). Obwohl die verwendeten CCD-Kameras meist eine geringere geometrische Auflösung wie konventionelle Luftbilder bieten, sind klare Vorteile bei der temporalen Auflösung und der direkten digitalen Aufnahme erkennbar. Typische Pixelgrößen für die aktuelle CCD-Technologie liegen im Bereich von 10–30 µm; die Brennweiten der auf dem Markt erhältlichen Kameras sind meist variabel und liegen bei 1,5–5 cm, was in geforderte Neigungsgenauigkeiten von ca. 10–100 mgon resultiert. Tabelle 1 faßt einige typische Genauigkeitsanforderungen für die Neigungsmessung in photogrammetrischen Projekten zusammen.

### 3. Prinzip der Neigungsmessung mit GPS

Die interferometrische Neigungsmessung mit GPS basiert normalerweise auf Beobachtungen des Trägerfrequenzsignals. Das grundlegende Schema der Phasendifferenzierung wird (einfachheitshalber nur in einer Ebene) in Abbildung 1 dargestellt. Die Phasendifferenz  $\Delta\phi$  der an beiden Antennen ankommenden Satellitensignale wird im Empfänger gemessen. Da die Distanz des Satelliten zum Interferometer sehr groß im Vergleich zu der kurzen Basis B zwischen den Antennen ist, kann angenommen werden, daß die empfangenen Strahlen parallel sind. Die Phasendifferenz ist demnach dann nur abhängig von der Winkellage  $\varphi$  des Satelliten relativ zur Basis und der Basislänge (siehe Gleichung 1).

$$\gamma = \arccos \left( \frac{\Delta\phi \lambda}{2\pi B} \right) \tag{1}$$

Für die Bestimmung aller drei Raumwinkel müssen mindestens drei Antennen gekoppelt sein, da aus einem ebenen Interferometer typischerweise nur der Kurs- und der Steigungswinkel (Koordinatenachse entlang der Antennenbasis) bestimmt werden können.

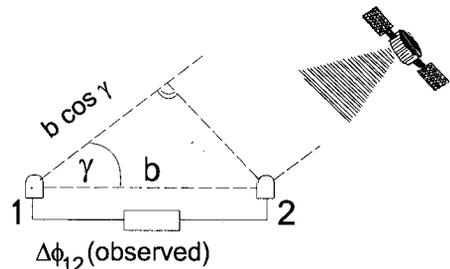


Abb. 1: Prinzip der GPS-Neigungsmessung

### 4. Fehlereinflüsse bei der GPS-Neigungsmessung

Theoretisch sind mit der neuesten Empfängertechnologie Genauigkeiten bei der Messung von Phasendifferenzen im Bereich von 0,5–1 mm (5–10 m Basislänge) möglich, was einer theoretischen Winkelmeßgenauigkeit von 3–5 mgon entspräche. Unter operationellen Bedingungen ist diese Meßgenauigkeit jedoch aufgrund von verschiedenen systematischen Fehl-

hereinflüssen nicht erreichbar. Bedingt durch die normalerweise sehr kurzen Basislinien auf dem Flugzeug sind bei der GPS-Neigungsmessung gegenüber der Positionierung nicht mehr die konventionellen GPS-Fehlereinflüsse wie Atmosphäre, Orbit, Uhreffekte oder Selective Availability limitierend. Offensichtlich sind die Fehlereinflüsse, die sich trotz der kurzen Distanz auf beide Antennen unterschiedlich auswirken, wie z. B. Multipath oder Antennenphasenzentrumsvariationen, für die Genauigkeit ausschlaggebend. Im Zusammenhang mit flugzeuggetragenen, photogrammetrischen Anwendungen spielen auch die Deformationen des Flugzeugkörpers für die Bestimmung der Neigungen eine wesentliche Rolle. Die Größe und die Möglichkeiten zur Reduktion dieser Fehlereinflüsse unter operationellen Bedingungen bestimmen im wesentlichen die erreichbare Genauigkeit.

