

ERGEBNISSE ÜBER DREI GPS-GESTÜTZTE TESTFLÜGE UND VERGLEICHE

Keren Li

Institute for Photogrammetry and Engineering Surveys
University of Hannover, FRG/CHINA

ISPRS Commission I

KEY WORDS: Accuracy, Camera, GPS, Navigation, Photogrammetry

Abstract

An overall survey of the course of development and current trends in camera orientation and survey navigation are reviewed. The Global Positioning System (GPS) offer a powerful tool to obtain this information with a high accuracy, which can be of great importance for the photogrammetry. The method of the precise navigation with code phase measurement and new techniques of the precise positioning with carrier phase measurement are explained and discussed, which are based upon the real data from three test flights during 1988 - 1990. The typical 4-dimensional eccentricity problem between airborne antenna and photogrammetric camera are analysed. The main results of GPS pseudorange observations carried out with new techniques are presented and the prospects for further developments are discussed.

1 Einführung

Das NAVigation System with Time And Ranging (NAVSTAR) Global Positioning System, kurz GPS, wurde ursprünglich zur hochgenauen Navigation militärischer Fahrzeuge entwickelt. Neben diesem primären Aspekt gibt es inzwischen ein sehr breites Anwendungsspektrum [Seeber, 91] für GPS. Der vorliegende Artikel konzentriert sich auf die Nutzung von GPS in der Photogrammetrie. Dabei steht insbesondere die kinematische Anwendung von GPS im Vordergrund der Untersuchungen mit dem Ziel einer Echtzeit-Bildflugnavigation, insbesondere zur Meßkammer-Positionierung, wobei wenigstens ein GPS-Empfänger zusammen mit der Meßkammer im Meßflugzeug eingesetzt wird. Dabei werden die GPS-Daten kontinuierlich aufgezeichnet.

Mit dem Einsatz der GPS-gestützten Positionsbestimmung in der Photogrammetrie hat eine tiefgreifende Wandlung in diesem Fachgebiet begonnen. Die Verantwortlichen für die Photogrammetrie sind durch die sich anbahnende rasche Entwicklung herausgefordert, neue Konzepte für die zukünftigen Standardverfahren der Photogrammetrie zu entwickeln. Mit seinen charakteristischen Eigenschaften wie

- der technischen Nutzbarkeit der einzelnen Methoden der kinematischen GPS-Positionierung,
- der Erzielung hoher Genauigkeit und
- der hohen Wirtschaftlichkeit

hat das neue Meßmittel GPS die photogrammetrischen Verfahren in folgenden Bereichen beeinflusst:

- bei der eigentlichen Bildflugnavigation in Echtzeit,
- bei der kinematischen Bestimmung und Aufzeichnung der Kamera-Orientierungsdaten,
- und bei der Paßpunktbestimmung.

In folgenden Abschnitten werden die obengenannten Einsatzmöglichkeiten von GPS in der photogrammetrischen Praxis beschrieben. Es sei darauf hingewiesen, daß diese Darstellung keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit erhebt, sondern nur eine Zusammenfassung über durchgeführte Experimente unter Nutzung der GPS-Technik geben möchte.

2 Bildflugnavigation durch GPS in Gebiet WURSTER WATT (1990)

Unter Berücksichtigung der verfügbaren Ausrüstungen, der Aufnahmematerialien und der technischen Möglichkeiten sowie den Anwendungsgebieten bei der Aerophotogrammetrie wird ein systematischer Bildflug eines aus mehreren Bildstreifen bestehenden Blocks für eine dreidimensionale Vermessung der Erdoberfläche und eine kartographische Auswertung geplant. Um die mehrfach abgebildeten Bildpunkte identifizieren und messen zu können, ist eine Überdeckung in Block in der Regel mit einer Querüberdeckung Q von 20 - 30% und einer Längsüberdeckung P von mindestens 60% erforderlich. Deshalb soll der Bildflug innerhalb der Überdeckungstoleranzen ohne Lücken mit der nötigen Si-

cherheit ausgeführt werden. Ganz allgemein verwendet die Bildflugnavigation Raumkoordinaten, Richtung, Zeit und Geschwindigkeit. In der photogrammetrische Praxis sollte ein Navigationssystem für den Bildflug

- eine genaue dreidimensionale Navigation ermöglichen, so daß die Bildflugstreifen keine Lücke aufweisen und ohne zu große Überdeckung angelegt werden,
- die Abdrift automatisch bestimmen,
- weltweit verfügbar sein,
- einen Bildflug in einer ganz genau festgelegten Zeitfolge und die Auslösung von gezielten Luftaufnahmen ermöglichen,
- die Möglichkeiten bieten, daß man dieses Navigationssystem leicht und ohne Beschränkung bedienen kann und daß es mit anderen Navigationsverfahren integriert werden kann,
- kostengünstig und so geartet sein, daß es den Benutzern mit verschiedenen Bedürfnissen zu unterschiedlichen Preisen zu Verfügung steht.

Im Vordergrund bei der Navigation steht zweifellos die erzielbare Navigationsgenauigkeit. In der photogrammetrische Praxis werden sie meistens vom Auftraggeber festgelegt. Tabelle 1 zeigt z.B. die vom Niedersächsischen Landesvermessungamt in Deutschland geforderten Navigationstoleranzen [Herms, 91].

