

WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN  
DER FACHRICHTUNG VERMESSUNGSWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER

ISSN 0174 - 1454

---

Nr. 225

MARTIN SCHMITZ

Untersuchungen zur strengen GPS Parametrisierung  
in der gemeinsamen Ausgleichung von  
kinematischem GPS und Aerotriangulation

---

HANNOVER 1998



WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN  
DER FACHRICHTUNG VERMESSUNGSWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER

ISSN 0174 - 1454

---

Nr. 225

Untersuchungen zur strengen GPS Parametrisierung  
in der gemeinsamen Ausgleichung von  
kinematischem GPS und Aerotriangulation

Vom Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen  
der Universität Hannover  
zur Erlangung des Grades

DOKTOR - INGENIEUR

genehmigte Dissertation  
von

Dr.-Ing. Martin Schmitz

HANNOVER 1998

---

Referent:  
Korreferent:  
Tag der Promotion:

Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber  
Prof. Dr.-Ing. mult. Gottfried Konecny  
4. Februar 1998

---

## Zusammenfassung

In der Aerotriangulation wird das Satellitenmeßverfahren GPS für unterschiedliche Aufgaben eingesetzt. Die Bestimmung von Paßpunkten am Boden, die Navigation von Bildflügen, die Bestimmung von Aufnahmeort und -orientierung sind Bereiche, in denen GPS bei vergleichbaren oder besseren Genauigkeiten wirtschaftlicher als herkömmliche Verfahren arbeitet und Einsparungen in kostenintensiven Arbeitsschritten einer Aerotriangulation leisten kann. Einen wesentlichen Gewinn stellt die Reduzierung der benötigten Paßpunkte dar, wenn die Aufnahmeorte einer Aerotriangulation mit GPS bestimmt und als Luftpaßpunkte in die Blockausgleichung eingeführt werden. Schwierigkeiten bei der Verknüpfung von GPS und Blockausgleichung können durch systematische Fehler der GPS Koordinaten entstehen.

Gegenwärtig werden zur Behandlung von systematischen GPS Koordinatenfehlern, die durch fehlerhaft festgesetzte Mehrdeutigkeiten und Phasensprünge verursacht werden, konstante (Shift) und zeitabhängige Korrekturen (Drift) eingesetzt. Dies entspricht nicht den tatsächlichen physikalischen Bedingungen des GPS und stellt somit ein Näherungsverfahren dar. Umfangreiche empirische Untersuchungen haben die grundsätzliche Funktionalität des auch als Shift- und Drift-Ansatz bezeichneten Verfahrens gezeigt. Eine strenge GPS Parametrisierung wurde bisher nicht untersucht oder verwendet.

Eine strenge Modellierung der systematischen GPS Koordinatenfehler ist auf einfache Weise möglich. Es wird ein Verfahren aufgezeigt, das aus allgemein verfügbaren Daten der GPS Auswertung die geometrische Information zur Schätzung von Streckenkorrekturen bzw. Mehrdeutigkeitstermen in der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung bereitstellt. Unter Verwendung des korrekten funktionalen Modells der GPS Auswertung werden Koordinatenverbesserungen aus Streckenverbesserungen zu GPS Satelliten bestimmt und implizit in der gemeinsamen Blockausgleichung berücksichtigt.

Anhand von simulierten systematischen GPS Fehlern wird das Potential der strengen GPS Parametrisierung in der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung durch Vergleich mit den bekannten Shift- und Drift-Ansätzen aufgezeigt. Bei einer Reduzierung der Querüberdeckung von 60% auf 20% kann der strenge Ansatz die fehlende photogrammetrische Verknüpfung des Blockes durch die in einem einheitlichen Referenzsystem definierten GPS Koordinaten der Aufnahmezentren ersetzen. Die Shift- und Drift-Parameter sind im allgemeinen streifenweise anzusetzen, wodurch die nachbarschaftliche Genauigkeit der GPS Koordinaten einzelner Streifen nicht mehr gegeben ist. Für eine Querüberdeckung von 60% ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen.

Ein Vergleich der Ergebnisse zweier operationeller Datensätze mit ungelösten Mehrdeutigkeiten zeigt kritische Aspekte der strengen Modellierung auf. Grundvoraussetzungen sind die genaue Kenntnis der Antennenexzentrizität und ihrer zeitlichen Änderungen für den gesamten Block, die in der Praxis nicht immer gegeben ist. Gleichzeitig können sich Einflüsse aus der photogrammetrischen Auswertung ergeben. Die Shift- und Drift-Ansätze zeigen sich dagegen als sehr robust gegenüber nicht erfaßten systematischen Fehlern. Ein operationeller Einsatz der strengen GPS Parametrisierung macht deshalb die strenge Formulierung sämtlicher systematischer Fehler in der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung notwendig.

Die bestimmten Streckenkorrekturen in der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung entsprechen den Mehrdeutigkeitstermen der GPS Auswertung. Das Genauigkeitspotential der Aerotriangulation läßt den umgekehrten Weg, die Bestimmung von Mehrdeutigkeiten und deren Rücksitution in die GPS Auswertung grundsätzlich zu. Anhand von künstlich eingeführten Mehrdeutigkeiten in einer GPS Auswertung wird das Verfahren getestet.

Der vorgestellte Ansatz zur strengen GPS Parametrisierung in der gemeinsamen Blockausgleichung stellt eine Alternative zu den bisherigen Shift- und Drift-Ansätzen dar und zeigt durch die mögliche Reduzierung von Befliegungstreifen eine weitere wirtschaftliche Optimierung der Aerotriangulation auf.

Schlagwörter: Global Positioning System (GPS), photogrammetrische Blockausgleichung, gemeinsame Ausgleichung

---

## Summary

In aerotriangulation satellite surveying with GPS is used for different tasks. The survey of control point coordinates on the ground, the navigation of photo flight missions, the determination of exposure centers and orientations are applications, where GPS provides comparable or better accuracy than conventional methods and the economy of GPS reduces the costs of current procedures in aerotriangulation. The major aspect is the reduction of the number of ground control points, if the exposure centers are observed by GPS and are introduced as airborne control points in the photogrammetric block adjustment. However, systematic errors in the GPS coordinates may cause some uncertainties in the combination of GPS and block adjustment.

Currently, constant (shift) and time dependent corrections (drift) are used to account for the systematic GPS coordinate errors, which are caused by false ambiguity resolution. This approach does not respect the physical GPS model and is therefore an approximate method. The so-called shift and drift approach has demonstrated its general functionality in extensive empirical investigations. A rigorous GPS parametrisation has yet not been investigated or tried.

A rigorous model for systematic GPS coordinate errors is easily implemented. A new approach is developed, which uses generally available information from a GPS evaluation to estimate range corrections, i.e. ambiguity terms in the combined GPS block adjustment. Using the correct functional model of GPS the range correction are transferred into coordinates corrections, which are implicitly applied in the block adjustment.

The potential of the rigorous GPS parametrisation is demonstrated using simulated systematic errors in the GPS data by comparing the results with the known shift and drift approaches. The rigorous model is capable to substitute the missing photogrammetric constraints while reducing the side lap from 60% to 20% by the use of GPS coordinates, which are defined in a homogeneous reference system for the complete block. The shift and drift parameter are generally applied per strip. Therefore the relative accuracy between strips is not maintained. Both approaches show no significant differences in the case of 60% side lap.

The analysis of two operational data sets, which include unresolved ambiguities show some critical aspects of the rigorous model. Pre-requisite are the knowledge of the antenna eccentricity and its temporal changes for the complete block, which is not always accessible. There are also some influences from the photogrammetric data processing. The shift and drift approaches are very robust against not explicitly known systematic errors. An operational use of the rigorous GPS parametrisation requires the functional modeling of all systematic errors in the combined GPS/block adjustment.

The estimated range corrections in the combined GPS/block adjustment correspond to the ambiguity terms of the GPS evaluation. The accuracy level of aerotriangulation generally enables a procedure, to determine ambiguities and introduce them again into the GPS processing. The procedure is tested, while estimating artificial ambiguities in the block adjustment.

The presented approach of a rigorous GPS parametrisation in a combined GPS block adjustment is an alternative method to the currently used shift and drift approaches. It indicates the possible reduction of flying strips for a further economical improvement of aerotriangulation.

Keywords: Global Positioning System (GPS), photogrammetric block adjustment, combined adjustment

---

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung/Summary .....	i
Inhaltsverzeichnis .....	iii
Abkürzungsverzeichnis .....	iv
1. Einleitung und Zielsetzung .....	1
2. Verfahren und aktueller Status .....	9
2.1 Global Positioning System (GPS) .....	9
2.2 Aerotriangulation/Photogrammetrische Blockausgleichung .....	16
2.3 Einsatz von GPS in der Aerotriangulation und GPS gestützte Blockausgleichung .....	20
3. Grundlagen und Einflußparameter .....	25
3.1 Koordinatensysteme .....	25
3.2 Geoid .....	27
3.3 Datumparameter .....	28
3.4 Interpolation der GPS Koordinaten .....	29
3.5 Antennenexzentrizität .....	32
4. Analyse systematischer GPS Koordinatenfehler .....	35
5. Mathematische Modelle .....	43
5.1 Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (Gauß-Markov Modell) .....	43
5.2 Beobachtungsgleichung der GPS Auswertung .....	45
5.3 Beobachtungsgleichung der Bündelblockausgleichung .....	49
5.4 Struktur der Blockausgleichung .....	51
6. GPS Modellierung in der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung .....	55
6.1 Modellierung der Äußeren Orientierung im Bildraum .....	56
6.2 Auswertemodell des Shift- und Drift-Ansatzes .....	59
6.3 Auswertemodell der strengen GPS Parametrisierung .....	63
7. Erprobung der Modelle .....	71
7.1 Erprobung der Modelle mit simulierten systematischen GPS Fehlern .....	74
7.1.1 Blockausgleichung Datensatz Warberg .....	74
7.1.1.1 Untersuchung mit verfälschten Daten und 60% Querüberdeckung .....	79
7.1.1.2 Untersuchung mit verfälschten Daten und 20% Querüberdeckung .....	82
7.2 Erprobung der Modelle mit realen Daten .....	83
7.2.1 Blockausgleichung Datensatz Groß Ösingen .....	84
7.2.1.1 Untersuchung mit 60% Querüberdeckung .....	84
7.2.1.2 Untersuchung mit 20% Querüberdeckung .....	86
7.2.2 Blockausgleichung Datensatz Vechtel .....	87
7.2.2.1 Allgemeine Untersuchung zu den photogrammetrischen und GPS Daten .....	88
7.2.2.2 Untersuchung mit 60% Querüberdeckung .....	90
7.2.2.3 Untersuchung mit 20% Querüberdeckung .....	92
7.3 Vergleich mit konventioneller Blockausgleichung .....	93
8. Mehrdeutigkeitschätzung in der Blockausgleichung .....	97
9. Ergebnisse und Diskussion .....	101
10. Literaturverzeichnis .....	105
11. Anhang .....	113
11.1 Rotationsmatrix und strenge partielle Ableitungen der Kollinearitätsgleichungen .....	113
11.2 Übersicht der verwendeten Bildflugdatensätze .....	115
11.3 Übersicht der Blockkonfigurationen .....	117
11.4 Übersicht der GPS Datenqualität der Bildflugdatensätze .....	120

## Abkürzungsverzeichnis

AS	Anti-Spoofing: Maßnahme zur GPS Nutzungsbeschränkung
AT	Aerotriangulation
APR	Airborne Profile Ranger
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
ACSM	American Congress on Surveying and Mapping
BLUH	Bundle Block Adjustment University of Hannover, Bündelblockausgleichungsprogramm
C/A-Code	Coarse/Aquisition-Code: GPS Beobachtungsgröße
CCD	Charge Coupled Device
DGPS	Differential GPS: relatives GPS
DoD	US Department of Defence
DOP	Dilution of Precision: Qualitätsmaß der Satellitenkonstellation
DoT	US Department of Transportation
DREF	Deutsches GPS-Referenznetz 1991
DVW	Deutscher Verein für Vermessungswesen
ESA	European Space Agency
GDOP	Geometric Dilution of Precision: Qualitätsmaß der Satellitengeometrie
GEONAP	Geodetic NAVSTAR Positioning: GPS Auswerteprogramm
GIS	Geographisches Informationssystem
GLONASS	Global Navigation Satellite System: russisches Satellitennavigationssystem
GNSS	Global Navigation Satellite System: Überbegriff Satellitennavigationssysteme
GPS	Global Positioning System: amerikanisches Satellitennavigationssystem
HPPS	Hochpräziser Permanenter Positionierungsservice
IAG	Internationale Assoziation für Geodäsie
IGS	International GPS Service for Geodynamics
INS	Inertiales Navigations System
ION	US Institute of Navigation
ISPRS	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
IUSM	International Union for Surveys and Mapping
LADGPS	Local Area DGPS
LAPDGPS	Local Area Precise DGPS
NAVSTAR	Navigation System with Time and Ranging
P-Code	Precise-Code: GPS Beobachtungsgröße
P(Y)-Code	verschlüsselter P-Code: GPS Beobachtungsgröße
PDGPS	Präzises DGPS
PDGNSS	Präzises Differentielles GNSS
PDOP	Position Dilution of Precision: Qualitätsmaß der Position
PPS	Precise Positioning Service: Genauigkeitsklasse des GPS
PRN	Pseudo Random Noise
OTF	On-the-fly: Mehrdeutigkeitbestimmung während der Bewegung
RTK	Real Time Kinematic: Echtzeitfähigkeit während der Bewegung
SA	Selective Availability: künstliche Verschlechterung des GPS
SAR	Airborne Synthetic Aperture Radar
SPS	Standard Positioning Service: Genauigkeitsklasse des GPS
UCSE	University of Calgary Surveying Engineering
URL	Uniform Resource Locator
US	United States
WADGPS	Wide Area DGPS
W-Code	Code zur Verschlüsselung des GPS P-Code
WGS84	World Geodetic System 1984
ZP	zusätzlicher Parameter der Selbstkalibrierung

## 1. Einleitung und Zielsetzung

### Einführung

Der fortschreitende weltweite Einsatz von Geoinformationssystemen (GIS) in allen raumbezogenen Bereichen läßt den Bedarf an einfach zu handhabender und kostengünstiger Erfassung von aktuellen, flächendeckenden und raumbezogenen Daten steigen. Die Daten als Grundlage für den Einsatz von GIS sind gegenüber der notwendigen Hard- und Software weitaus kostenintensiver (Faktor 10-100) (Schade, Cramer 1994). Die Kosten stellen somit auch für das einzusetzende Verfahren zur Datenerfassung den bestimmenden Faktor dar. Besonders luftgestützte Methoden können einen wesentlichen Beitrag zur flächenhaften und aktuellen Datenerfassung leisten. Dies hat auch Konsequenzen für die Aerotriangulation als klassisches Verfahren der luftgestützten Datenerfassung.