#### 4.1 Neigungsfehler durch Multipath

Multipath (Mehrwegempfang) ist der Empfang eines Signales, welches von einer Oberfläche in der Nähe der Antenne reflektiert wurde (z. B. RODGERS [1992]). Durch diese Reflexion ist der Weg des Signales vom Satelliten zum Empfänger länger als der des direkten Signales. Wenn die Streckendifferenz des reflektierten und des direkten Signales klein genug ist, kann der Empfänger die beiden Signale nicht mehr trennen und das reflektierte und das direkt empfangene Signal überlagern sich, wodurch sich die gemessenen Phasendifferenzen systematisch verfälschen. Multipath ist in erster Linie von der Reflektivität der Umgebung der Antennen und vom Einfallswinkel des Satellitensignales abhängig. Um den Einfluß von Multipath auf die ausgeglichenen Winkel zu quantifizieren, wurde an zwei aufeinanderfolgenden Tagen (Tag 301 und 302, 1993) ein GPS-Multi-Antennen-Empfänger auf der gleichen Position in der gleichen reflektiven Umgebung aufgebaut. Die Antennen wurden in einem Rechteck mit 1 m und 2 m Basislänge angeordnet. Mit einem Abstand von vier Minuten wiederholt sich am nächsten Tage die Satellitenkonstellation des vorhergehenden Tages und ermöglicht somit Messungen zu Satelliten mit den gleichen Signaleinfallswinkeln.

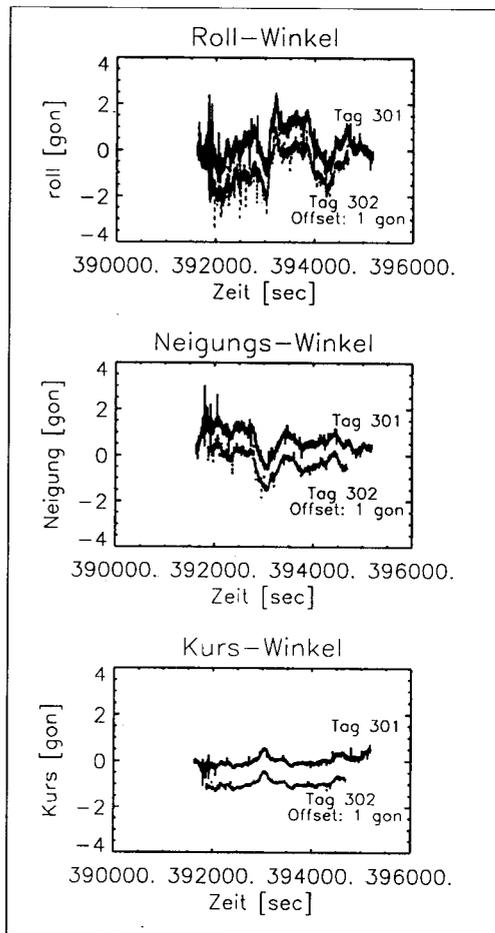


Abb. 2: Fehlereinflüsse bei der GPS-Neigungsmessung durch Mehrwegeeffekte

Da die Messungen an zwei aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt wurden, kann davon ausgegangen werden, daß sich die konventionellen Fehlereinflüsse wie Orbit, Atmosphäre, SA oder Satellitenuhr unterschiedlich verhalten. Eine Korrelation der Ergebnisse aufgrund der genannten Fehlereinflüsse ist demnach nicht zu erwarten. An beiden Tagen konnten je etwa eine Stunde L1-Phasendaten mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet werden. Die Daten wurden in kinematischem Modus prozessiert, um die Variationen der ausgeglichenen Winkel in Abhängigkeit von der Satellitenkonstellation zu untersuchen. Der Soll-

Wert für die geschätzten Winkel wurde aus einer statischen Basislinienberechnung unter Verwendung aller GPS-Daten abgeleitet. Abbildung 2 zeigt die aus den GPS-Phasendaten berechneten Winkel der beiden Datensätze. Aus Visualisierungsgründen wurden die Ergebnisse des Tages 302 absichtlich mit einem Offset von 1 gon versehen.