Tab. 1 Ein Beispiel der Navigationstoleranz

Bildmaßstab	Navigationstoleranz ($\pm m$)
1:6000	100
1:8000	150
1:12500	200

Die bisherigen Navigationsverfahren kann man in drei verschiedene Hauptgruppen unterteilen :

- Terrestrische Navigationsverfahren (z.B. OMEGA, LORAN, VOR/DME)
- Bordautonome Navigationsverfahren (z.B. Sichtnavigation, Koppelnavigation, Doppelnavigation, Trägheitsnavigation)
- Satellitenbezogene Navigationsverfahren (z.B. TRANSIT, CICADA, GLONASS, NAVSTAR GPS)

Die in der Luftfahrt üblichen und allgemein verfügbaren Navigationssysteme für die Bildflugnavigation können sich nicht durchsetzen. Hauptgründe dafür sind die nicht ausreichende Genauigkeit, hoher finanzieller Aufwand und schwierige Handhabung. Mit GPS steht nun aber ein erstes Navigationssystem auf der Basis der Pseudoentfernungsmessung im P- oder C/A-Code zur Verfügung, das in Echtzeit den Anforderungen der photogrammetrischen Bildflüge nach kostengünstiger Flugabwicklung und Bildaufnahme genügt. Mit Hilfe der in folgender vereinfachter Gleichung

$$r_i = |\mathbf{X}_i - \mathbf{X}_E| + c \cdot \Delta t$$

$$r_i = \sqrt{(X_i - X_E)^2 + (Y_i - Y_E)^2 + (Z_i - Z_E)^2} + c \cdot \Delta t$$

$$i = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

gegebenen Formel werden die dreidimensionale Position des Empfängers sowie dessen Uhrfehler bestimmt. Dies ist eine Auswerteaufgabe in Echtzeit, die vereinfacht auch als "dreidimensionaler Bogenschlag" bezeichnet werden kann.

Im Jahr 1990 hat die Gesellschaft für Technische Photogrammetrie (GTP) in Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen (IPI) einen Bildflug über dem Gebiet des WURSTER WATTs mit GPS durchgeführt. Dieses Gebiet, das bei Ebbe trockenfällt und durch die Meeresströmungen ständigen Veränderungen unterliegt, befindet sich vor der deutschen Nordseeküste. Es wurde ein HONEYWELL ELAC 8800 GPS-Empfänger mit C/A-Code für die Bildflugnavigation eingesetzt. Aus den Absolutmessungen mit C/A-Code werden 11 Parallelstreifen und drei Querstreifen des Fluges durch GPS-gestützte Navigation in Echtzeit so angelegt, daß gerade so viel Überdeckung bei den 236 Bildern erzielt wird, wie man für eine lückenlose photogrammetrische Auswertung unbedingt braucht [Jacobsen, 91].

Eine Einschränkung der ständigen Verfügbarkeit des operationellen GPS ist beschlossene Sache in den USA, wobei die Möglichkeit besteht, die Systemgenauigkeit im Standard Positioning Service (C/A-Code) durch künstlich erzeugte Schwankungen des Uhrensinals und durch eine Manipulation der Ephemeridendaten zu reduzieren. Dadurch wird bei aktivierter S/A das Genauigkeitsniveau auf ca. 100 m reduzieren. Eine weiterentwickelte Form von GPS, das Differential GPS, kurz DGPS, ermöglicht eine sehr viel exaktere dreidimensionale Navigation [Hein, Laudau, 92] – auch unter S/A Bedingungen. Die Navigation mit DGPS basiert auf dem Standard GPS Prinzip, das um entsprechende Verfahren erweitert wurde. Die Voraussetzung dazu ist bei allen DGPS-Verfahren eine Funkverbindung zwischen Referenzstation und Nutzer. Bezüglich der Beschreibung des DGPS-Systems der DGPS- Methoden sowie der Einzelheiten der möglichen Wellenlängen zur Herstellung der Datenstrecke wird hier auf die Publikationen des ersten DGPS-Symposiums im September 1991 in Braunschweig verweisen [DGPS91].

3 Positionsbestimmung der Meßsensoren im Flugzeug durch NAVSTAR GPS

Wie bereits ausgeführt wurde, besteht bei der GPS- Bildflugnavigation die Forderung, daß die gezielte Befliegung und Bildaufnahme on-line in Echtzeit mit entsprechender Genauigkeitsanforderung mit Codephasenmessungen durchgeführt werden soll. Dagegen ist eine Echtzeitlösung bei der GPS- Kamerapositionierung nicht wesentlich, d.h. GPS-Beobachtungen in kinematischen Modus können off-line im Post-processing zu Positionswerten führen. Aber die wirklichen Fehlereinflüsse, die bei der Navigationslösung nicht genug berücksichtigt oder vernachlässigt werden, sollen so vollständig wie möglich mit geeigneten Maßnahmen kompensiert und eliminiert werden, um das volle Genauigkeitspotential von GPS bei einer kinematischen Kamerapositionierung auszuschöpfen. Wie in [Seeber, 89] erwähnt, hängt die erreichbare Genauigkeit der kinematischen GPS-Positionierung von zwei Faktoren ab, nämlich von der geometrischen Satellitenkonstellation PDOP und von der Genauigkeit einzelner Pseudoentfernungsmessungen. Für hochpräzise GPS- Positionierung wird vorausgesetzt, daß zwei Empfänger kontinuierlich die Trägerphase von wenigstens vier Satelliten erfassen, von denen der eine stationär möglichst im Fluggebiet oder in der Nähe auf einem bekannten Punkt installiert sein sollte, während sich der andere während des Meßvorgangs im Flugzeug befindet.