Die Beschaffung, Signalisierung und Bestimmung von Paßpunkten ist in der konventionellen Aerotriangulation einer der kostenintensivsten Bereiche. Eine Kosteneinsparung kann durch die direkte Bestimmung der äußeren Orientierung der Bilddaten erreicht werden. Ebenso ergibt sich aus den Entwicklungen in der digitalen Photogrammetrie, wie der automatischen Triangulation, ein Gewinn in der Auswertzeit, der sich ebenfalls in den Kosten niederschlägt.

Die Einsparung von Paßpunkten und die direkte Bestimmung der äußeren Orientierung scheiterte bislang an dem Genauigkeitspotential geeigneter Sensoren. Durch die fluggestützte kinematische Anwendung des Global Positioning System (GPS) werden jedoch die photogrammetrischen Genauigkeitsanforderungen erfüllt.

Das Global Positioning System hat als universelle Meßmethode mit der Möglichkeit zur zuverlässigen Bestimmung von Position, Orientierung, Geschwindigkeit und Zeit in nahezu alle geodätische Bereiche Einzug gehalten. Ursache hierfür sind die Eigenschaften des Meßverfahrens, das wirtschaftliche Einsetzbarkeit, hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit, einfache Bedienung, fallende Preise und Miniaturisierung der Geräteausstattung, leistungsfähige und nutzerfreundliche Auswertprogramme und Echtzeitfähigkeit bietet (Seeber 1996, Seeber, Schmitz 1996).

In der Photogrammetrie wird GPS heute als ein effizientes Meßverfahren für unterschiedliche Aufgaben eingesetzt. Die Anwendungen in der Aerotriangulation umfassen die Navigation der Bildflüge, Bestimmung von Paßpunkten am Boden sowie von Luftpaßpunkten in der GPS gestützten Aerotriangulation. Für eingeschränkte Genauigkeiten kann GPS die Orientierung des Vermessungsflugzeuges mit mehreren Antennen bestimmen.

### Bisherige Entwicklung von GPS und GPS gestützter Aerotriangulation

Das Bereitstellen von signalisierten Paßpunkten ist in der konventionellen Aerotriangulation mit hohen Kosten verbunden, die durch die direkte Bestimmung der äußeren Orientierung der Bilddaten verringert werden können. Damit verbunden ist gleichzeitig eine erhebliche Reduzierung des logistischen Aufwandes eines Befliegungsprojektes. Forderungen nach einer Verringerung der notwendigen Paßpunktanzahl und gleichzeitigem Erhalt der erzielbaren Genauigkeiten leiteten bereits frühzeitig Untersuchungen zur Nutzung von zusätzlichen Daten in der photogrammetrischen Auswertung ein.

Erste Untersuchungen zur Stützung der Aerotriangulation durch zusätzliche Daten wurden in den dreißiger Jahren durchgeführt. Unterschiedliche Verfahren wie Statoskop, Horizontkamera und Sonnenperiskop zur Stützung der Höhenkomponente wurden entwickelt. In späteren Jahren wurden verfügbare und neu aufkommende Navigationssysteme und Sensoren untersucht. Jedoch scheiterte der Einsatz in der Aerotriangulation an dem unzureichenden Genauigkeitspotential. Bis auf das Statoskop und dem Airborne Profile Ranger (APR) haben die Verfahren keine größere Bedeutung in der Praxis gewonnen (Ackermann 1984). Ein Durchbruch wurde erst mit der Entwicklung des GPS und den präzisen GPS Anwendungen Anfang der achtziger Jahre erreicht.

Zunächst wurde GPS für die Navigation ohne Mehrdeutigkeitsbestimmung in mittleren Genauigkeiten oder in statischen Anwendungen mit Mehrdeutigkeitsfestsetzung zur Koordinatenbestimmung im Bereich einiger Zentimeter eingesetzt (Seeber 1996). Die erreichten Genauigkeiten in landgestützten Untersuchungen mit integriertem Navigationssystem aus GPS und Inertialsystem wurden in Simulationen auf die Aerotriangulation übertragen (Schwarz u.a. 1984). Die Genauigkeiten waren durch die verfügbare GPS Empfängertechnologie und dem im Aufbau befindlichen GPS eingeschränkt, jedoch wurde eine Reduktion der Paßpunktanzahl bzw. ein vollständiger Verzicht auf Paßpunkte für kleine und mittlere Bildmaßstäbe für die Zukunft aufgezeigt.

Einen weiteren Anstoß erhielt die GPS Entwicklung durch Verfahren zur schnellen GPS Mehrdeutigkeitslösung. Remondi stellte erstmalig Methoden zur Lösung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten in wenigen Minuten vor (Remondi 1985). Die präzise kinematische Positionierung mit GPS Trägerphasenmessungen wurde danach für die photogrammetrische Anwendung weiter untersucht (Mader 1986, Mader u.a. 1986). Dabei wurden Genauigkeiten für die Lagekomponenten von unter einem Dezimeter und in der Höhenkomponente von wenigen Dezimetern in fluggestützten Anwendungen erreicht, die eine grundsätzliche Stützung der Aerotriangulation ermöglichen.

Die erfolgsversprechenden Untersuchungen zum GPS waren Anlaß, das zukünftig verfügbare Genauigkeitspotential für die Photogrammetrie neu zu bewerten. Eine Simulation mit ausschließlicher Nutzung von GPS wurde von Lucas (1987) vorgestellt. Aufgrund der für den gesamten Flug angenommenen homogenen GPS Koordinatengenauigkeiten wurden Vorteile in der Höhengenaugkeit der Objektkoordinaten gegenüber einer konventionellen Blockausgleichung mit vier Paßpunkten erwartet. Allgemeine Analysen der Genauigkeitsanforderungen an eine direkte Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung wurden für unterschiedliche photogrammetrische Aufgabenstellungen zusammengestellt und anhand von Simulationen untersucht (Ackermann 1986, Frieß 1986). Tabelle 1.1 zeigt die geforderten Genauigkeiten für die Koordinaten der äußeren Orientierung in Lage und Höhe. Die Angaben beschränken sich auf systematische Fehler und werden in der Praxis zusätzlich durch zufällige Fehler überlagert.

Aus den Ergebnissen der Simulationen ist hervorzuheben, daß zum einen die Bestimmung der Orientierungswinkel nur einen eingeschränkten Einfluß auf die Objektkoordinaten hat. Zum anderen besteht ein vorteilhaftes Genauigkeitsverhältnis, das bei vorgegebener Objektkoordinatengenauigkeit geringere Anforderungen an die Genauigkeit der Projektionszentren stellt (Ackermann 1986, Colomina 1989). Es können Standardabweichungen in der Höhenkomponente der Aufnahmezentren toleriert werden, die um den Faktor 2 bis 3 größer sein können als die verlangten Werte der Objektkoordinaten (Dorrer 1988, Ackermann 1990). Die bereits

Kartenmaßstab	Bildmaßstab	Genauigkeit AT [m]		Genauigkeit GPS [m]	
1:m <sub>K</sub>	1:m <sub>B</sub>	$\sigma_{x,y}$	$\sigma_z$	$\sigma_{x,y}$	$\sigma_z$ <sup>1)</sup>
1:100000	1:100000	5	4	30	16
1:50000	1:70000	2.5	2	15	8
1:25000	1:50000	1.2	1.2	5	4
1:10000	1:30000	0.5	0.4	1.6	0.7
1:5000	1:15000	0.25	0.2	0.8	0.35
1:1000	1:8000	0.05	0.1	0.4 <sup>2)</sup>	0.15
Einzelpkt.	1:4000	0.01-0.02	0.06	0.15 <sup>3)</sup>	0.15
4 Paßpunkte, $\sigma_0=15 \mu\text{m}$ , <sup>1)</sup> $\sigma_{0z}=15 \mu\text{m}$ , <sup>2)</sup> $\sigma_0=6 \mu\text{m}$ , <sup>3)</sup> $\sigma_0=3 \mu\text{m}$					

Tab. 1.1: Geforderte Genauigkeiten der äußeren Orientierung für die Blockausgleichung nach Ackermann (1986)

festgestellte vorteilhafte Stützung der Höhenkomponente einer Blockausgleichung wird in den Untersuchungen bestätigt.

Weitere umfangreiche Analysen zu den erreichbaren Genauigkeiten des fluggestützten kinematischen GPS wurden durchgeführt (Frieß 1988, Mader, Lucas 1989, Frieß 1990a, 1990b). Bei diesen Untersuchungen stand die Analyse der GPS Koordinaten als exzentrische Beobachtungen der Kameraposition im Vergleich zu den unabhängigen Ergebnissen aus der Aerotriangulation im Vordergrund. Die Untersuchungen ergaben eine Abhängigkeit der Positionsgenauigkeit von unterschiedlichen GPS Fehlerfaktoren, wobei nicht korrekt erfaßte Effekte sich als Driftverhalten der Koordinaten zeigen. Einen wesentlichen Faktor stellen dabei fehlerhaft festgesetzte Mehrdeutigkeiten dar (Cannon 1991). Die systematischen Fehler in den GPS Koordinaten können näherungsweise durch konstante Verschiebungen (Shift) und zeitabhängige Korrekturen (Drift) beschrieben werden.

Zur Bestimmung der Mehrdeutigkeiten wurden spezielle Verfahren entwickelt, bei denen vor der eigentlichen kinematischen Messung die Initialisierung durch eine statische Messung oder durch einen Antennenaustausch (Antenna-Swap) durchgeführt wird (Hofmann-Wellenhopf, Remondi 1988). Die so bestimmten Mehrdeutigkeiten erlauben hohe Genauigkeiten in der direkt anschließenden kinematischen Anwendung, wenn ständig der ununterbrochene Empfang zu mindestens vier Satelliten gewährleistet wird. In der Praxis bedeutete dies zusätzliche und zeitintensive Anforderungen an die Durchführung der GPS Messungen, die zudem nicht für alle Anwendungen in geeigneter Weise eingesetzt werden konnten.

Für die Blockausgleichung ist die Berücksichtigung von systematischen Bildfehlern für hohe Genauigkeitsanforderungen ein entscheidender Faktor. Die Erfassung erfolgt im allgemeinen durch spezielle Korrekturfunktionen in einer Selbstkalibrierung. Die grundsätzliche Funktionalität und Gültigkeit der Selbstkalibrierung in einer GPS gestützten Blockausgleichung wurde durch Simulationsrechnungen gezeigt (Grün, Runge 1988). Ebenso wird die bekannte numerische Struktur der photogrammetrischen Blockausgleichung durch die Einbeziehung von GPS Daten nicht grundsätzlich verändert (Ackermann 1988, 1990), so daß sich eine Erweiterung bestehender Programmsysteme zur GPS gestützten Blockausgleichung verhältnismäßig einfach darstellt.

Die vorgeschlagene Behandlung von GPS und systematischen GPS Fehlern wurde in eine GPS gestützte Blockausgleichung umgesetzt. Empirische Ergebnisse mit linearer Approximation systematischer GPS Koordinatenfehler wurden von Andersen (1989), Colomina (1989), van der Vegt (1989), Frieß (1990a, 1990c) vorgestellt. Die Anzahl der benötigten Paßpunkte reduziert sich auf vier Vollpaßpunkte in den Blockecken zur Bestimmung von Datums- und Driftparametern für ein gesamtes Überfliegsgebiet. Damit wurde erstmals die Forderung nach einer drastischen Reduzierung der notwendigen Paßpunktanzahl in der Aerotriangulation erfüllt.