Auf allen Kurven können langfristige periodische Fluktuationen um den Sollwert festgestellt werden. Eine spektrale Analyse dieser Fluktuationen zeigt Perioden mit einer Durchschnittsdauer von 200–300 sec und Amplituden von 0,2–0,5 gon. Darüber hinaus ist eine starke Korrelation zwischen den Ergebnissen der beiden aufeinanderfolgenden Tage erkennbar. Die gezeigten periodischen Fluktuationen und die starke Korrelation kann auf bestehende Mehrwegeeffekte zurückgeführt werden. Eine Reduktion der Mehrwegeeffekte ist für Fluganwendungen zur Zeit nicht oder nur bedingt möglich, weshalb der Montagepunkt der Antennen wegen der Reflektivität der Umgebung mit besonderer Sorgfalt gewählt werden sollte. Erste Forschungsansätze zur Einschränkung von Multipath durch verbessertes Antennendesign oder durch rechnerische Verfahren werden seit kurzem untersucht.

#### 4.2 Neigungsfehler durch aerodynamisch bedingte Deformationen des Flugzeugs

Normalerweise werden zur Berechnung der Neigungswinkel aus differentiellen Phasemessungen

$$\vec{X}_{\text{Body}} + \vec{v}_{\text{Body}} = \mathbf{R}_1(\omega) \mathbf{R}_2(\phi) \mathbf{R}_3(\kappa) \vec{X}_{\text{Local}} \quad (2)$$

ein körperfestes Koordinatensystem und ein lokales geodätisches System über die Beziehung (2) zueinander in Verbindung gebracht. Das körperfeste Koordinatensystem wird meist aus Anschaulichkeitsgründen durch das Bildkoordinatensystem des photogrammetrischen Sensors, durch die relative Position der Antennen oder durch die Hauptträgheitsachsen des Flugzeuges festgelegt. Die Neigungsbestimmung des photogrammetrischen Sensors basiert demnach auf der Annahme, daß die relativen Positionen der Antennen zu dem Sensor während der Befliegung konstant bleiben. Da die Antennen jedoch häufig auf den Flügeln angebracht sind, trifft diese Annahme nur in bestimmten Grenzen zu. Während des Fluges wirken auf das Flugzeug aerodynamische Kräfte, die den Flugzeugrumpf und die Flügel deformieren. Die Größe der Deformationen hängt in erster Linie von der Flugzeuggeschwindigkeit und der Elastizität der Flügel und des Flugzeugrumpfes ab. Diese Deformationen wirken sich natürlich auch auf die relative Position der Antennen aus und können speziell in den z-Komponenten der Flügelantennen beobachtet werden. Um die

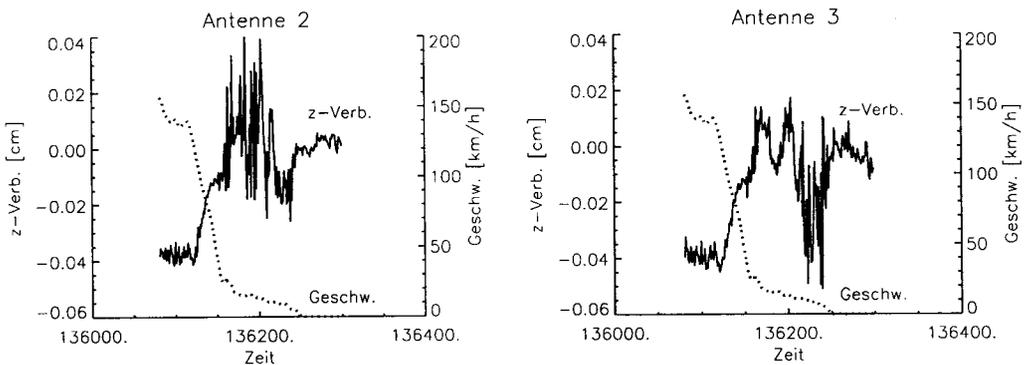


Abb. 3: Deformation der Flügel während der Landephase eines Bildflugzeuges

Größe der Verschiebungen der Antennen abzuschätzen, können die Residuen  $v_{Body}$  der Transformation (2) analysiert werden. Der Aufwinddruck, der auf den Flügeln lastet, sollte proportional zu den z-Residuen der Flügelantennen sein. Die Sollposition der Antennen wurde in einer statischen GPS-Basislinienmessung und mit konventionellen geodätischen Verfahren bestimmt. Abbildung 3 zeigt die Verbesserungen in den z-Komponenten der Flügelantennen und die Flugzeuggeschwindigkeit während der Landephase eines Flugzuges.