In der Standardformulierung der Pseudoentfernungsmessung:

$$PR_{CR} = R + \Delta R + C \cdot \Delta T - c \frac{N}{f_{CR}} + \epsilon_R$$

$$C\Delta T = c\Delta t_{iono} + c\Delta t_{trop} + c\Delta t_{rela} + c\Delta t_s + c\Delta t_u \quad (2)$$

können Satellitenbahnfehler und Zeitfehler, Verzögerungen der Ausbereitung einschließlich des relativistischen Laufzeiteffektes und zusätzlicher Effekte zusammengefaßt werden. Dabei kann die Mehrdeutigkeitslösung als Kernpunkt für präzise photogrammetrische Aufgaben gesehen werden. Seeber [Seeber, 91] diskutiert drei unterschiedlichen Algorithmen aus praktischen Anwendungen, die eine sichere Lösung der Mehrdeutigkeiten während des Meßvorganges nach sehr kurzer Meßzeit im statischen Modus oder kinematischen Modus unterwegs zulassen.

Um eine hohe Genauigkeit für eine Meßsensor-Positionsbestimmung zu erreichen, müssen einige äußere Einflüsse in Verbindung mit der nachträglichen Verarbeitung berücksichtigt werden [Dorrer, 88], wie z.B. eine räumliche Exzentrizität zwischen Projektionszentrum des Meßsensors und GPS-Antenne sowie zeitlicher Versatz des GPS- Messungszeitpunkts und des Belichtungsmoments.

3.1 Durchgeführte Flugexperiment BLUMENTHAL (1988)

Der Bildflug vom Gebiet BLUMENTHAL wurde am 30.8.88 in Zusammenarbeit mit dem Institut für Erdmessung (IFE) durchgeführt. Die GPS-Satelliten 3, 11, 12 und 13 in der damaligen Satellitenkonfiguration (Abb. 1) wurden in zeitlichen Abständen von 1.2 Sekunden beobachtet. Parallel zu den GPS- Beobachtungen mit TI4100-Empfänger wurden innerhalb der fünf Streifen mit einer von IPI modifizierten Luftbildkamera RMK 15/23 Luftbilder in einem zeitlichen Abstand von durchschnittlich 4.5 Sekunden aufgenommen. Eine wesentliche Voraussetzung für die Bestimmung genauer Meßkammer-Positionen aus GPS-Beobachtungen ist die Verfügbarkeit geeigneter, umfassender und zu zuverlässiger Auswertesoftware. Die TI4100 Beobachtungen wurden vom IFE mit dem modifizierten Programmsystem GEONAP(GEOdetic NAVSTAR Positioning Package) ausgewertet [Wübbena, 89]. Der Grundgedanke liegt in der Ausnutzung von Linearkombinationen der Trägerphasen mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften und Wellenlängen in undifferenzierter Modellierung. Im Zug der Datenauswertung erhält man die jeweils erkannten Mehrdeutigkeiten für die unterschiedlichen Trägerphasenkombination sowie die entsprechenden Informationen zur Cycle Slip-Behandlung. Eine notwendige Unbekanntenreduktion wird neben einer Erkennung der Cycle Slips gleichzeitig durchgeführt. In der Regel werden 90% der vorhandenen Cycle Slips erkannt und beseitigt. Die Mehrdeutigkeiten können über die Differenzphase (wide lane) und die Summenphase (narrow lane) in Kombination mit den Codemessungen bestimmt werden. Anschließend bearbeitet das Programm GEONAP diese Linearkombinationen bis hin zur ionosphärenfreien Lösung in Form von geozentrischen, kartesischen Koordinaten mit der zugehörigen Kovarianzmatrix als Ergebnis der jeweiligen Positionierung. Für den Bildflug BLUMENTHAL führte die reine GPS Lösung zu einer inneren Genauigkeit der dreidimensionalen Positionsbestimmung von etwa ± 5 cm.

Zum völlig unabhängigen Vergleich der kinematisch bestimmten GPS- Positionen erfolgte eine Bündelblockausgleichung ohne Nutzung dieser GPS-Daten. Die geschätzten Standardabweichungen der Projektionszentren $S_{xo} = \pm 4.2$ cm, $S_{yo} = \pm 4.0$ cm und $S_{zo} = \pm 1.6$ cm, berechnet im Programmsystem BLUH (Bündelblock ausgleichung Universität Hannover), repräsentierten die Genauigkeit auf der Basis der konkret vorliegenden Strahlengeometrie des Testblockes "BLUMENTHAL". Die photogrammetrisch ermittelten Werte können somit, mit Ausnahme konstanter Fehlerauswirkungen der inneren Orientierung [Jacobsen, Li, 90], als ausreichend genaue Referenz angesehen werden. Nach der Berücksichtigung der räumlichen Exzentrizität zwischen der Antennenposition und der Lage des Projektionszentrums wurden die dreidimensionalen Differenzen in Abbildungen 2(a,b,c) gezeigt.