In der weiteren Anwendung der GPS gestützten Aerotriangulation zeigte sich, daß Signalunterbrechungen und anschließende fehlerhafte Festsetzung der Mehrdeutigkeiten zwischen den Streifen durch streifeninvariante Datums- und Driftparameter kompensiert werden können. Streifeninvariante Parameter führen gegenüber blockinvarianten Parametern zu einer Schwächung der Blockgeometrie, die sich in einer Verschlechterung der Objektkoordinatengenauigkeit zeigt (Ackermann 1990). Der Nachteil wird aber wegen der vereinfachten GPS Messung und Auswertung generell in Kauf genommen. So entfällt vor allem die Bestimmung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten durch eine Initialisierung vor dem Flug.

Bereits frühzeitig wurden Linearkombinationen der ursprünglichen Beobachtungen zur Verbesserung der Mehrdeutigkeitslösung vorgeschlagen und eingesetzt (Hatch 1982, 1986). Eine wesentliche Verbesserung wurde durch spezielle Verfahren zur Bestimmung der Mehrdeutigkeiten während der Antennenbewegung erreicht (Seeber, Wübbena 1989). Durch die sogenannten OTF- (On-the-fly) Verfahren wird eine Steigerung der Zuverlässigkeit der kinematischen GPS Anwendungen möglich, die durch spezielle Suchalgorithmen verfeinert und optimiert wird (Übersicht z.B. Hatch, Euler 1994, Euler 1995). Auftretende Fehler in der Mehrdeutigkeitsfestsetzung betragen somit nur noch wenige Zyklen der Wellenlängen.

Modellverfeinerungen des Shift- und Drift-Ansatzes wurden in weiteren Arbeiten untersucht. Eine Differenzbildung der GPS Koordinaten zur Eliminierung bzw. Reduktion von systematischen Fehlern wurde von Li (1992) vorgeschlagen. Bei dieser Differenzmethode werden in der Blockausgleichung nur GPS Koordinatendifferenzen verwendet, so daß wegen fehlender Datuminformationen eine paßpunktlose Aerotriangulation nicht möglich ist (Schwiertz 1994). Das Verfahren hat bei dem heute verfügbaren GPS Genauigkeitspotential keine Bedeutung mehr.

Für die Approximation der systematischen GPS Koordinatenfehler wurden auch Ansätze untersucht, die auf Polynomen unterschiedlichen Grades basieren (Jacobsen 1994b). Dabei bestätigte sich, daß im allgemeinen konstante Translationen zur Kompensation des Datumsunterschiedes und zeitabhängige lineare Korrekturen der GPS Koordinatendrift ausreichen, und auf quadratische oder kubische Polynomansätze verzichtet werden kann.

Schwiertz (1994) erweitert das funktionale Modell um die Interpolation der GPS Koordinaten und die Schätzung der Auslösezeitpunkte im Rahmen der Blockausgleichung. Durch die Integration in die Blockausgleichung können Zeiterfassungsfehler bestimmt und korrigiert werden. Im Extremfall kann eine GPS gestützte Blockausgleichung ohne Kenntnis des Zeitbezuges zwischen GPS Positionen und Aufnahmezeiten durchgeführt werden. Das Normalgleichungssystem erweitert sich beträchtlich (um Aufnahmezeiten und Interpolationsstützpunkte), so daß eine Anwendung nur eingeschränkt sinnvoll ist.

Die GPS gestützte Blockausgleichung stellt gegenwärtig ein operationelles und leistungsfähiges Verfahren in der Photogrammetrie dar, das vergleichbare Genauigkeiten zur konventionellen Aerotriangulation bei drastischer Reduzierung der Paßpunktanzahl erreicht.

### **Zielsetzung der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit ist ein Beitrag zur stärkeren Integration von GPS und photogrammetrischer Blockausgleichung. Angeregt durch die Untersuchungen der Befliegung Vechtel, die 1993 gemeinsam von der Landesvermessung Niedersachsen sowie dem Institut für Erdmessung und dem Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung der Universität Hannover durchgeführt wurden, ergaben sich Gesichtspunkte, die im Detail analysiert werden mußten.

Die approximativen Polynomansätze für eine Koordinatenverbesserung der Shift- und Drift-Ansätze entsprechen grundsätzlich nicht den geometrischen GPS Bedingungen, so daß eine strenge Behandlung der GPS Koordinatenfehler von Vorteil sein kann. Ziel der Untersuchungen ist die Entwicklung eines geeigneten Modells für eine strenge Parametrisierung der systematischen GPS Koordinatenfehler aufgrund von Unsicherheiten in der Mehrdeutigkeitsfestsetzung. Dies setzt eine engere Verknüpfung der beiden getrennt durchgeführten GPS Auswertung und der Blockausgleichung voraus.

Gleichzeitig beinhaltet eine gemeinsame strenge Ausgleichung von GPS Daten und photogrammetrischen Daten das Potential zur Stützung der GPS Mehrdeutigkeitslösung. Die grundsätzliche Möglichkeit in einer integrierten GPS/Block-Ausgleichung nicht nur ausschließlich die Aerotriangulation zu stützen, sondern umgekehrt GPS Mehrdeutigkeiten zu bestimmen, wurde mehrfach angesprochen (Cannon 1991, Schwiertz 1994). Der programmtechnische und mathematische Aufwand der Zusammenführung wurde jedoch bislang als zu groß abgeschätzt, so daß konkreten Modellen nicht weiter nachgegangen wurde. Im Rahmen dieser Arbeit werden erstmals Mehrdeutigkeiten in einer gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung bestimmt.

### **Strukturierung der Arbeit**

Eine Übersicht über das Satellitensystem GPS, die Aerotriangulation und die GPS gestützte Blockausgleichung wird in Kapitel 2 gegeben. Hierbei wird auf die Fehlereinflüsse und Genauigkeiten der Verfahren eingegangen. Die aktuellen Entwicklungen im Bereich GPS mit kinematischen Echtzeit-Verfahren und der Digitalen Photogrammetrie im Bereich Aerotriangulation werden kurz genannt, obwohl sie im Rahmen der Arbeit nicht verwendet werden. Sie zeigen jedoch die noch nicht abgeschlossenen Entwicklungen auf, die in Zukunft weitere Auswirkungen auf die GPS gestützte Blockausgleichung haben werden.

Im Kapitel 3 sind wesentliche Grundlagen und Einflußparameter dargestellt, die innerhalb einer GPS gestützten Blockausgleichung bedeutsam sind, um die unterschiedlichen Informationen zu verknüpfen, aber keine Beobachtungs- oder Meßfehler der eigentlichen Verfahren darstellen. Dazu gehören die verwendeten Koordinatensysteme und deren Transformation in ein einheitliches Datum, bei der streng der Einfluß des Geoids berücksichtigt werden muß. Desweiteren kann GPS keine direkte Beobachtung der Aufnahmezeitpunkt liefern, da zwischen GPS Antenne und Aufnahmekamera eine räumliche Exzentrizität besteht. Zudem ergibt sich ein Unterschied zwischen photogrammetrischem Aufnahmezeitpunkt und der zeitlichen

Zuordnung der GPS Koordinaten, so daß eine Interpolation auf einen gemeinsamen Referenzzeitpunkt notwendig wird.

Ausgangspunkt der Arbeit sind systematische GPS Fehler, die eine direkte Verwendung der GPS Koordinaten in der Blockausgleichung nicht erlauben. Die zu erwartenden systematischen Fehler aus dem GPS, die vor allem durch fehlerhaft festgesetzte Mehrdeutigkeiten bedingt sind, werden in Kapitel 4 durch Beispiele dargestellt und hinsichtlich der bisher verwendeten Modellierung von GPS mit Shift- und Drift-Parametern in der Blockausgleichung diskutiert. Besonders hervorgehoben werden Unstetigkeiten in den GPS Koordinaten, die durch einen Satellitenkonstellationswechsel hervorgerufen werden und durch vorhandene systematische Fehler verstärkt werden.

Zur Entwicklung einer strengen GPS Parametrisierung sind das Gauß-Markov Modell der Ausgleichung sowie die Beobachtungsgleichungen von GPS und Bündelblockausgleichung von Bedeutung, die in Kapitel 5 dargestellt werden. Gleichzeitig wird in Kapitel 5 auf die grundsätzliche Struktur der Blockausgleichung und die notwendige Erweiterung aufgrund der zusätzlichen GPS Daten eingegangen.

Kapitel 6 enthält die Auswertemodelle für die gemeinsame GPS/Block-Ausgleichung. Die Modellierung der GPS Fehler in der Blockausgleichung kann aufgrund der projektiven Kompensation sowohl im Objektraum als auch im Bildraum beschrieben werden. Die Voraussetzungen hierfür werden angegeben. Die bereits in Kapitel 2 vorgestellten operationellen Verfahren der GPS gestützten Blockausgleichung benutzen konstante und zeitabhängige Korrekturen zur Modellierung der GPS Fehler. Das Auswertemodell der Shift- und Drift-Ansätze in Objekt- und Bildraum wird dargestellt. Die grundlegende Vorgehensweise zur strengen Parametrisierung der GPS Fehler wird ebenfalls in Kapitel 6 entwickelt. Es folgen das Auswertemodell der strengen GPS Parametrisierung, wiederum im Objekt- und Bildraum. Abschließend wird die benötigte Schnittstelle zwischen GPS Auswertung und Blockausgleichung beschrieben.

Die in Kapitel 6 dargestellten Modelle, Shift- und Drift-Ansatz sowie strenge GPS Parametrisierung, werden in Kapitel 7 anhand von simulierten systematischen GPS Fehlern für einen realen Datensatz kontrolliert untersucht. Zwei weitere Datensätze zeigen das grundsätzliche Potential der strengen GPS Parametrisierung, aber auch zusätzliche Einflußparameter auf die strenge Parametrisierung auf. Dabei werden die GPS gestützten Blockausgleichungen mit reduzierten Paßpunkten in den Blockecken und mit einer Reduktion der Querüberdeckung von 60% auf 20% durchgeführt. Ein Vergleich der GPS gestützten Blockausgleichungen mit den konventionellen Blockausgleichungen und gleicher Paßpunktanzahl beschließt Kapitel 7.

Die Blockausgleichung erlaubt bei großem Bildmaßstab über die strenge Parametrisierung die Schätzung von GPS Mehrdeutigkeiten in der Blockausgleichung. Voraussetzung hierfür ist, daß die Koordinaten des Projektionszentrums aus der Blockausgleichung deutlich besser als die Wellenlänge der GPS Trägerphasen (ca. 20 cm) bestimmt sind. Kapitel 8 zeigt die grundsätzliche Möglichkeit zur Mehrdeutigkeitsschätzung auf und zeigt die Ergebnisse anhand von künstlich erzeugten Mehrdeutigkeiten in einem realen Datensatz.

Eine Diskussion der Ergebnisse und ein Ausblick werden in Kapitel 9 gegeben. Den Abschluß bilden das Literaturverzeichnis und ein Anhang mit den vollständigen partiellen Ableitungen

der photogrammetrischen Beobachtungsgleichungen sowie Angaben zu den verwendeten photogrammetrischen Blöcken und graphischen Darstellungen der Blockkonfigurationen.



## 2. Verfahren und aktueller Status

### 2.1 Global Positioning System (GPS)

#### System Beschreibung und Status

Das NAVSTAR (Navigation System with Time and Ranging) Global Positioning System (GPS) wird seit 1973 im Auftrag des US Verteidigungsministeriums als satellitengestütztes Navigationssystem entwickelt. Seit 1978 wird das System aufgebaut und erreichte die geplante Konstellation mit 24 Satelliten im Juli 1993. Die offizielle Erklärung der Operationalität des GPS Systems (Initial Operational Capability) für die zivile Anwendung folgte am 8. Dezember 1993. Am 17. Juli 1995 erklärte das amerikanische Verteidigungsministerium den operativen Endausbau (Full Operational Capability) des GPS, der die vollständige militärische Funktionalität des Systems definiert (DoD, DoT 1997).

Die Satelliten sind in sechs nahezu kreisförmigen Bahnen mit einer Inklination von  $55^\circ$  und einer Bahnhöhe von 20200 km angeordnet. Die Umlaufzeit beträgt 12 Stunden. Die Geometrie der Satellitenkonfiguration ändert sich infolge der Satellitenbewegung und wird durch den Position Dilution of Precision (PDOP) beschrieben. Die Anordnung der Satelliten in den Bahnebenen gewährleistet eine weltweite Sichtbarkeit von fünf Satelliten mit einem PDOP von weniger als sechs (DoD, DoT 1997). Ein PDOP-Wert von fünf gilt als gute Satellitenkonfiguration.

Sämtliche Kontrollfunktionen werden von einer Master Control Station vorgenommen. Ein Netz von fünf weltweit verteilten Kontrollstationen liefert Daten zur Bestimmung der Satellitenuhren, Satellitenbahnen und sonstigen Parameter der Navigationssignale. Die auf diese Weise berechneten Informationen werden über drei Bodenantennen an die Satelliten übermittelt.

Das Beobachtungsprinzip beruht auf Entfernungsmessungen zwischen Satellit und Empfänger, wobei ein vom Satelliten abgestrahltes Signal benutzt wird. Das GPS verwendet zwei Trägerphasensignale  $L_1$  und  $L_2$  (Frequenzen  $f_1=1575.42$  MHz,  $f_2=1227.60$  MHz), die mit Navigationssignalen (Codes) und Systemdaten des GPS (Navigation Message) überlagert sind. Der genaue P-Code (Precise Code) ist in beiden Satellitensignalen enthalten, wohingegen der weniger genaue C/A-Code (Coarse/Aquisition-Code) nur auf dem  $L_1$  Signal aufmoduliert ist. Die Systemdaten bestehen im wesentlichen aus Informationen über Satellitenuhr, Satellitenbahn, Korrektionsparametern und Angaben zum Funktionszustand der Satelliten sowie Almanachdaten aller Satelliten. Die Navigation Message kann nur genutzt werden, wenn der verwendete Empfänger einen der beiden Codes generieren kann.