Offensichtlich ist der Betrag der Verschiebung direkt von der Flugzeuggeschwindigkeit abhängig und bewegt sich für diesen Flugzeugtyp zwischen etwa 3 cm bei voller Geschwindigkeit und 0 cm, wenn das Flugzeug steht. Die Größe der Deformation ist für beide Flügelantennen nahezu identisch und konstant, solange die Flugzeuggeschwindigkeit konstant bleibt. Eine Reduktion der Fehler durch die Flügeldeformation ist nur schwer möglich. Einerseits sollten die Basislinienlängen so groß als möglich gewählt werden, um die theoretische Genauigkeit der Neigungsinformation zu erhöhen, aber auf der anderen Seite werden die zu erwartenden Verschiebungen durch Flügeldeformationen größer. COHEN/PARKINSON [1992] schlagen vor, im Ausgleichungsprozeß der Winkelbestimmung einen zusätzlichen Parameter zu schätzen, der die Flügeldeformationen erfaßt. Die Durchführbarkeit dieses Verfahrens für photogrammetrische Anwendungen wird zur Zeit untersucht.

### 5. Beschreibung des Testfluges

Um die erreichbaren Genauigkeiten der GPS-Neigungsbestimmung unter flugzeugtragenden, photogrammetrischen Rahmenbedingungen zu analysieren, wurde im April 1994 ein Testflug gemeinsam mit der Fa. Rheinbraun AG über einem Braunkohltagelbau in der Nähe von Köln durchgeführt. Ein Bildflugzeug (PARTENAVIA) wurde mit einem ASHTECH-3DF-Multi-Antennen-GPS-Empfänger und einer ZEISS-RMK-TOP ausgerüstet. Die Zeitsynchronisation konnte über den Shutterimpuls der RMK und den Zeitzeicheninput des GPS-Empfängers gewährleistet werden. Vier Antennen wurden auf dem Flugzeug

Tab. 2: Antennenpositionen im flugzeugfesten Koordinatensystem

Antenne Nr.	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$	Strecke
#1 - #2	1.80	4.90	0.27	5.227
#1 - #3	1.52	-4.88	0.25	5.117
#1 - #4	2.30	0.0	0.14	2.304

montiert, wobei sich Antenne #1 am Heck des Flugzeuges, Antenne #4 über dem Cockpit und die Antennen #2 und #3 auf dem rechten und linken Flügel befanden. Die relative Position der Antennen und des Kammerkoordinatensystems wurden mit terrestrisch geodätischen Verfahren und einer statischen GPS-Messung bestimmt. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse dieser statischen Einmessung zusammengefaßt.

Während der Befliegung wurden auf einer Referenzstation in der Nähe des Befliegungsgebietes und in dem Flugzeug ca. zwei Stunden Daten mit einer Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet. In dem Meßzeitraum (Tag 108, 1994 zwischen 12:00 und 14:00 GMT) konnten auf der Referenzstation 8-9 Satelliten mit einem Cutoff-Winkel von 10 Grad beobachtet werden. Im Flugzeug sind die Beobachtungsbedingungen durch die kinematische Umgebung und Abschattungen im Kurvenflug schlechter. Zusätzlich ist der hier in diesem Test verwendete ASHTECH-3DF-GPS-Empfänger auf sechs Kanäle pro Antenne limitiert. Darüber hinaus wurde Satellit PRN 6 von dem Empfänger permanent beobachtet, obwohl der Status des Satelliten auf „unhealthy“ gesetzt war. Dadurch wurde zusätzlich auf allen vier Antennen ein Kanal blockiert, der zur Beobachtung eines „gesunden“ Satelliten hätte verwendet werden können. Trotz dieser Einschränkung konnten innerhalb der Streifen zumindest 4-5 Satelliten kontinuierlich beobachtet werden.