Außer der o.g. räumlichen Exzentrizität gibt es noch einem zeitlichen Versatz zwischen dem durch den geöffneten Kameraverschluß definierten Belichtungszeitpunkt und dem Zeittakt des GPS-Empfängers. Die Zeitpunkte des effektiven Beginns der Belichtungszeiten wurden für die Aus-

wertung mittels einer UTC- Zeiterfassungsanlage, die eine geschätzte Genauigkeit von ± 1 ms basaß, an die GPS-Beobachtungsepochen off-line gekoppelt. Diese Technik bildet die Grundlage für die Interpolation der in den 1.2 Sekunden-Intervallen ermittelten Flugzeug- Antennenpositionen entsprechend der registrierten Aufnahmezeit der Luftbildkamera durch Kalman-Filter. Nach Berücksichtigung des zeitlichen Versatzes wurde die dreidimensionalen Differenzen in Abbildung 3 dargestellt. Ein zeitabhängiger Trend der Differenzen zwischen den Projektionszentren und den GPS-Positionen ist in dieser Abbildung nicht erkennbar. Nach der Kompensation der beschriebenen systematischen Abweichung aus dem Prozeß der Ausgleichung ergaben sich die in Tab. 2 streifenweise zusammengestellten quadratischen Mittelwerte der verbleibenden Differenzen zwischen beiden Datensätzen.

Tab. 2 Quadratische Mittelwerte der Differenzen zwischen den GPS- Daten und den Werten aus der Aerotriangulation

mittl. quadrat. Abweichung nach Abspaltung der syst. Anteile (m)			
Streifen	$\pm S_x$	$\pm S_y$	$\pm S_z$
1	0.26	0.12	0.10
2	0.15	0.17	0.10
3	0.17	0.16	0.09
4	0.14	0.26	0.08
5	0.14	0.21	0.14
Mittelwert	0.18	0.19	0.10

Zusammengefaßt erlaubt der Vergleich eine Aussage über die Genauigkeit der kinematischen Positionsbestimmung mit GPS, wobei ein großer Anteil der Diskrepanzen auf das im Rahmen des Experimentes nicht optimal gelöste räumliche und zeitliche Zentrierungsproblem zwischen GPS-Antenne und Aufnahmezentrum zurückzuführen ist. Das Testmaterial gestattet damit die Analyse und die absolute Überprüfung der kinematischen GPS-Daten auf einem hohem Genauigkeitsniveau, das den Erfordernissen der Aerotriangulation entspricht.

3.2 Durchgeführte Flugexperiment RHEINKAMP (1989)

Die im Testgebiet BLUMENTHAL eingesetzten Empfänger TI4100 ermöglichen lediglich den gleichzeitigen Signalempfang von bis vier Satelliten. Mit zunehmendem Ausbaugrad des GPS-Raumsegmentes stehen jedoch häufig weit mehr als vier Satelliten gleichzeitig über dem Horizont. Bei Verwendung von mehr als vier Satelliten kann die Positionslösung mit überschüssigen Beobachtungen stabilisiert werden, und nach kürzerer Zeit kann die Mehrdeutigkeitsbestimmung erfolgen. Während des Bildfluges treten Signalverluste durch die mehr oder weniger unregelmäßige Bewegung des Meßflugzeuges und andere Effekte viel häufiger auf als bei statischen Vermessungen.

Das zweite Meßprojekt "RHEINKAMP" wurde am 29.7.1989 unter verbesserten Bedingungen wieder in Zusammenarbeit mit dem IFE wiederholt, wobei die Verknüpfung von zwei TI4100 Empfänger an einer Antenne und möglichst zeitglei-

che GPS-Messungen mit den Belichtungen wesentlich im Vordergrund standen. Beobachtet wurde in der Zeit von 8:07 - 9:43 UT mit den Satelliten. Zwei TI4100 Empfänger wurden an einer Antenne mit einem Powersplitter (Abb. 4, [Goldan, 91]) zur gleichzeitigen Beobachtung von mehr als vier Satelliten verknüpft, um die Freiheitsgrade der Positionslösung für die relative Genauigkeit zu erhöhen und die kinematische Kamera-Positionsbestimmung auch bei Verlust eines Satelliten zu garantieren. Deshalb wurde der Bildflug mit insgesamt vier Empfängern durchgeführt, von denen zwei als Bodenstation auf einem Referenzpunkt innerhalb des Blockes und die andere zwei an Bord positioniert waren. Die Belichtungspunkte der Kamera und die GPS-Messungen wurden weitgehend synchronisiert.

Wegen technischer Schwierigkeiten aufgrund eines Oszillatordefektes in einem Empfänger an Boden kann es leider zu Störungen des Signalempfanges, so daß die Empfänger nicht erwartungsgemäß funktionierten. Die Flugzeugdaten zeigen die meisten Cycle Slips während des Kurvenfluges, wohingegen während der geflogenen Profile brauchbare Ergebnisse für photogrammetrischen Zwecke vorliegen. Die Referenzstation zeigt für einen Empfänger eine geringe Anzahl von Cycle Slips, die durch Kassettenwechsel hervorgerufen sind. Der anderer Empfänger stellte schlechte Daten bereit, die für fast jede Meßepoche einen Cycle Slip besitzen und nur in selten Fällen überhaupt vier Satelliten gleichzeitig beinhalten.