Die Satellitensignale wurden bereits seit 1990 zeitweise künstlich verschlechtert, um den Zugang zum vollen Genauigkeitspotential einzuschränken. Im Dezember 1993 erfolgte die permanente Aktivierung der Systemsicherungsmaßnahmen Selective Availability (SA). Durch SA werden zum einen die Satellitenuhren durch ein kontrolliertes Signal mit zufälligem Charakter verfälscht, wodurch direkt und in identischer Weise die Beobachtungsgrößen beeinflusst werden (Epsilon-Prozeß). Zum anderen besteht die Möglichkeit, die gesendeten Uhr- und Bahnparameter zu verschlechtern (Delta-Prozeß), die jedoch nur eingeschränkte und langsam variierende Verfälschungen zuläßt und bislang nicht oder nur wenig eingesetzt wurde

(Kleusberg, Teunissen 1996). Seit dem 31. Januar 1994 ist zudem Anti-Spoofing (AS) permanent eingeschaltet, das durch die Verschlüsselung des präzisen P-Codes auf den beiden Trägerphasen  $L_1$  und  $L_2$  zum sogenannten P(Y)-Code die absolute Positionierung für zivile Nutzer einschränkt. Der P(Y)-Code stellt dabei einen Code dar, der aus dem bestehenden P-Code und dem nicht bekannten W-Code erzeugt wird ( $P(Y)=P*W$ ).

Der Zugang zum P-Code wird als Precise Positioning Service (PPS) und der zivile Zugang über den C/A-Code als Standard Positioning Service (SPS) bezeichnet.

### Fehlereinflüsse und Genauigkeit

Die Fehlereinflüsse von GPS lassen sich grundsätzlich dem Satelliten, der Signalausbreitung oder dem Empfänger zuordnen (Tab. 2.1). Die satellitenabhängigen Einflüsse bestehen aus Unsicherheiten in der Berechnung von Satellitenuhren und Satellitenbahnen sowie den künstlichen Systemverschlechterungen. Die künstlichen Effekte stellen den größten Fehleranteil dar.

Fehlerkomponente		
		[m]
Satellit	Satellitenbahn	10-50 <sup>1)</sup>
	Satellitenuhr	10-100 <sup>2)</sup>
Signalausbreitung	Ionosphäre	2-100
	Troposphäre	0.1-1.0
	Mehrwegausbreitung	0.0-0.05
Empfänger	Phasenzentrumsvariationen	0.0-0.02
	Beobachtungsrauschen	0.01-0.03

<sup>1)</sup>ohne SA 2-10 m, <sup>2)</sup>ohne SA 1-10 m

Tab. 2.1: GPS Fehlerkomponenten

Satellitenbahnfehler ergeben sich, da dem GPS Nutzer Bahninformation in Form der Broadcast Ephemeriden bereitgestellt werden, die auf den Beobachtungszeitpunkt prädiiziert werden müssen. Der Bahnfehler stellt somit den Prädiktionsfehler der Bahnbestimmung dar und kann zusätzlich durch SA künstlich verschlechtert sein.

Troposphärische und ionosphärische Laufzeitänderungen der GPS Signale entstehen bei der Ausbreitung der Signale in der Atmosphäre. Der Einfluß der Ionosphäre auf ein Signal ist eine komplexe Funktion von Sonnenzyklus, geographischer Breite, Jahres- und Tageszeit, Elevationswinkel des Satelliten und Erdmagnetismus (Seeber 1993, Wanninger 1994). Gegenüber der troposphärischen ist die ionosphärische Laufzeitänderung frequenzabhängig und wird durch den Gehalt freier Elektronen in der oberen Atmosphäre (vor allem 200-500 km) verursacht. Die dispersive Eigenschaft ermöglicht es, den Hauptanteil der ionosphärischen Refraktion durch Messung auf zwei Frequenzen zu bestimmen. Die troposphärische Refraktion wird durch die untersten Schichten der Atmosphäre (im wesentlichen 0-10 km) verursacht und ist frequenzunabhängig. Für die Troposphäre gilt es, möglichst zutreffende Atmosphärenparameter längs des Signalausbreitungsweges zu nutzen.

Unter Mehrwegausbreitung werden Reflexionen des GPS Signals in der direkten Umgebung der Antenne und Imaging Effekte der Antenne verstanden, die zu einem systematischen Fehler in der gemessenen Strecke zum Satelliten führen. In statischen Messungen kann der Einfluß der Mehrwegausbreitung auf die Koordinatenbestimmung durch eine geeignete Beobachtungsdauer minimiert werden. Das Mehrwegesignal hat im allgemeinen eine Periode von weniger als 15 min und eine maximale Amplitude von einem Viertel der Wellenlänge (ca. 5 cm) (Seeber 1993). Neben dem direkten Einfluß auf die Koordinatenschätzung können Mehrwegeeffekte die Festsetzung der Mehrdeutigkeiten erheblich erschweren, verfälschen oder verhindern.

Empfängerabhängige Einflüsse bestehen aus Phasenzentrumsvariationen der verwendeten Antenne und dem Rauschen der Beobachtungsgrößen. Phasenzentrumsvariationen bestehen aus einem konstanten und einem elevations- und/oder azimutabhängigen Anteil. Die Fehler können für einige Antennentypen mehrere Zentimeter betragen und sind für hochgenaue Anwendungen durch Kalibrierungen zu berücksichtigen (Wübbena u.a. 1996a). Für kinematische Anwendungen können die Effekte nur schwer berücksichtigt werden, da die Orientierung der Antenne in der Regel ständig wechselt und nicht bekannt ist.

Die Modellierung der GPS Fehlerkomponenten läßt nur eine beschränkte Genauigkeit von 20-30 m zu. Die wesentlichen Fehler sind jedoch wegen der großen Höhe der GPS Satelliten räumlich hoch korreliert, so daß die Einflüsse auf die Entfernungsmessung für benachbarte Stationen fast genauso groß sind (Wübbena, Bagge 1995). In der Differenz der Signale benachbarter Stationen wird der Fehler somit weitestgehend eliminiert. Dies trifft für Satellitenbahnfehler und Fehler aus der Signalausbreitung in der Ionosphäre zu. Für troposphärische Fehler gilt dies nur eingeschränkt. Satellitenuhrfehler und somit auch die künstliche Verschlechterung durch SA werden dagegen vollständig eliminiert. Dies führt auf das Konzept des differentiellen GPS, das eine koordinatenmäßig bekannte Station voraussetzt und relativ hierzu weitere Stationen präzise bestimmen kann.

Genauigkeitsbereich	
[m]	
GPS	100-156
DGPS	> 0.4
PDGPS	> 0.005

Tab. 2.2: Allgemeine Unterteilung der GPS Genauigkeiten in absolute (GPS), differentielle (DGPS) und präzise differentielle Verfahren (PDGPS)

Die GPS Verfahren lassen sich in grundsätzlich drei, durch vorrangige Beobachtungsgrößen und Meßanordnung definierte Gruppen unterteilen, wobei die Bezeichnung und Bedeutung in ihrer Verwendung nicht streng definiert ist:

- absolute Positionierung (GPS)
- differentielle Codebeobachtungen, Differentielles GPS (DGPS)
- differentielle Phasenbeobachtungen, Präzises Differentielles GPS (PDGPS).

Für einen zivilen Nutzer läßt sich die absolute Positionsgenauigkeit von 100 m horizontal und 156 m vertikal durch relative Verfahren verbessern. Differentielle GPS (DGPS) Anwendungen benötigen bekannte Referenzstationskoordinaten, um Korrekturen für die GPS Fehlereinflüsse zu bestimmen. Differentielle Code Anwendungen erlauben Genauigkeit bis zu wenigen Dezimetern, sind jedoch gegenüber der GPS Navigation entfernungsabhängig. Eine weitaus höhere Genauigkeit bis zum Sub-Zentimeterbereich wird durch die differentielle Nutzung der Trägerphasen operationell erreicht. Für diese hohen Genauigkeiten ist die Lösung des Mehrdeutigkeitsproblems, d.h. die Bestimmung der Anzahl ganzer Wellenlängen zwischen GPS Antenne und Satellit, notwendig. Die zuverlässige Bestimmung der Mehrdeutigkeiten stellt somit die wesentliche Aufgabe der präzisen GPS Auswertung dar. Tabelle 2.2 faßt die Genauigkeiten nochmals zusammen.

Durch geeignete Empfängertechnologien und durch geeignete Meßanordnung können GPS Fehlereinflüsse und systemseitige Einschränkungen weitestgehend aufgehoben werden, so daß sich Positionierungen mit unterschiedlichen Genauigkeiten von 100 m bis Sub-Zentimeter durchführen lassen (Seeber 1996, Seeber, Schmitz 1996).

### **Kinematisches GPS**

Präzise geodätische GPS Anwendungen mit Zentimetergenauigkeiten erfordern die Verwendung von Trägerphasenmessungen und die Auflösung der Mehrdeutigkeiten. Die größte Herausforderung für eine operationelle Mehrdeutigkeitslösung stellen präzise kinematische Anwendungen dar, bei denen in der Antennenbewegung (OTF, on-the-fly) die Mehrdeutigkeiten geschätzt werden müssen. Bisherige Verfahren mit statischer Initialisierung sind damit hinfällig geworden. Sind operationelle und zuverlässige Algorithmen hierfür entwickelt, können sie ohne weiteres auf andere Anwendungen (statisches GPS, Post-Prozessing etc.) übertragen werden.

Der Einfluß von Satellitenbahnfehler auf kinematische Anwendungen kann, wie auch in statischen Anwendungen, am einfachsten durch präzise Bahndaten reduziert werden. Mit dem International GPS Service for Geodynamics (IGS) hat sich ein weltweiter Dienst etabliert, der seit 1992 aufgebaut und seit Januar 1994 als offizieller Dienst der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) unter anderem präzise GPS Ephemeriden zur Verfügung stellt (Beutler u.a. 1994). Der IGS entwickelt sich zu einem nahen Echtzeit-Dienst, der präzise Satellitenbahndaten bereits nach wenigen Tagen bereitstellt. Der Einfluß der Bahngenauigkeit ist hauptsächlich entfernungsabhängig und derzeit ab Stationsentfernungen von 60-100 km von Bedeutung. Präzise Bahndaten spielen jedoch bislang eine untergeordnete Rolle, da eine Mehrdeutigkeitslösung nur bei geringeren Stationsentfernungen möglich ist oder bei größeren Entfernungen Genauigkeitsforderungen vorliegen, die verbesserte Bahndaten nicht benötigen.

Die troposphärischen Fehlereinflüsse sind besonders in Fluganwendungen zu beachten. Durch die sehr stark unterschiedlichen Höhen zwischen Referenzstation und kinematischer Station sowie den Änderungen der troposphärischen Refraktion mit Änderungen der Höhe können Fehler in der Koordinatenschätzung, aber auch in der Festsetzung von Mehrdeutigkeiten auftreten (Collins, Langley 1996). Die Effekte sind fast ausschließlich von der Höhendifferenz abhängig und weitestgehend unbeeinflußt von der Entfernung zur Referenzstation (Shi, Cannon 1995).

Ionosphärische Effekte der GPS Positionierung sind vielschichtig und von einer Vielzahl von Faktoren abhängig (Wanninger 1994). Grundsätzlich kann der ionosphärische Fehlereinfluß bei Messung beider GPS Frequenzen bestimmt werden und ist nur bei GPS Einfrequenzdaten als Koordinatenfehler relevant. Ionosphärische Refraktion kann jedoch auch die Mehrdeutigkeitsbestimmung und Korrektur von Signalunterbrechungen erschweren, verfälschen oder sogar verhindern (Wanninger 1995). Ausgehend von einer ungestörten Ionosphäre ist der konstante Einfluß entfernungsabhängig und beeinflusst vorwiegend die Höhenkomponente (Shi, Cannon 1995). Der entfernungsabhängige Fehler kann 1-3 ppm, für Einfrequenzmessungen sogar 1-50 ppm betragen (Wanninger 1994). Zusätzlich treten durch Störungen der Ionosphäre zeitabhängige Fehler auf, die in kinematischen Anwendungen zu systematisch verfälschten Koordinaten führen können.

In kinematischen Anwendungen haben Mehrwegeeffekte durch die Bewegung der Antenne zufälligen Charakter (Cannon 1991, Shi, Cannon 1995) und durch die verfälschten Streckenmessungen direkte Auswirkungen auf die Genauigkeit der GPS Koordinatenbestimmung. Eine Mittelung der Fehler ist durch die ständig wechselnden Umgebungsbedingungen und die Bewegung nicht möglich. Gleichzeitig können Fehler in der Festsetzung der Mehrdeutigkeiten auftreten, die nicht anhand der Beobachtungsdaten erkannt werden können.