Neben den GPS-Beobachtungen wurden 161 Bilder in einem Bildmaßstab von 1:5000 über einem gut kontrollierten photogrammetrischen Block aufgenommen. Insgesamt wurden zwölf Streifen mit einer durchschnittlichen Länge von 1,2 km in Nord-Süd-Richtung und fünf

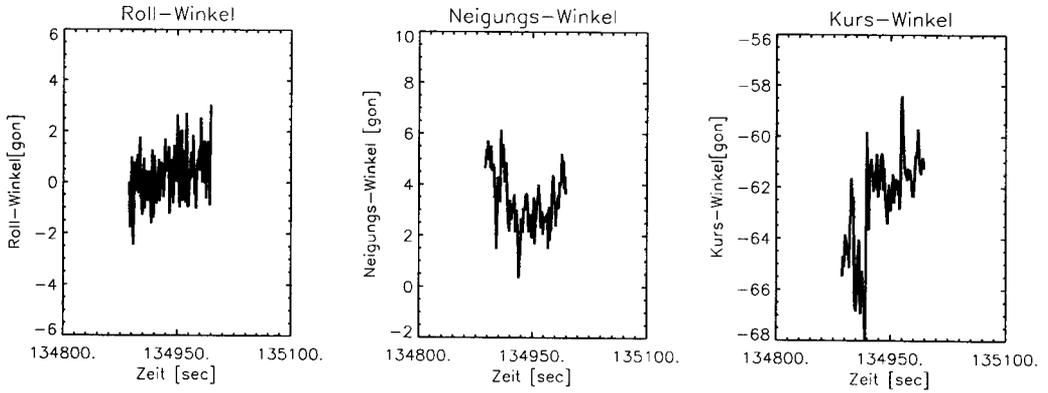


Abb. 4: Kurs-, Neigungs- und Rollwinkel innerhalb eines Streifens

Streifen mit einer durchschnittlichen Länge von 3,5 km in West-Ost-Richtung befliegen. 20 horizontale und 73 vertikale Paßpunkte standen in der Blockausgleichung zur Verfügung und konnten für die Berechnung der Position und Neigung der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme verwendet werden. Die theoretische Genauigkeit der abgeleiteten Winkel aus der Blockausgleichung lag im Durchschnitt bei 5 mgon.

**6. Resultate**

Die erfaßten GPS-Daten wurden mit einer am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart entwickelten Software prozessiert. Jeder Streifen wurde unabhängig behandelt, da in den Flugkurven die Satellitengeometrie häufig nicht ausreichend war. Abbildung 4 zeigt die ausgeglichenen Flugzeugneigungen innerhalb eines typischen Streifens.

Um die Neigungen aus GPS-Beobachtungen und aus der Aerotriangulation vergleichen zu können, müssen die GPS-Neigungen auf die Belichtungszeitpunkte der Kamera interpoliert

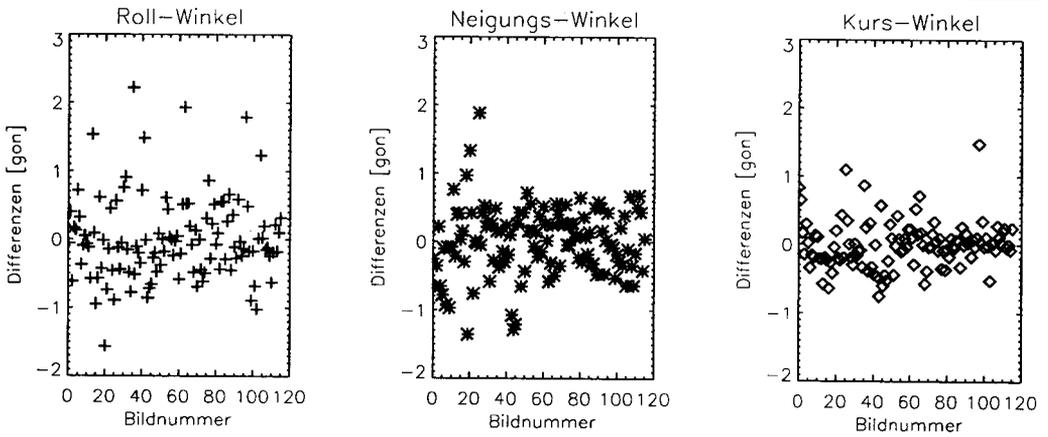


Abb. 5: Neigungsdifferenzen aus GPS und photogrammetrischen Beobachtungen

werden. Für diese Interpolation wurde eine Funktion erster Ordnung angesetzt. Die aus der Aerotriangulation bestimmten Neigungen können hier als Referenzwerte angehalten werden, da die Genauigkeit der photogrammetrisch bestimmten Winkel im Bereich von einigen mgon liegt. Im Gegensatz dazu ist die zu erwartende Genauigkeit aus der GPS-Neigungsmessung wegen der oben angesprochenen Fehlereigenschaften nur im Bereich von 0,1–0,5 gon. Die Differenzen der beiden Neigungsbestimmungsmethoden sind in Abbildung 5 dargestellt.