Das IFE hat hierbei auftretende Probleme in der technischen Realisierung sowie im mathematischen Modell, das sowohl für stationäre als auch für kinematische Beobachtungen anwendbar ist, bearbeitet und ein Programm RXJOIN (RINEX-JOIN) zur Verknüpfung der im RINEX-Format vorliegenden Beobachtungsdaten [Goldan, 91] erstellt. Der Grundgedanke ist, daß zunächst die für beiden Empfänger zu unterschiedlichen Zeitpunkten empfangenen GPS- Satellit signale eine rechnerische Korrektur auf eine gemeinsame Empfangsepochen erfordern. Dazu muß in beide Empfänger mindestens ein gemeinsamer Satellit zur zeitlichen Transformation beobachtet werden, und die Phasenbeziehung darf über den betreffenden Zeitraum nicht verloren gegangen sein. Datenausfälle können somit entscheidend verringert werden. Abb. 5 zeigt, daß die Bestimmung der Transformationsparameter mit dem in beiden Empfängern und beobachteten identischen Satelliten 12 erfolgt. So kann ein quasi Zweifrequenz-P-Code Empfänger mit maximal 7 Kanälen zur Verfügung stehen. Das Meßrauschen im kinematischen Modus hat sich im Vergleich zu stationären Messungen für die Codestrecken zu etwa 1.0 m und für die Trägerphasen auf L1 mit ca. 1.6 mm verdoppelt. Für die Trägerphasen auf L2 ist demnach das Meßrauschen mit ca. 3.4 mm angestiegen (s. Tab. 3).

Tab. 3 Ergebnisse für alle Meßgrößen

Station	Meßzeit t (min)	Anzahl (ident. Satel.)	S_{p1} (m)	S_{p2} (m)	S_{L1} (mm)	S_{L2} (mm)
statis. Station	120	1- 3	1.09	1.61	4.1	6.2
kinem. Flugzeug	120	2- 3	0.86	1.00	1.6	3.4

Auf die Auswertung der kinematischen GPS-Daten in diesem Testgebiet mit dem Softwarepaket GEONAP wird nicht eingegangen. Als Vergleichswerte für die entsprechenden GPS-Positionierungen dienen die Koordinaten aus der hochgenauen Bündelblockausgleichung. Die beim Testflug benutzte Rheinmeßkamera RMK 30/23 verfügt ebenso wie die RMK 15/23 (in Testgebiet BLUMENTHAL) über einen Rotationslamellenverschluß, durch den eine Varianz zwischen Belichtungszeit und Auslösungszeit eintritt. Die Abhängigkeit der durch die Diode registrierten Belichtungszeit von der Objekthelligkeit für diesen Bildflug konnte eliminiert werden, indem die Diode von der Bildebene in die Verschlußebene verlegt wurde. Neben der genauen Messung der räumlichen Exzentrizität zwischen GPS-Antenne und Kamera-Projektionszentrum wurde der Einfluß der Kameraralage während der Befliegung berücksichtigt. Mit einer auf dicht verteilten Paßpunkte gestützten Aerotriangulation dieses Bildverbandes konnten die wahren Koordinaten der Aufnahmeorte mit einer Genauigkeit von $S_{x0} = \pm 4.7$ cm, $S_{y0} = \pm 4.7$ cm und $S_{z0} = \pm 1.2$ cm bestimmt werden. In Abbildung 5 sind Koordinatendifferenzen der Projektionszentren zwischen den aus der Bündelblockausgleichung hervorgegangenen Daten und den aus GPS-Einzelstationslösungen gewonnenen Daten dargestellt. darin sind systematische Effekte noch streifenweise ersichtlich.

Abbildung 6 stellt den Drifteinfluß und die Genauigkeitssprünge in den Projektionskoordinaten dar, die durch Cycle Slips besonders in Kurvenflügen verursacht sind. Die wichtigsten empirischen Ergebnisse der absoluten GPS-Positionierung für den Bildflug RHEINKAMP sind in Tabelle 4

Tab. 4 Genauigkeit der GPS-Navigationslösung für das Flugzeug mit Trägerphasen geglätteter Codestrecken

Quadratmittel der Differenzen in den Koordinaten der Projektionszentren (m)			
Bemerkung	$\pm S_x$	$\pm S_y$	$\pm S_z$
Verschiebungskorrektur	0.30	0.23	0.28
Verschiebungs- und Driftkorrektur	0.19	0.13	0.22
Relative Genauigkeit (benachbarten Projektionszentrum)	0.11	0.09	0.09

zusammengestellt. Sie geben die Genauigkeiten in Form quadratischer mittlerer Abweichungen der Einzelstationslösung mit GPS von den "Sollwerten" der Meßkamera RMK 30/23 im Flugzeug wieder, und zwar getrennt für zwei Stufen der nachträglichen Korrektur systematischer Positionierungsfehler.

4 Zusammenfassung

Die im Rahmen dieser Arbeit benutzte Positionsmethode mit GPS wurde in verschiedener Form dazu herangezogen, für die Aufnahmeorte der Meßkamera in der raschen Bewegung die exzentrischen Projektionszentrenkoordinaten zu bestimmen. Diese Koordinaten wurden anschließend mit den völlig unabhängig ermittelten Aufnahmeorten aus der konventionellen Bündelblockausgleichung verglichen. Der Vergleich erlaubt auch eine Aussage über das Genauigkeitspotential der kinematischen GPS-Positionsbestimmung, wobei ein Anteil der Abweichungen auf das im Rahmen der Testflüge nicht optimal gelöste Hardwareproblem (z.B. räumliche Zentrierung und zeitlicher Versatz zwischen GPS-Antenne und Aufnahmezentrum) zurückzuführen ist. Im übrigen sind in allen Differenzkomponenten noch die Ungenauigkeiten der unabhängigen Vergleichswerte der Kamerapositionen und Diskrepanzen der wahren Flugbewegung von der Interpolation zwischen den GPS-Positionen enthalten.