Der Fortschritt bei der Bestimmung der Mehrdeutigkeiten in den kinematischen Verfahren hat auch die Zuverlässigkeit im GPS Post-Prozessing gesteigert. Die Genauigkeit gegenüber den statischen Verfahren ist jedoch für kinematische Anwendungen geringer, da keine Mittelung von Fehlereinflüssen durch lange Beobachtungszeiten angewendet werden kann. Die Entfernungsabhängigkeit der differentiellen GPS Verfahren schränkt insbesondere die kinematischen Anwendungen ein. Mehrdeutigkeitslösungen sind unter günstigen Bedingungen über 40-60 km (Seeber u.a. 1995), in der Regel jedoch nur zuverlässig bis 15 km möglich. Als Lösung können mehrere Referenzstationen verwendet werden, die eine Modellierung der entfernungsbegrenzenden Fehlerkomponenten erlauben. In fluggestützten Anwendungen können durch Überfliegen der Referenzstation Bedingungen für eine zuverlässige Mehrdeutigkeitsbestimmung geschaffen werden. Unter der Voraussetzung, daß ständig vier Satelliten empfangen werden, wird die Mehrdeutigkeitslösung für den gesamten Flug weitergetragen. Für die Durchführung in der Praxis sind jedoch solche Randbedingungen schwer einzuhalten und wenig praktikabel.

### **Echtzeit-Kinematisches GPS**

Die Entwicklung operationeller OTF Verfahren hat zu aktiven kinematischen GPS Systemen geführt (Griffioen u.a. 1993), so daß mit Hilfe von DGPS Korrekturen im Felde eine Echtzeit-Koordinatenbestimmung im Zentimeterbereich möglich ist. Die Mehrdeutigkeitsbestimmung wird mit OTF-Algorithmen sowohl für statische als auch kinematische Anwendungen durchgeführt. Die statische GPS Messung wird somit als Sonderfall der kinematischen Anwendung abgedeckt. Alternativ kann der GPS Empfänger gleichzeitig zur echtzeit-kinematischen GPS Messung oder passiv als reiner Datensammler eingesetzt werden, um spezielle Aufgaben oder hochpräzise Genauigkeitsanforderungen im Post-Prozessing zu erfüllen.

Eine wesentliche Voraussetzung für ein operationelles, in Echtzeit arbeitendes DGPS System besteht in einer geeigneten Datenübertragungseinrichtung. Grundsätzlich eignen sich neben speziell zugeteilten Frequenzen (terrestrischer Funk) bereits bestehende Kommunikationstechniken wie Satellitenkommunikation, Mobilfunk sowie Rundfunk und Fernsehen (Heimberg 1994). Für die Einrichtung eines DGPS Systems sind jedoch Fragen zu Datenformat,

Kodierung, Modulation, Bandbreite des Signals, Frequenz, Entfernungsbereich, Übertragungsrate- und geschwindigkeit, vorhandene Infrastruktur und nicht zuletzt internationale Vereinbarungen von Bedeutung, so daß sich ein ausgesprochen komplexer Zusammenhang und beschränkte Möglichkeiten ergeben.

Aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit von geeigneten Übertragungsmedien ist es sinnvoll, flächendeckende Dienste anzubieten, die DGPS Korrekturdaten bereitstellen und somit einer uneingeschränkten Anzahl von Nutzern zur Verfügung stehen. Gegenwärtig werden permanente Dienste sowohl durch kommerzielle als auch durch öffentliche Betreiber aufgebaut (Bichtemann, Hankemeier 1993, Hankemeier 1997). Neben den DGPS Korrekturen werden im allgemeinen die Rohdaten der Stationen archiviert und können zusätzlich für eine Post-Prozessierung mit beliebigen Nutzer-Daten genutzt werden.

Grundsätzlich muß zwischen unabhängig voneinander arbeitenden Referenzstationen und vernetzten Referenzstationen unterschieden werden. Eine unabhängige Referenzstation ergibt zunächst keine Änderung in der GPS Anwendung, außer daß ein Nutzer von der Notwendigkeit selbst eine Referenzstation zu betreiben, entbunden ist. Vernetzte Referenzstationen ermöglichen dagegen die Reduzierung entfernungsabhängiger Fehler und somit den Einsatz von GPS-Korrekturdaten in Echtzeit über größere Entfernungen.

Das Konzept zur Reduzierung entfernungsabhängiger Fehler basiert auf einem Netz von Referenzstationen, die GPS-Korrekturdaten an eine zentrale Station übertragen, um dort verbesserte Korrekturen zu berechnen. Die Verfahren hierfür sind unterschiedlich und können aus einer einfachen Gewichtung oder der Modellierung einzelner Fehlerkomponenten (z.B. Troposphäre, Ionosphäre, Satellitenbahnen) bestehen sowie für Code- und/oder Trägerphasenmessungen bestimmt werden.

In Abbildung 2.1 sind die unterschiedlichen Konzepte mit Genauigkeit und Entfernungsbereich zusammengestellt, wobei die Bezeichnungen bislang nicht eindeutig und einheitlich sind. Die Navigationsgenauigkeiten des GPS mit dem PPS und SPS sind bereits angesprochen worden. Unter dem Begriff Wide Area DGPS (WADGPS) wird im allgemeinen ein Netz von Referenzstationen verstanden, das unter Berücksichtigung einzelner Fehlerkomponenten verbesserte Code-Korrekturdaten ermittelt (Abousalem 1997). Der Vorteil eines WADGPS gegenüber einer einzelnen und unabhängigen Referenzstation besteht in der Möglichkeit, auch große Regionen (mehrere 1000 km), insbesondere große und unzugängliche Bereiche, mit wenigen Stationen abzudecken (Mueller 1994). Local Area DGPS (LADGPS) stellt meist gemittelte Code-Korrekturdaten bereit, die dann für einen eingeschränkteren Entfernungsbereich Gültigkeit haben (Kaplan 1996).

Die Einrichtung von PDGPS Diensten mit Übertragungen von Trägerphaseninformationen von unabhängigen Referenzstationen ist aufgrund der verfügbaren Frequenzen mit ausreichender Datenkapazität und der dadurch eingeschränkten Reichweite schwieriger umzusetzen. Verfahrenslösungen wurden innerhalb des Hochpräzisen Permanenten Positionierungs-Service (HPPS) des Niedersächsischen Landesvermessungsamtes (Augath u.a. 1993, Jahn 1996) in Norddeutschland untersucht. Eine zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung ist jedoch durch die ionosphärische Refraktion auf Entfernungen bis 15 km beschränkt.

Konzepte für die Bestimmung von verbesserten Trägerphasenkorrekturen aus vernetzten Referenzstationen sind relativ neu (Wübbena u.a 1996b). Durch geeignete Modelle lassen sich

die entfernungsabhängigen Fehler aus Ionosphäre und Satellitenbahn beschreiben und an den GPS-Korrekturen anbringen, so daß über Entfernungen von 30-70 km eine präzise Positionierung mit zuverlässiger Lösung der Mehrdeutigkeiten möglich ist (Wübbena u.a 1996b). Dies stellt eine entscheidende Verbesserung hinsichtlich permanenter und flächendeckender Referenzstationsnetze dar. In Abbildung 2.1 werden vernetzte Referenzstationen als Local Area Precise DGPS (LA PDGPS) bezeichnet.

Der wesentliche Vorteil von Referenzstationsnetzen ist die Reduzierung entfernungsabhängiger Fehler und somit der Einsatz von DGPS und präzisiertem DGPS über größere Regionen. Ein Netz von GPS Stationen ist zudem weniger anfällig gegenüber Ausfällen einer Station.

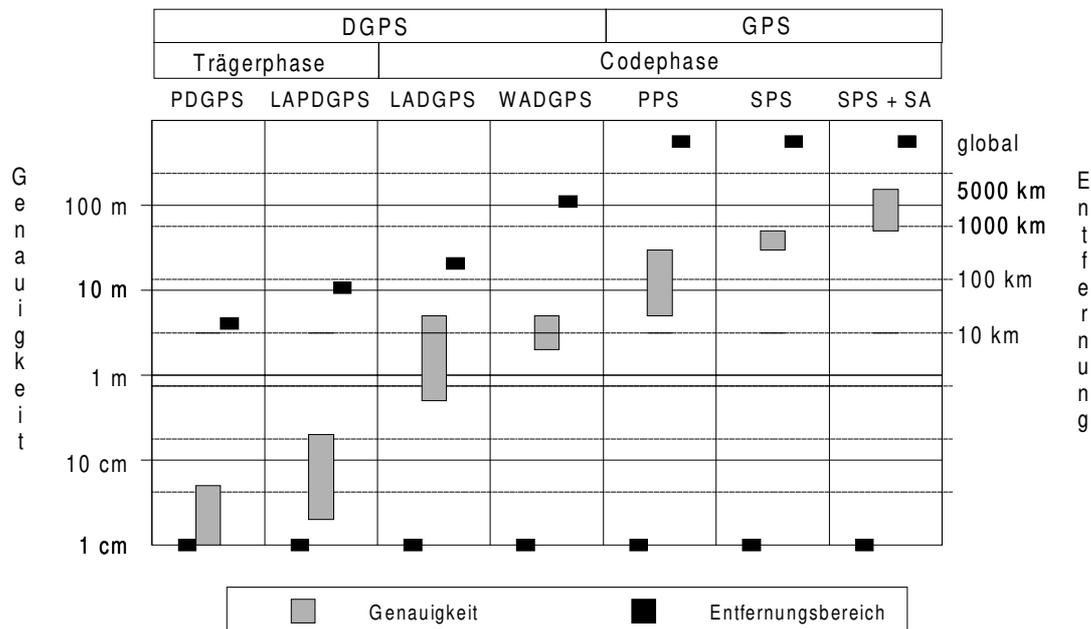


Abb. 2.1: Genauigkeiten und Entfernungsbereiche von kinematischen GPS Verfahren in Echtzeit

Abbildung 2.1 faßt den gegenwärtigen Stand von echtzeitfähigen GPS Anwendungen und deren Entfernungsbereiche zusammen. Die Wahl zwischen kinematischem Echtzeit- und Post-Processing GPS ist von den Anforderungen der Anwendung abhängig. Ein Genauigkeitsvorteil eines Verfahrens ist nicht vorhanden. Die Möglichkeiten zur Kontrolle und Analyse von Echtzeit-Ergebnissen entfallen. In statischen Anwendungen werden deshalb die Koordinaten eines Punktes mehrfach bestimmt, um aus den redundanten Daten die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu beurteilen. Dies ist in kinematischen Anwendungen nicht möglich, so daß weiterhin Vorteile für eine Aufzeichnung der Meßdaten bestehen. In Hinblick auf das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren der strengen GPS Parametrisierung sind Informationen über die aufgetretenen Mehrdeutigkeiten und deren Bestimmung notwendig, die gegenwärtig nur aus den Rohdaten abgeleitet und nicht vom GPS Empfänger bereitgestellt werden.

Generell entfällt die häusliche Nachbereitung der GPS Messung bei den GPS Echtzeitverfahren, wodurch eine Zeit- und Kosteneinsparung im laufenden Betrieb erreicht wird. Für die

wetterabhängige Aerotriangulation erlauben permanent verfügbare Referenzstationen, die Mobilisierungskosten für GPS gestützte Auswertungen erheblich zu reduzieren, wobei jedoch die Nutzung von Rohdaten der Referenzstationen für detaillierte Analysen in der GPS Auswertung zur Zeit noch sinnvoller erscheint. Anders sind die Vorteile in der Bildflugnavigation zu sehen, die durch GPS Echtzeitverfahren deutlich verbessert werden können.

## **2.2 Aerotriangulation/Photogrammetrische Blockausgleichung**

### **Beschreibung und Status**

Aerotriangulation ist der allgemeine Begriff, um durch photogrammetrische Methoden unter Verwendung von Paßpunkten Koordinaten von Neupunkten aus einer Serie von sich überlappenden Luftbildern (Streifen, Block) zu bestimmen (Schwidefsky, Ackermann 1976, Faig 1984). Die Methoden zur Auswertung der Luftbilder werden als Blockausgleichung bezeichnet.

Die heutige Blockausgleichung wurde erst durch Entwicklungen in der Computertechnologie ermöglicht, die es erlaubten, die große Anzahl von Daten und Unbekannten simultan in einer Ausgleichung zu bewältigen. Im Bereich der Photogrammetrie wurden hierfür die grundlegenden analytischen Verfahren von Schmid (1958, 1959) entwickelt, die erst den heutigen Leistungsstand der Aerotriangulation ermöglichten. Mit der Einführung zusätzlicher Parameter (Müller 1971) und einer damit verbundenen Genauigkeitssteigerung ist die mathematische Behandlung der heutigen Bündelblockausgleichung grundsätzlich festgelegt (Jacobsen 1980). Seit den frühen siebziger Jahren sind Blockausgleichungsprogramme verfügbar, die entweder Bildkoordinaten oder Modellkoordinaten als Eingangsgrößen verwenden (Faig 1984, Konecny, Lehmann 1984).