Die Streuung der GPS-Neigungen liegt demnach bei 0,53 mgon für den Rollwinkel, bei 0,42 mgon für den Neigungswinkel und bei 0,27 mgon für den Kurswinkel. Ein systematisches Fehlerverhalten der GPS-Neigungen ist nicht erkennbar. Die hier erreichten Ergebnisse zeigen ein etwas geringeres Genauigkeitsniveau im Vergleich zu früher durchgeführten Untersuchungen sowohl unter marinen (LU et al. [1993]) als auch unter flugzeuggetragenen Bedingungen (SCHADE et al. [1993] und VAN GRAAS/BRAASCH [1992]).

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

In einem Testflug wurde die Genauigkeit der Neigungsmessung mit GPS-Multi-Antennen-Empfängern unter photogrammetrischen Anwendungsbedingungen untersucht. Der Vergleich der GPS-Neigungen zum Zeitpunkt einer Bildaufnahme mit konventionell photogrammetrisch bestimmten Neigungen zeigt ein Genauigkeitsniveau der GPS-Neigungsmessung bei ca. 0,5 gon bzw. 0,4 gon für den Rollwinkel und den Steigungswinkel und bei ca. 0,3 gon für den Kurswinkel. Obwohl die erreichten Genauigkeiten noch nicht ausreichend sind, um Bilder mit hoher Qualität direkt zu orientieren, sind Anwendungen der GPS-Neigungsmessung in der Photogrammetrie naheliegend. Neben der Navigation im Bildflug (direkte Kontrolle der Bildüberlappung) ist die Bildorientierung mit niedriger bis mittlerer Genauigkeit denkbar. Für die niedriggenau geometrische Auswertung von CCD- oder Luftbildern speziell im Bereich der GIS-Datenerhebung bietet die GPS-Neigungsmessung

eine schnellere und kostengünstigere Alternative zur konventionellen, inversen Bildorientierung über Paßpunkte. Auch als Näherungswerte für die Bildverarbeitungsalgorithmik im automatischen Auswerteprozess können die direkt gemessenen Orientierungen vorteilhaft genutzt werden. Weitere Verfahren zur Nutzung der Neigungen für die Streifen-triangulation oder für eine vereinfachte Acro-triangulation mit weniger Verknüpfungspunkten sind augenblicklich in der Untersuchung.

In Verbindung mit einem Low-cost-Inertialsystem ist die direkte Bestimmung der äußeren Orientierung von photogrammetrischen Sensoren selbst für hohe Genauigkeitsanforderungen denkbar. Da die Fehlereigenschaften der beiden Systeme komplementär sind, ist eine erhebliche Genauigkeitssteigerung zu erwarten. Die kurzfristige Stabilität des INS reduziert das hohe Beobachtungsrauschen der GPS-Beobachtungen und die längerfristigen systematischen Fehlereigenschaften des INS können durch die Langzeitstabilität der GPS-Neigungsbestimmung kompensiert werden. Eine praktische Untersuchung der Genauigkeitseigenschaften eines integrierten GPS/Low-cost-INS-Systems für die äußere Orientierung von Bildern wird in der nahen Zukunft durchgeführt.

## Literatur

- ACKERMANN, F. (1969): The Impact of Block Triangulation on Large Scale Mapping, *Cartography*, Vol. 7/1. Journal of the Australian Institute of Cartography, 1969.
- ACKERMANN, F. (1970): Acrotriangulation mit unabhängigen Modellen, *Bildmessung und Luftbildwesen*, Heft 4, S. 206–217, 1970.
- ACKERMANN, F., LINDENBERGER J., SCHADE, H. (1992): Kinematische Positionsbestimmung mit GPS für die Laser-Profilmessung, *Zeitschrift für Vermessungswesen*, Vol. 118, Heft 1, S. 24–35, 1992.
- ACKERMANN, F., SCHADE, H. (1993): Application of GPS for Aerial Triangulation, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing PE & RS*, Vol. 59, No. 11, November 1993, pp. 1625–1632.
- BABEY, S. K., ANGER, C. D. (1989): A Compact Airborne Spectrographic Imager-Casi, *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 1028–1031, Vancouver, Canada, 1989.
- COHEN, C., PARKINSON, B. (1992): Aircraft Applications of GPS Based Attitude Determination, *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, pp. 1028–1031, Vancouver, Canada, 1989.

dings of the ION-GPS, Fifth International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 775–782, Albuquerque, 1992.