Die Verknüpfung zweier TI4100 Empfänger, die über einen Powersplitter an einer gemeinsamen Antenne betrieben werden, hat bei der Nutzung der vorhandenen alten GPS-Empfänger für die Auswertung der kinematischen Meßprojekte große Bedeutung, da die Meßdaten eines simulierten 7-Kanal-Zweifrequenzempfängers mit P-Code nach der Verknüpfung vorliegen. Die Navigationslösung mit Trägerphasen geglätteter Codestrecken liefert eine gute relative Genauigkeit der dreidimensionalen Koordinaten zueinander: $S_{Xrel} = \pm 0.11$ m, $S_{Yrel} = \pm 0.09$ m, $S_{Zrel} = \pm 0.09$ m, was von der kombinierten Bündeltriangulation mit GPS-Daten als Voraussetzung gefordert wird.

Die im Testgebiet BLUMENTHAL erzielt hohe Genauigkeit hat gezeigt, daß die Entwicklung zuverlässiger Meßverfahren und GPS-Auswertelgorithmen, insbesondere zu Mehrdeutigkeitslösungen, unbedingt notwendig war. Eine entscheidende Maßnahme zur Genauigkeitssteigerung, besonders bei Verschlechterung von GPS durch S/A und A/S-Technik [Seeber, 91], ist, daß immer differentiell gemessen werden muß. Zur hochgenauen kinematischen Kamera-Positionsbestimmung wurde die vom IFE entwickelte GPS-Software durch eine wichtige Innovation im Hinblick auf Signalausfall, d.h. zu Mehrdeutigkeitsbestimmung in der Bewegung modifiziert. Diese Methode der "Code/Träger-Kombination" basiert auf einer schnellen Suche mit einer völlig neuartigen Methode Extra Wide Laning, bei der unter Nutzung der ionosphärischen Ausbreitungseigenschaften und bestimmter Symmetriebedingungen die Wellenlänge der bekannten (Wide Lane) ($L1-L2 = 86$ cm) auf das Doppelte ($2(L1-L2) = 172$ cm) vergrößert werden kann. Dieses Verfahren führt im kinematischen Modus, wie [Seeber, Wübenna, 8] am Beispiel von Testflugdaten in BLUMENTHAL überzeugend nachweisen, bereits nach kurzer Zeit zu einer sicheren Mehrdeutigkeitslösung. Die Ergebnisse des Experiments mit hohem absoluten Genauigkeitsniveau $S_x = \pm 0.18$ m, $S_y = \pm 0.19$ m, $S_z = \pm 0.10$ m lassen erkennen, daß die erreichte Genauigkeit den Erfordernissen der Aerotriangulation entgegenkommt und kontinuierliche dreidimensionale Kamerapositionsbestimmung auf dem Zentimeterniveau mit GPS möglich sein wird.

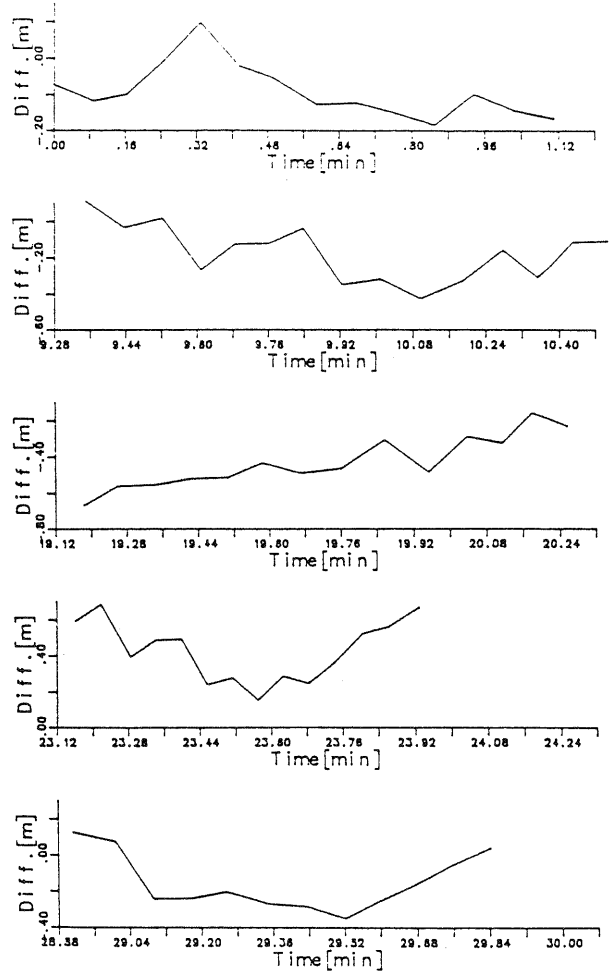
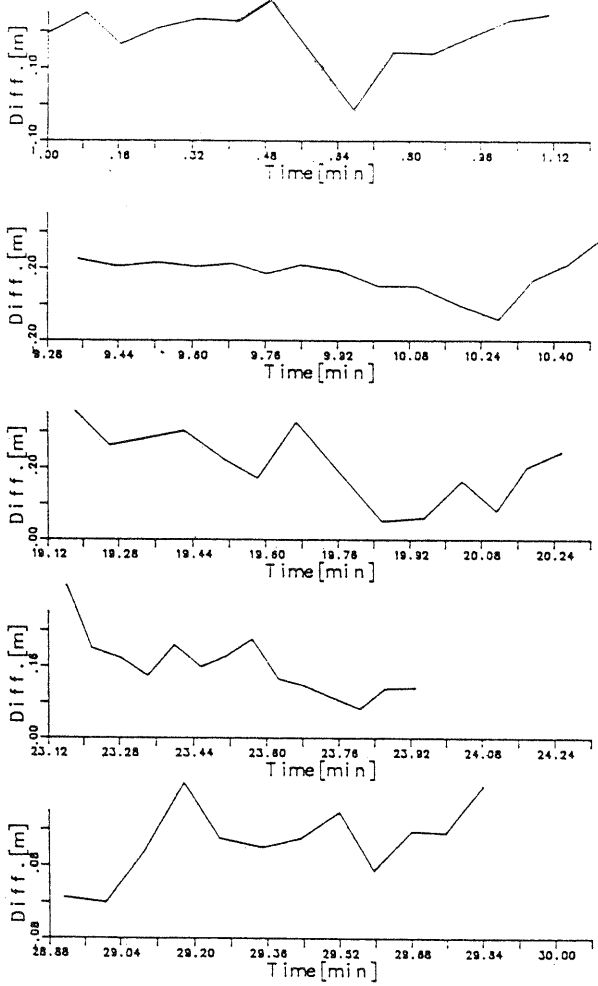
5 Danksagung