Bei der Blockausgleichung unabhängiger Modelle wird die relative Orientierung zweier Bilder mit Hilfe von photogrammetrischen Auswertegeräten bestimmt, und es werden Modellkoordinaten in die Blockausgleichung eingeführt. Dort werden simultan die absoluten Orientierungen aller Bildpaare eines Verbandes ermittelt. Die relative und absolute Orientierung werden somit unabhängig voneinander durchgeführt. Die Bündelblockmethode - auch als analytische Aerotriangulation bezeichnet - geht von der grundlegenden Kollinearitätsgleichung aus, die Bildpunkt, Projektionszentrum und Objektpunkt in einer Geradengleichung verbindet (Konecny, Lehmann 1984). Alle Unbekannten werden durch einen simultanen räumlichen Rückwärtsschnitt aller Bilder eines Verbandes in der Ausgleichung bestimmt. Beobachtungsgrößen sind die an einem Auswertegerät bestimmten Bildkoordinaten. Die Bündelblockmethode ist die strenge Umsetzung des mathematischen Modells und sollte dementsprechend anderen Verfahren überlegen sein. Im folgenden wird nur auf die Bündelblockmethode oder allgemein auf die Blockausgleichung eingegangen.

Wesentlich für die Anwendung der Kollinearitätsbedingung ist die Kenntnis der äußeren Orientierung, die in der klassischen Aerotriangulation durch Paßpunkte indirekt bestimmt wird oder durch geeignete Sensoren direkt gemessen werden kann.

## Fehlereinflüsse und Genauigkeit

Ausgangsmaterial einer Blockausgleichung sind streifen- oder blockförmige Bildverbände mit mindestens 60% Längs- und 20% Querüberdeckung. Die Eingangsgrößen in die Bündelblockausgleichung sind Bildkoordinaten, die alle Fehlereinflüsse des photographischen Bildes und der Bildmessung enthalten. Die Geometrie der Zentralprojektion ist somit nur unzureichend gegeben, so daß vor der weiteren Verarbeitung Korrekturen oder in der Auswertung entsprechende Parameter einzuführen sind, um die projektiven Beziehungen des mathematischen Modells zu erfüllen.

Die Bildkoordinaten werden in photogrammetrischen Auswertegeräten bestimmt und sind zunächst im Maschinenkoordinatensystem definiert. Eine Transformation auf das Bildkoordinatensystem sowie weitere Reduktionen der Bildkoordinaten sind daher notwendig. Zur Reduktion in das Bildkoordinatensystem werden die Rahmenmarken mit unterschiedlichen Transformationsansätzen verwendet.

Fehlerkomponente		Korrektur	Selbstkalibrierung
	[ $\mu\text{m}$ ]		
Optische Verzeichnung	< 2-5	✓	✓
Mechanik der Kamera	< 5	✓	✓
Bild- /Filmdeformation	< 5	✓	✓
atmosphärische Refraktion	0.1-20 <sup>1)</sup>	✓	✓
Erdkrümmung	- 1-80 <sup>1)</sup>	✓	✓
Bildkoordinatenmessung	1-5	-	-

<sup>1)</sup> u.a. abhängig von Kamerakonstante c und Flughöhe h: c=0.15 m, h=1-8 km

Tab. 2.3: Fehlerkomponenten der Blockausgleichung und Berücksichtigung als Korrektur oder durch Selbstkalibrierung

Weitere Ursachen für Abweichungen der Bildkoordinaten vom tatsächlichen physikalischen Aufnahmevorgang sind vielschichtig. Tabelle 2.3 faßt die wichtigsten Fehlerkomponenten und deren Größenordnung zusammen. Neben den allgemeinen Verzeichnungsfehlern der Kameraoptik und -mechanik bestehen zeit-, temperatur- und luftdruckabhängige Einflüsse auf diese Komponenten, die nur schwer bestimmbar sind. Ebenso entstehen durch Änderungen der Kamerakonfiguration wie Wechsel der Filter oder Filmkassetten systematische Fehler. Bild- und Filmdeformation im Entwicklungsprozeß der Aufnahmen, aber auch eine Nichtplanlage des Filmes während der Aufnahme sind weitere Fehlerquellen.

Für die atmosphärische Refraktion wird eine Standardatmosphäre angenommen, die den wesentlichen Anteil korrigiert, aber zufällige und systematische Restfehler hinterläßt. Dagegen kann die Erdkrümmung in approximativen oder strengen Verfahren berücksichtigt werden (Kraus 1996).

Die heutigen photogrammetrischen Auswertegeräte erlauben unter normalen Bedingungen hohe Genauigkeiten von besser als 2  $\mu\text{m}$ . Die Bildkoordinatenmessung ist jedoch zusätzlich vom Bediener abhängig, erreicht aber in der Wiederholbarkeit von Bildkoordinatenmessungen vergleichbare Werte im Bereich von 2  $\mu\text{m}$ .

Die analytische Photogrammetrie bietet die Möglichkeit zur rechnerischen Korrektur aller bekannten Bildfehler. Während sich die Bildkorrekturen zuerst auf Kalibrierungen der Kameras gestützt haben, werden heute bei hohen Genauigkeitsforderungen systematische Bildabweichungen durch zusätzliche Parameter (Selbstkalibrierung) in der Ausgleichung geschätzt. Dies ist insbesondere bei Bildverbänden möglich und führt im Vergleich zu Labor- oder Testfeldkalibrierungen von Kameras zu besseren Ergebnissen. Zusätzliche Parameter lassen sich zudem flexibler handhaben und können für alle, für mehrere Bilder oder Teile eines Blockes angesetzt werden (Jacobsen 1980, Konecny, Lehmann 1984).

Die zusätzlichen Parameter der Selbstkalibrierung werden so formuliert, daß sie sich zur Kompensation von sämtlichen systematischen Fehlern eignen (Tab. 2.3), vor allem systematische Fehler der Objektivverzeichnung, des Filmverzuges und der Refraktion. Die Möglichkeiten gehen so weit, daß bei einer Selbstkalibrierung die Rahmenmarkensollkoordinaten nicht zwingend bekannt sein müssen. Abweichungen in den Rahmenmarken von einem wahren Wert wirken sich auf alle Bilder gleich aus, so daß der Einfluß durch entsprechend formulierte zusätzliche Parameter in der Bündelblockausgleichung eliminiert werden kann. Statt der Soll-Koordinaten werden die zentrierten Rahmenmarkenkoordinaten des ersten Bildes benutzt (Jacobsen 1980). Die Selbstkalibrierung ist ebenso in der Lage, den gesamten Einfluß der Refraktion auf die Geometrie der Abbildung zu berücksichtigen, wenn entsprechend gewählte radialsymmetrische Parameter verwendet werden (Jacobsen 1980). Die Erfassung systematischer Restfehler der atmosphärischen Refraktion ist dadurch grundsätzlich gewährleistet.

Die Selbstkalibrierung hat sich in der Blockausgleichung als eine universelle Methode zur Erfassung aller bekannten, aber auch nicht im Detail bekannten Fehler und Restfehler mit systematischem Charakter durchgesetzt. Die Genauigkeit der Blockausgleichung läßt sich hierdurch deutlich steigern. Dies wird durch die heute erzielbaren Genauigkeiten von 3-5  $\mu\text{m}$  in Blockausgleichungen bestätigt.

Die erreichbaren Genauigkeiten in der konventionellen Aerotriangulation setzen signalisierte Punkte in einem regelmäßigen Blockverband mit 60% Längs- und 20% Querüberdeckung voraus. Der Blockrand muß dabei für die Lagekomponente mit Paßpunkten dicht besetzt sein und ist dann unabhängig von der Blockgröße. Für die Höhengenaugkeit sind die Anforderungen an Paßpunktanzahl und -anordnung wesentlich höher. Es werden Paßpunktketten quer zur Flugrichtung benötigt, deren Abstand von der Anzahl der zu überbrückenden Modelle abhängig ist. Wirtschaftlichkeits- und Genauigkeitsüberlegungen empfehlen vier Modelle zwischen den Paßpunktketten (Kraus 1995).

Die Genauigkeit der Blockausgleichung wird aus der Genauigkeit eines Einzelmodells  $\sigma_0$ , also der Bildkoordinatengenauigkeit, mit den verbleibenden Fehlerkomponenten abgeleitet. Die Lagegenauigkeit der Blockausgleichung entspricht im wesentlichen der Genauigkeit des Einzelmodells. Für eine Übertragung der Genauigkeit in den Objektraum ist die Multiplikation mit dem Bildmaßstab für die Lagekomponente vorzunehmen. Die Genauigkeit der Höhen-

komponente  $\sigma_{0z}$  für das Einzelmodell ist abhängig von der Flughöhe und wird mit 0.03-0.04‰ der Flughöhe angegeben (Kraus 1995). Tabelle 2.4 gibt den Zusammenhang zwischen Karten- und Bildmaßstab einerseits und der Flughöhe andererseits an (nach Kraus 1995).

Kartenmaßstab	Bildmaßstabszahl	Flughöhe[m]
1:m <sub>k</sub>	m <sub>B</sub>	h (c=0.15 m)
1:1000	6300 - 9500	945 - 1425
1:5000	14000 - 21000	2100 - 3150
1:10000	20000 - 30000	3000 - 4500
1:25000	32000 - 47000	4800 - 7050
1:50000	45000 - 67000	6750 - 10050

Tab. 2.4: Zusammenhang zwischen Karten- und Bildmaßstab sowie Flughöhe bei einer Weitwinkelkamera

In Abhängigkeit von der Anzahl der überbrückten Modelle  $n_M$  verschlechtert sich die Höhengenaugigkeit  $\sigma_Z$  der Blockausgleichung nach der folgenden Überschlagsformel:

$$\sigma_Z = (0.3 + 0.2 \cdot n_M) \cdot \sigma_{0z} \quad (2.1)$$

Die Höhengenaugigkeit nimmt linear mit der Anzahl der überbrückten Modelle ab, was für eine Änderung der empfohlen Anzahl  $n_M$  von 4 auf 5 bereits eine Verschlechterung der Höhengenaugigkeit von 15% bedeutet.

Aus den Bedingungen an Anzahl und Anordnung der Paßpunkte für die erzielbare Genauigkeit der Blockausgleichung wird die Forderung nach einer Reduzierung von signalisierten Paßpunkten in der Aerotriangulation deutlich.

### Digitale Photogrammetrie

Die Digitale Photogrammetrie eröffnet gegenwärtig neue Möglichkeiten für die Aerotriangulation, um weitere Teilbereiche der Auswertarbeiten zu automatisieren und somit weitere zeit- und kostenintensive Arbeitsschritte zu rationalisieren. Die Digitale Photogrammetrie setzt voraus, daß die Bilder als photogrammetrische Ausgangsdaten in digitalisierter Form vorliegen.

Die Arbeiten nach dem Bildflug und der Entwicklung des Bildmaterials umfassen die Messung der Bildkoordinaten, der Paß- und Verknüpfungspunkte sowie die Blockausgleichung. Die Blockausgleichung ist bis auf wenige manuelle Eingriffe (Datenbereinigung, Fehlerbehandlung, Qualitätskontrolle etc.) bereits automatisiert (Fritsch u.a 1994). Wesentlich für die Aerotriangulation ist die Auswahl und Messung von zweckmäßigen Verknüpfungspunkten, die möglichst auf vielen Bildern und gleichmäßig verteilt sein sollen (Schenk 1995). Ausgehend von digitalen Bildern können die Bildkoordinaten homologer Verknüpfungspunkte automatisch festgelegt und ermittelt werden. Dadurch lassen sich Paßpunkte durch Verfahren der digitalen Bildzuordnung lokalisieren und bestimmen (Fritsch u.a 1994, Schenk 1995).

Gegenüber der konventionellen Aerotriangulation verschlechtert sich zunächst die Genauigkeit durch die automatisch bestimmten Verknüpfungspunkte, jedoch ergeben sich durch die große Anzahl von verfügbaren Bildkoordinaten vergleichbare Genauigkeiten der äußeren Orientierung und somit entsprechende Genauigkeiten der Objektkoordinaten in der Blockausgleichung (Schenk 1995). Grundsätzlich bereitet jedoch die automatische Identifizierung und Messung von Paßpunkten größere Schwierigkeiten, so daß eine direkte Messung der äußeren Orientierung durch GPS oder andere Sensoren vorteilhaft bleibt (Heipke 1996a, 1996b).

### **2.3 Einsatz von GPS in der Aerotriangulation und GPS gestützte Blockausgleichung**

Innerhalb der Aerotriangulation ergeben sich unterschiedliche Einsatzgebiete von GPS, die sich erheblich durch die einzusetzende GPS Empfängertechnologie, die GPS-Verfahren und Auswertung unterscheiden. Der Einsatz von GPS in der Aerotriangulation umfaßt die Bereiche

- Paßpunktbestimmung
- Bildflugnavigation
- Orientierungsbestimmung des Flugzeuges
- Bestimmung des Aufnahmezentrums.

#### **Paßpunktbestimmung**

Auf die Paßpunktbestimmung mit GPS wird nicht näher eingegangen, da sie ein Standardverfahren in der Landesvermessung darstellt und in Abhängigkeit von Genauigkeit und verfügbarer Ausrüstung auf unterschiedliche Arten durchgeführt werden kann. Beispiele speziell für photogrammetrische Aufgabenstellungen finden sich beispielsweise in Fritzensmeier u.a. 1990, Fritzensmeier 1992. Die Entwicklung geht jedoch auch hier von der statischen Messung zu kinematischen bzw. kinematischen Verfahren in Echtzeit, die die häusliche Nachbereitung reduzieren und den ökonomischen Einsatz von GPS weiter steigern.