FRIESS, P. (1990): Kinematische Positionsbestimmung für die Aerotriangulation mit dem NAVSTAR Global Positioning System, DGK, Reihe C, Heft 359, München, 1990.

HARTL, P., WEHR, A. (1986): Chancen der GPS-Satellitenavigation für die Luftphotogrammetrie, Bildmessung und Luftbildwesen, Heft 6/86, 1986.

HOFMANN, O. (1988): A Digital Three Line Stereo Scanner System, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Proceedings of the Commission II Symposium, pp. 206–213, 1988.

KRAUS, K. (1990): Photogrammetrie, Grundlagen und Standardverfahren, Band 1, Dümmler-Verlag, Bonn, 1990.

LINDENBERGER, J. (1993): Laser-Profilmessung zur topographischen Geländeaufnahme, DGK, Reihe C, Heft 400, München, 1993.

LOFSTRÖM, K. (1937): Das finnische Verfahren zur direkten Bestimmung der äußeren Orientierung, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 8, 1937.

LOHMANN, P., RAUCHFUSS C. (1994): Die Möglichkeit der Nutzung von Multispektralscanner-Aufnahmen bei Deponieerkundungen, GIS, Heft 3/94, S.9–15, 1994.

LU G., CANNON, E., LACHAPPELLE, G., KIELLAND, P. (1993): Attitude Determination of a Survey Launch Using Multi-Antenna GPS Technologies, Proceedings of the National Technical Meeting, The Institute of Navigation, San Francisco, 1993.

ROTH, B., SINGH, R. (1986): Applications of the NAVSTAR GPS to Precise Attitude Determination, Proceedings of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Vol. 2, pp. 1345–1359, Austin, Texas, 1986.

RODGERS, C. (1992): Multipath Simulation Software Developed for the Design of a Low-Multipath DGPS Antenna for the US Coast Guard, Proceedings of the ION GPS 92, Fifth International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 43–50, Albuquerque, 1992.

SCHADE, H., CANNON, E., LACHAPPELLE, G. (1993): An Accuracy Analysis of Airborne Kinematic Attitude Determination with the NAVSTAR/Global Positioning System, SPN Zeitschrift für Satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation, No. 3/93, pp. 90–95, 1993.

VAN GRAAS, F., BRAASCH, M. (1992): GPS Interferometric Attitude and Heading Determination: Initial Flight Test Results, Navigation, Vol. 38, No. 4, pp. 297–316, 1992.

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Ing. HOLGER SCHADE, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Keplerstraße 11, D-70174 Stuttgart, Tel. (07 11) 1 21-33 83.

HOLGER SCHADE, geboren am 25. 8. 1964, 1985–1990 Studium des Vermessungswesens an der Universität Stuttgart, 1990–1994 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, seit 28. 3. 1994 Akademischer Rat und Gruppenleiter der Forschungsgruppe „Sensorintegration“ des Instituts für Photogrammetrie.



## Topographische Geländeerfassung mit flächenhaft abtastenden Lasersystemen

JOHANNES KILIAN und MARKUS ENGLISH, Stuttgart

### Zusammenfassung

Die direkte Erfassung der topographischen Geländeoberfläche mit profilierenden Lasersensoren hat in den vergangenen Jahren ihre Leistungsfähigkeit insbesondere in Waldgebieten mehrfach durch Testflüge unter Beweis gestellt. Mit der kommerziellen Verfügbarkeit von flächenhaft abtastenden Lasersensoren (sog. scannenden Lasern) ist der Übergang von der bisherigen linearen zur flächendeckenden Datenerfassung möglich. Dabei werden auch neue Auswertverfahren für die Datenprozessierung erforderlich. Der vorliegende Beitrag beschreibt die Prinzipien der kommerziell verfügbaren Laserscanner und Auswertverfahren für flächendeckend gescannte Daten.