Herrn Prof.Dr. G. Konecny, Dr. K. Jacobsen und Herrn Prof.Dr. G. Seeber sind besonders für die Betreuung der Forschungsarbeit in Hannover zu danken. Ihre hilfreiche Unterstützung hat entscheidend zum Gelingen der Untersuchungen beigetragen. Kollegen vom IPI und IFE danke ich herzlich für die tatkräftige Förderung und die wertvolle Mithilfe.

Literatur

- [DGPS91] DGPS91 (1991): First International Symposium Real Time Differential Applications of the Global Positioning System, Volume I; Volume II, Braunschweig.
- [Dorrer, 88] Dorrer, E. (1988): GPS-gestuetzte Aero-triangulation –Grundlegendes und Experimente. VRK/MPG, Vol. 86/11.
- [Goldan, 91] Goldan, H-J. (1991): Untersuchungen zur Verknüpfung von zwei TI4100 GPS Empfängern zur gleichzeitigen Beobachtung von mehr als vier Satelliten. Diplom-Arbeit an der Universität Hannover.
- [Hein, Laudau, 92] Hein, G.W.; Laudau, H. (1991): A System for precise real-time differential GPS Positioning in the decimeter Range. Presented at the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning. Columbus, Ohio, USA.
- [Herms, 91] Herms, P. (1991): Einsatz von CCNS/GPS und RMK TOP. Proc. of the 43. photogrammetric Week at Stuttgart University.
- [Jacobsen, Li, 90] Jacobsen, K.; Li, K. (1990): Bundle Block Adjustment using Kinematic GPS Positions. ISPRP Com. I Manaus.
- [Jacobsen, 91] Jacobsen, K. (1991): Trends in GPS Photogramtry. ASPRS 1991.
- [Seeber, 89] Seeber, G. (1989): Satellitengeodäsie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- [Seeber, Wübbena, 89] Seeber, G.; Wübbena, G. (1989): Kinematic Positioning with Carrier Phase and (On the Way) Ambiguity Solution. Proceedings of the Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Las Cruces, New York.
- [Seeber, 91] Seeber, G. (1991): Konzepte und Einsatzmöglichkeiten fuer die kinematische Nutzung von GPS. 25. DVW-Seminars, Hannover.
- [Wübbena, 89] Wübbena, G. (1989): The GPS Adjustment Software Package - GEONAP - Concept and Models. Proceedings of the Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Las Cru-

A: Differenzen in X-Richtung (5 Streifen)



B: Differenzen in Y-Richtung (5 Streifen)

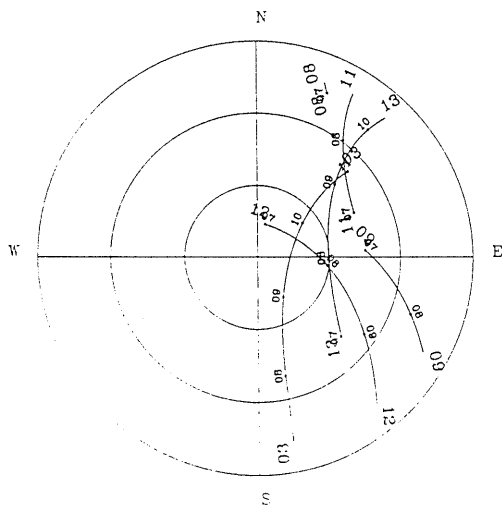
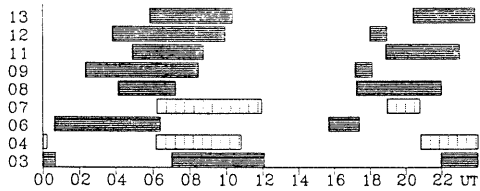


Abb.1 GPS-Satellitenkonstellation für den Bildflug im Testgebiet BLUMENTHAL

Abb. 2 Differenzen zwischen der kinematischen GPS-Positionierung und den photogrammetrisch bestimmten Projektionszentren nach Berücksichtigung der räumlichen Exzentrizität

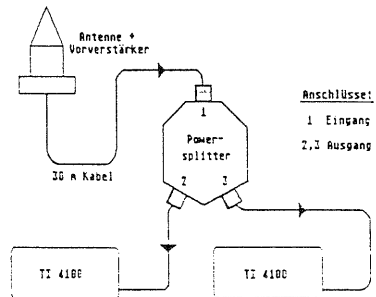


Abb. 4 Beschaltung des Powersplitters

C: Differenzen in Z-Richtung (5 Streifen)