#### **Bildflugnavigation**

Aufgabe der Navigation ist es, das Flugzeug nach der Flugstreifenanordnung und innerhalb der Überlappungstoleranzen für Längs- und Querüberdeckung so zu steuern, daß die Vorgaben des Bildfluges erfüllt werden oder gegebenenfalls gezielte Einzelaufnahmen möglich sind. Kurskorrekturen sind insbesondere erforderlich, wenn durch Wind eine Abtrift des Flugzeuges verursacht wird. Der Abtriftwinkel kann bei bekannter Geschwindigkeit und Richtung von Wind und Flugzeug berechnet werden oder wird während des Fluges nachgestellt (Konecny, Lehmann 1984).

Die Befliegung wird heute operationell durch GPS Navigationssysteme kontrolliert, die bislang weitestgehend unabhängig und zusätzlich zu dem GPS Empfänger zur Bestimmung des Aufnahmezentrums installiert sind. Die Flugnavigation wird in der Regel mit einem GPS Navigationsempfänger unter Verwendung der C/A- Code-Messungen in Echtzeit durchgeführt. Die Genauigkeitsforderungen sind gering, können jedoch durch die künstliche Verschlechterung der GPS Signale teilweise nicht eingehalten werden. Für einen Bildmaßstab von 1:5000 bis 1:100000 werden Genauigkeiten in den drei Koordinatenkomponenten von

30 m bis 500 m gefordert, so daß relatives GPS für großmaßstäbige Bilder eingesetzt werden muß.

Die Bildflugnavigation ist eine Komponente in einem Bildflugmanagementsystem, das Bildflugplanung, Bildflugüberwachung, Erfassung und Steuerung flugrelevanter Daten, Anzeige von Flugführungsinformation und Bildflugdokumentation umfaßt (Winter 1995). Die Managementsysteme werden in Zukunft aber auch die Erfassung von Positions- und Orientierungsdaten übernehmen. Es sind erste vollständige Systeme auf dem Markt, die bereits verbesserte DGPS Genauigkeit innerhalb eines Bildflugmanagementsystems für die Bildflugnavigation anbieten.

### **Orientierungsbestimmung**

Grundsätzlich eignet sich GPS auch zur Bestimmung der räumlichen Orientierungswinkel aus einem Antennenfeld von mindestens drei Antennen. Hierzu werden spezielle GPS Empfänger, die Signale mehrerer Antennen verarbeiten können oder mehrere GPS Empfänger eingesetzt.

Die Orientierungsbestimmung mit GPS verwendet die GPS Trägerphasensignale entweder für eine Koordinatenbestimmung der Antennen oder für eine interferometrische Messung der Signale (Hartl, Wehr 1986, Schade, Cramer 1994). Aus den Koordinatendifferenzen bzw. aus den Änderungen der Trägerphasen werden Winkeländerungen abgeleitet.

Durch die kurzen Basislinien bei der GPS Orientierungsbestimmung entfallen die konventionellen GPS Fehlereinflüsse wie Bahnfehler, Uhrfehler, Atmosphäre sowie SA. Vorherrschende Fehlerursachen sind Mehrwegeeffekte, Antennenphasenzentrumsvariationen und die Genauigkeit der Trägerphasenmessung. Die Längen der Basislinien definieren andererseits die erzielbare Genauigkeit der Orientierungsbestimmung, so daß vor allem im luftgestützten Einsatz die Genauigkeit durch den geringen Abstand der Antennen eingeschränkt ist. Zusätzlich werden Fluganwendungen durch die nicht starre Flugzeugkonstruktion beeinflusst. Die Tragflächen, aber auch der Flugzeugrumpf sind aus flugdynamischen Gründen flexibel, so daß beispielsweise Änderungen von mehreren Zentimetern zwischen den Tragflächen auftreten (wing flexure), die als nicht erfaßbare oder modellierbare Fehler der Antennenpositionen in die Orientierungsbestimmung eingehen (Schade, Cramer 1994).

Die notwendige Genauigkeit der Neigungsbestimmung (die Kantung des Bildes ist null) für die Photogrammetrie kann über die geforderte Auflösung der Bilddaten abgeleitet werden (Schade 1994, Schade, Cramer 1994). Um eine eindeutige Zuordnung von Bildpixeln zu ermöglichen, sollte der Einfluß von Neigungsfehlern kleiner als ein Pixel sein. Daraus ergeben sich in einer Abschätzung die in Tab. 2.5 angegebenen Genauigkeitsanforderungen.

Mit GPS ergeben sich bei einer Positionsgenauigkeit von 2-5 mm auf einer Basislänge von 5-10 m theoretisch Genauigkeiten von 10-50 mgon. Bei Fluganwendungen werden aber vor allem durch die Deformationen des Flugzeugrumpfes und durch Mehrwegeeffekte weitaus geringere Genauigkeiten erreicht.

	Pixelgröße	Brennweite	Genauigkeit
	[ $\mu\text{m}$ ]	[cm]	[mgon]
Katasteranwendungen	10 - 25	8	8 - 20
		15	4 - 10
		30	2 - 5
Orthophoto	100	15	42
CCD-Kameras	10 - 30	1.5	42 - 130
		5	12 - 38

Tab. 2.5: Genauigkeitsanforderungen an die Neigungsbestimmung (nach Schade 1994)

Die direkte Erfassung der vollständigen äußeren Orientierung mit GPS für präzise fluggestützte Anwendungen erreicht damit nicht die geforderten Genauigkeiten, so daß GPS auf die Erfassung des Aufnahmezentrums beschränkt ist. Bei Einschränkung der photogrammetrischen Anwendungen auf mittlere und niedrige Genauigkeitsanforderungen kann dagegen GPS zur Orientierungsbestimmung durchaus sinnvoll sein. Als weitere technische Lösung sind Inertialsysteme (INS) und deren Verknüpfungen mit GPS (GPS/INS) zur fluggestützten Orientierungsbestimmung in der Erprobung (z.B. Schwarz 1995).

### GPS gestützte Blockausgleichung

Die Objektkoordinaten des Aufnahmeortes werden heute durch GPS bestimmt und in die Blockausgleichung eingeführt. Die verwendeten Shift- und Drift-Ansätze in der gemeinsamen Blockausgleichung berücksichtigen systematische GPS Koordinatenfehler, so daß Effekte durch falsch festgesetzte Mehrdeutigkeiten aufgefangen werden können. Die korrekte Bestimmung der Mehrdeutigkeiten wird deshalb nicht als zwingend notwendig angesehen, so daß für problematische GPS Auswertungen die Mehrdeutigkeiten pro Streifen festgesetzt und die vorhandenen systematischen Fehler durch zusätzliche Parameter in der Blockausgleichung kompensiert werden.

Die Funktionalität der Shift- und Drift-Ansätze hat dazu geführt, daß systematische Fehler durch ungenaue Antennenexzentrizität oder veränderte Abtriftwinkel während einer Befliegung in Kauf genommen werden, da die streifenweise lineare Approximation der GPS Koordinaten die Effekte ebenfalls absorbiert. Für strenge Verfahren führt dies jedoch zu nicht erfaßbaren systematischen Fehlern in den Daten, die die Ergebnisse der Verfahren negativ beeinflussen.

Die aus GPS abgeleiteten Aufnahmezentren können als zusätzliche Paßpunkte aufgefaßt werden und reduzieren damit die Anzahl von Bodenpaßpunkten zur indirekten Bestimmung von Elementen der äußeren Orientierung. Die Anzahl der Paßpunkte kann auf ein Minimum von vier Paßpunkten in den Blockecken reduziert werden, wenn zusätzliche Querstreifen an den Enden des Blockes geflogen werden oder eine Querüberdeckung von 60% vorliegt (Ackermann 1992, Ackermann, Schade 1993). Zu Kontrollzwecken in der Blockausgleichung ist es üblich, Doppelpaßpunkte, d.h. zwei benachbarte Paßpunkte, zu verwenden. Hierdurch können Fehler in einem der Paßpunkte aufgedeckt werden.

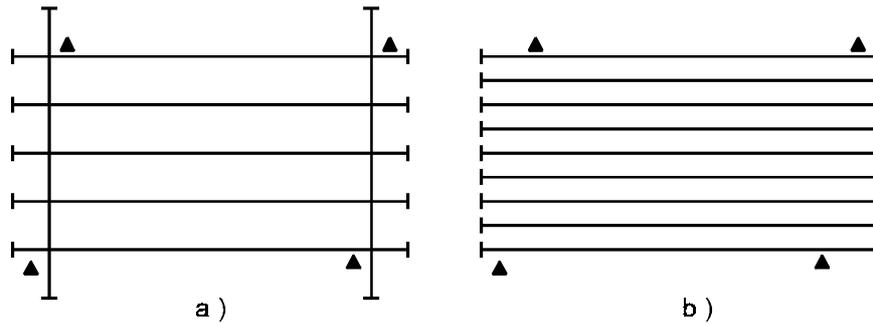


Abb. 2.2: Blockkonfiguration und Paßpunktanordnung, a) 20% Querüberdeckung und Querstreifen, b) 60% Querüberdeckung

Theoretisch ist die Aerotriangulation ohne Bodenpaßpunkte durch die GPS gestützte Blockausgleichung möglich (Ackermann 1990). In der Regel sind die Objektkoordinaten jedoch nicht in dem vom GPS verwendeten Bezugssystem (WGS84) zu bestimmen, so daß eine Datumstransformation durchzuführen ist. Wird eine Sieben-Parameter-Transformation mit drei Translationen, drei Rotationen und einem Maßstabsfaktor zugrunde gelegt, so sind dadurch die minimal notwendigen Paßpunkte definiert (zwei Vollpaßpunkte und ein Höhenpaßpunkt). In der GPS gestützten Blockausgleichung werden die Paßpunkte aber auch für die Bestimmung der zusätzlichen GPS abhängigen Parameter benötigt, so daß einerseits für einen Datumsübergang und andererseits für die Modellierung systematischer GPS Fehler eine Mindestanzahl von Paßpunkten notwendig bleibt.

Die erreichbare Objektgenauigkeit der GPS gestützten Blockausgleichung ist unabhängig vom Bildmaßstab und der Blockkonfiguration (Blockgröße, Blockform). Dies trifft im wesentlichen auch für den Einfluß der Paßpunktgenauigkeit zu (Ackermann 1992). Damit ist die erreichbare Objektgenauigkeit von der Standardabweichung der Gewichtseinheit der Blockausgleichung und von der Genauigkeit der GPS Koordinaten abhängig (Ackermann 1990, 1992).

Für Planungszwecke und für Vergleiche unterschiedlicher GPS gestützter Blockausgleichungen wurden aus Simulationen theoretische Überschlagsformeln abgeleitet (Ackermann 1992), die durch empirische Ergebnisse überprüft und angepaßt wurden (z.B. Burman, Torlegard 1994). Die Genauigkeit der GPS gestützten Blockausgleichung kann unter der Voraussetzung, daß für die Genauigkeit der GPS Koordinaten  $\sigma_{\text{GPS}}$  gilt:

$$\sigma_{\text{GPS}} \leq \sigma_0 \cdot m_B \quad (2.2)$$

in Abhängigkeit von der Genauigkeit der Blockausgleichung  $\sigma_0$  und der Bildmaßstabszahl  $m_B$  für die Objektkoordinaten in der Lage ( $\sigma_{x,y}$ ) und der Höhe ( $\sigma_z$ ) aus den folgenden Relationen abgeschätzt werden:

$$\sigma_{x,y} \approx 1.5 \cdot (\sigma_0 \cdot m_B) , \quad (2.3)$$

$$\sigma_z \approx 2.0 \cdot (\sigma_0 \cdot m_B) . \quad (2.4)$$

Die Skalierung mit der Standardabweichung der Gewichtseinheit aus der Blockausgleichung  $\sigma_0$  und der Bildmaßstabszahl  $m_B$  erlaubt einen normierten Vergleich unterschiedlicher Blockbedingungen. Die Relationen gehen jedoch grundsätzlich von einer Befliegung mit Querstreifen (Abb. 2.2 a) und freien Drift-Parametern für jeden Streifen aus.

Empirische Untersuchungen mit unterschiedlichen Programmpaketen haben die Zweckmäßigkeit des Shift- und Drift-Ansatzes bestätigt (z.B. Jacobsen, Li 1992, Li 1992, Jacobsen 1994b, Frieß, Heuchel 1992). Ein umfangreicher international durchgeführter Vergleich ist in Burman, Torlegard (1994) zu finden, der die Reduktion der Paßpunktanzahl auf vier Paßpunkte in den Blockecken aufzeigt.

### 3. Grundlagen und Einflußparameter

Die GPS gestützte Blockausgleichung wird operationell eingesetzt und stellt inzwischen ein anerkanntes Verfahren dar. Zur Kontrolle des Verfahrens wird das Potential der Paßpunkt-reduktion noch nicht vollständig ausgenutzt. Es wird mit einer reduzierten, jedoch nicht mit einer minimalen Paßpunktanzahl gearbeitet. Generell sind die Einflußparameter einer GPS gestützten Blockausgleichung bekannt und in der Literatur angegeben (Kraus 1995, Kraus 1996).

Die Verknüpfung von GPS und Blockausgleichung verlangt eine Modellierung in einem einheitlichen Koordinatensystem. Die verwendeten Koordinatensysteme und die damit verbundenen Transformationen werden im folgenden dargestellt. Dabei werden auch systematische, nicht erfaßte Beziehungsänderungen der Systeme angesprochen, die ein Problem in der Modellierung darstellen können. Die Auswirkungen auf Ansätze zur Ausgleichung von GPS Aufnahmezentren in der Bündelblockausgleichung werden angesprochen. Dies stellt in gewisser Weise einen Vorgriff auf nachfolgende Kapitel dar, erleichtert jedoch das Verständnis der durchgeführten Voruntersuchungen.