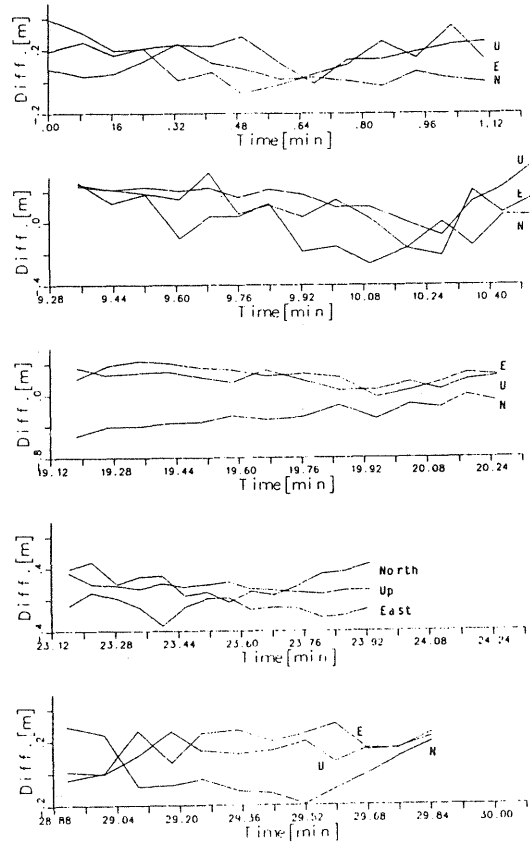
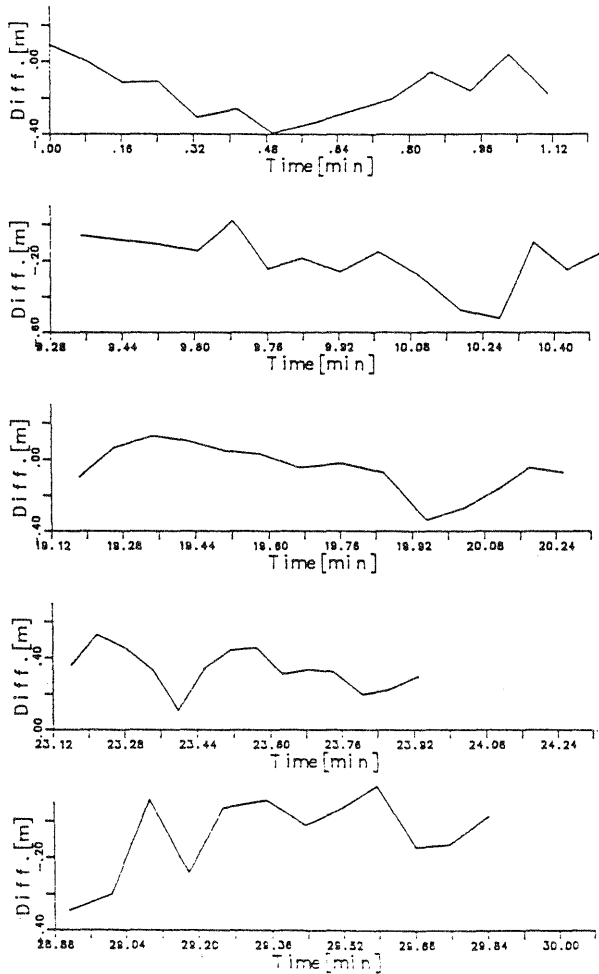


Abb. 3 Differenzen zwischen der kinematischen GPS-Positionierung und den photogrammetrisch bestimmten Projektionszentren nach Berücksichtigung der räumlichen Exzentrizität und dem zeitlichen Versatz

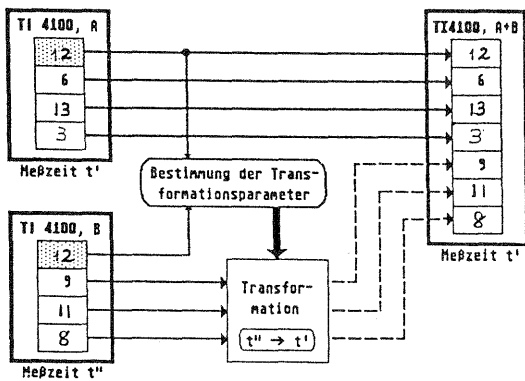


Abb. 5 Transformation mit dem identischen Satelliten 12 für Empfänger an Bord (Beispiel in Testgebiet RHEINKAMP)

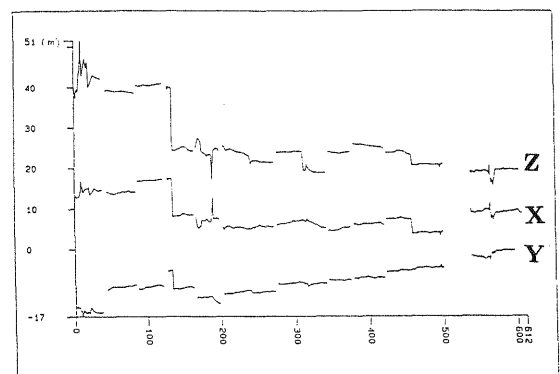


Abb. 6 Koordinatendifferenzen der Projektionszentren zwischen Bündelblockausgleichung und GPS-Navigationslösung mit Trägerphasen geglätteter Codestrecken (GPS-Einzelstationslösung)

horizontal : Bildreihenfolge, vertikal : Differenzen (m)