#### 3.1 Koordinatensysteme

Von besonderer Bedeutung sind in der Blockausgleichung zwei Koordinatensysteme: das Bildkoordinatensystem  $x_B$  und das Objektkoordinatensystem  $X^{AT}$  (Konecny, Lehmann 1984). Durch die GPS Beobachtungen kommt als zusätzliches Koordinatensystem das Bezugssystem  $X^{GPS}$  des Satellitensystems (Seeber 1993) hinzu. Abbildung 3.1 stellt die grundlegenden Beziehungen dar.

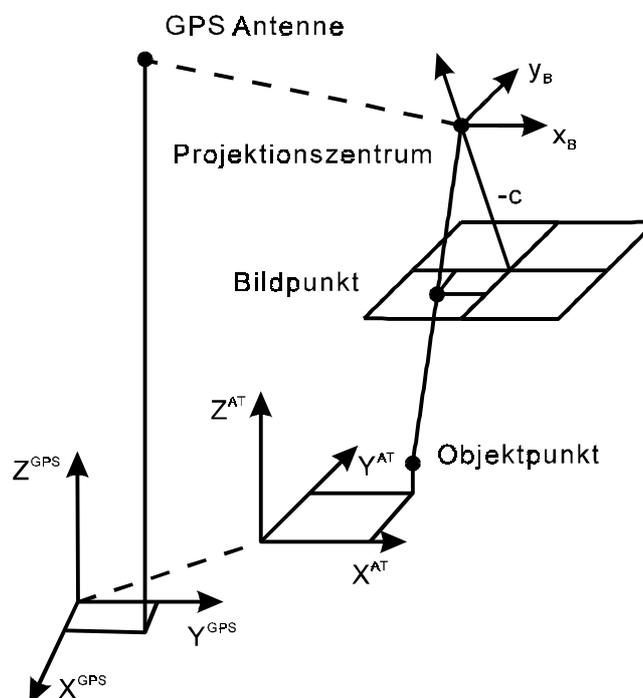


Abb. 3.1: Koordinatensysteme in der GPS/Block-Ausgleichung

Die Blockausgleichung verwendet ein kartesisches Bildkoordinatensystem, in dem die Strahlenbündel definiert sind ( $\mathbf{x}_B = [x_B \ y_B \ -c]$ ), und ein kartesisches Koordinatensystem, das über Paßpunkte das terrestrische Koordinatensystem  $\mathbf{X}^{AT}$ , den Objektraum, festlegt. Die Satellitenvermessung verwendet ein globales kartesisches Koordinatensystem  $\mathbf{X}^{GPS}$ , das sich jedoch vom Objektkoordinatensystem in Datum und in Definition unterscheidet (siehe Kapitel 3.3 und 3.2).

Das terrestrische Koordinatensystem ist in der Praxis zweigeteilt in ein Bezugssystem für die Lage und für die Höhe. Da das Lagebezugssystem auf dem Ellipsoid und das Höhenbezugssystem durch das Schwerefeld (Geoid) definiert ist, ist das terrestrische Objektkoordinatensystem als Kombination der beiden Bezugssysteme zunächst nicht kartesisch. Geographische Koordinaten sind mathematisch schwerer zu handhaben und werden in der Blockausgleichung nicht verwendet. Für die photogrammetrische Auswertung wird die Trennung in Lage- und Höhenkomponente benötigt, so daß die Blockausgleichung in einem topozentrischen Koordinatensystem oder in einem kartographischen Abbildungssystem (z.B. Gauß-Krüger Abbildung) durchgeführt wird. Die Transformation der terrestrischen Koordinaten in ein Tangentialsystem (topozentrisches Koordinatensystem) stellt dabei ein strenges Verfahren dar (Kraus 1996). Bei der Verwendung von Abbildungen ergeben sich jedoch Fehleranteile durch die Erdkrümmung und durch die Abbildung in die Ebene. Das photogrammetrische Modell ist jedoch flexibel und kann die Ausgleichung in unterschiedlichen kartographischen Abbildungen durchführen, indem in einem Näherungsverfahren die Bildkoordinaten um die Effekte der Abbildung korrigiert werden (Kraus 1996). In Kombination von Abbildung und Höhenkomponente des Bezugssystems ergibt sich somit ein quasi kartesisches Koordinatensystem, dessen Fehler für die meisten Anwendungen in der Lage vernachlässigbar sind. Der Einfluß des Höhensystems auf die Blockausgleichung wird in Kapitel 3.2 diskutiert.

Für die in dieser Arbeit vorgestellte strenge GPS Parametrisierung in der Blockausgleichung ist die Wahl des Koordinatensystems bei der Berechnung der Designmatrix  $\mathbf{QA}^T$ , die als Schnittstelle zwischen GPS Auswertung und Blockausgleichung verwendet wird und sämtliche geometrische Information aus der GPS Ausgleichung enthält (Kapitel 6), ebenfalls zu berücksichtigen. Die in das Landessystem transformierten und in der Gauß-Krüger Abbildung dargestellten GPS Koordinaten können zunächst direkt verwendet werden. Abgeleitete Größen aus dem Satellitensystem wie Azimute und Elevation zu einem Satelliten sind jedoch als weitere Ausgangswerte für die Modellbildung zunächst in einem topozentrischen Koordinatensystem im Satellitendatum gegeben.

Um ein lokales Bezugssystem (z.B. topozentrisches System) streng in eine kartographische Abbildung zu konvertieren, muß eine Rotation vom Betrag der Meridiankonvergenz um die Z-Achse durchgeführt werden (Skaloud u.a. 1994). Die Nordrichtung der kartographischen Abbildung (Gitter-Nord) fällt nur im Hauptmeridian mit Geographisch-Nord zusammen und weicht in jedem anderen Punkt um einen Winkel, die Meridiankonvergenz, von Geographisch-Nord ab. Die Meridiankonvergenz ist abhängig vom Längenunterschied vom Mittelmeridian und der geographischen Breite. Im deutschen Gauß-Krüger-System erreicht die Meridiankonvergenz Maximalwerte von etwa  $\pm 1^\circ 10'$  (Hake 1982). Die Meridiankonvergenz ist daher bei Verwendung einer kartographischen Abbildung in der Blockausgleichung mit strenger GPS Parametrisierung als Korrektur für Satellitenazimute anzubringen, wenn diese aus einem lokalen Bezugssystem stammen.

### 3.2 Geoid

Die Satellitenauswertung liefert ellipsoidische Koordinaten, die nicht direkt mit dem Schwerfeld verbunden sind. Die Höhen der Landessysteme beziehen sich dagegen auf das Schwerfeld, so daß eine Überführung der Höhenkoordinaten notwendig wird (Torge 1980, Seeber 1993). Dieser Aspekt ist nicht nur für die kombinierte Blockausgleichung mit GPS von Bedeutung, sondern allgemein für die Aerotriangulation sowie der GPS Anwendung. Eine strenge Berücksichtigung der Geoidhöhen ist einfach möglich, scheitert jedoch in der Praxis oftmals an der Verfügbarkeit von genauen Geoidmodellen. Bislang werden vorwiegend Koordinatentransformationen ohne Berücksichtigung der Geoidhöhen verwendet, da durch die Anpassung an eine große Anzahl von Höhenpaßpunkten in der konventionellen Aerotriangulation die entstehenden Fehler ausgeglichen und ausreichende Genauigkeiten erzielt werden (Schwiertz 1994). In der Praxis wurden daher keine weiteren Anstrengungen zur Verbesserung dieser Vorgehensweise unternommen. In der GPS gestützten Blockausgleichung sind die Voraussetzungen durch die reduzierte Paßpunktanzahl hierfür nicht mehr gegeben.

Der operationelle und präzise Einsatz der Satellitenverfahren im Vermessungswesen fordert verbesserte hochauflösende Geoidmodelle. Regionale Geoidlösungen sind mit Genauigkeiten von wenigen Zentimeter über 100 km, beispielsweise für die alten Bundesländer (Denker 1989), bestimmbar, aber weltweit nicht überall verfügbar. Deswegen werden ausgedehntere oder globale Geoidmodelle benötigt. Zusätzliche Daten aus den ehemaligen Ostblockländern und neue Schwerfeldmissionen im Meeresbereich führten in den letzten Jahren zu besser verteilten Ausgangsdaten (Denker 1995). Eine Quasigeoidlösung für den gesamten europäischen Bereich erlaubt Genauigkeiten von 1.5 cm über 10 bis 100 km Entfernung (Denker 1995, Denker u.a. 1996). Eine verbesserte globale Geoidbestimmung ist für das WGS84 Referenzsystem bestimmt worden (Malys u.a. 1997) und frei verfügbar. Die Genauigkeit liegt hier in Abhängigkeit von der geographische Lage besser als 0.5 m (Lemoine u.a. 1996) und wird weltweit im Bereich von 0.5-1.0 m angegeben (Malys u.a. 1997).

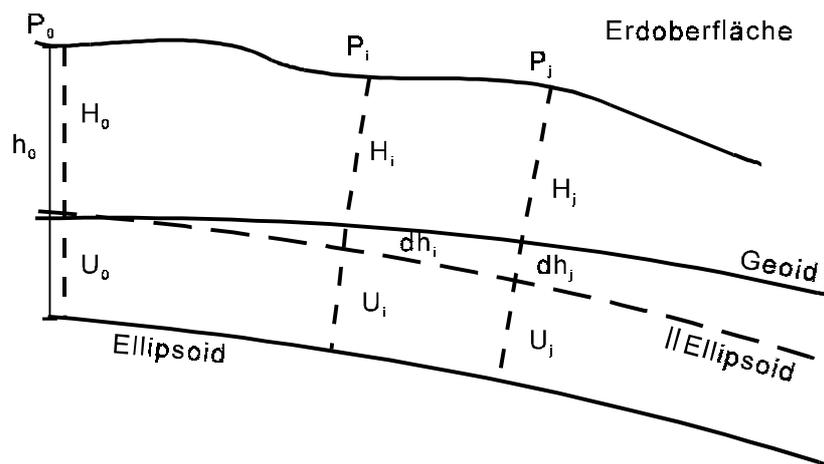


Abb. 3.2: Ellipsoidische Höhe  $h$  und orthometrische Höhe  $H$  sowie Fehler  $dh$  durch Vernachlässigung der Geoidundulation  $U$

Der Einfluß von Geoidunsicherheiten auf die Lagekoordinaten ist selbst bei Ausdehnungen von  $200 \times 200$  km vernachlässigbar. In der Höhenkomponente wirken sich Fehler jedoch im

vollen Umfang aus. Bei Anwendungen im klein- bis mittelmaßstäbigen Bereich kann die Unsicherheit des Geoids vernachlässigt werden (Frieß 1990a).

Abbildung 3.2 zeigt die Auswirkungen einer Vernachlässigung. Ein konstanter Unterschied zwischen Geoid und Ellipsoid wird durch den kompensierenden Effekt der datumsabhängigen Parameter in einer kombinierten Blockausgleichung aufgefangen (Schwiertz 1994). Verbleibende Fehler sind im wesentlichen von der Kippung des Geoids abhängig und wachsen mit zunehmender Blockgröße. Shift- und Drift-Parameter können im geringen Maße auch Kippungen des Geoids, jedoch keine starken Variationen des Geoids auffangen. Für kleine Ausdehnungen der Befliegungsgebiete wird der Effekt des Geoids vorwiegend einer konstanten Verschiebung entsprechen, so daß deshalb in der Praxis meist das Geoid in der kombinierten GPS/Block-Ausgleichung nicht berücksichtigt wird. Die strenge Parametrisierung kann nur einen konstanten Anteil durch die blockvarianten datumsabhängigen Parameter kompensieren. Alle weiteren Effekte, verursacht durch nicht berücksichtigte Geoidhöhen, stellen nicht modellierte systematische Fehler dar.

In Zukunft wird die Verwendung von genauen Geoidmodellen bereits in den GPS Auswerteprozess integriert werden, so daß eine strenge Berücksichtigung unproblematisch wird (siehe auch Abb. 3.3). Systematische Fehler können somit vorab vermieden werden und durch hochauflösende Geoiddaten lokale, bislang nicht berücksichtbare Effekte korrigiert werden.

### **3.3 Datumparameter**

Durch die unterschiedlichen Referenzsysteme der nationalen Landesvermessungen ist im allgemeinen ein Datumsübergang vom GPS Referenzsystem WGS84 in das Landessystem notwendig. Die Landessysteme sind oftmals nicht homogen, so daß keine landeseinheitlichen Transformationsparameter mit genügender Genauigkeit vorhanden sind. In der Praxis ist es deshalb üblich, innerhalb eines Projektes identische Punkte zu schaffen, um die Koordinatentransformation mit einer bekannten Unsicherheit durchführen zu können. Abbildung 3.3 gibt eine Übersicht über die notwendigen Koordinatentransformationen und der eigentlichen Datumstransformation (Niemeier 1995).

Die Bestimmung der Datumparameter durch eine räumliche Ähnlichkeitstransformation bzw. die Datumstransformation wird im dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem durchgeführt ( $X Y Z$ ). Hierfür sind streng die orthometrischen Höhen des Landessystems ( $z$ ) durch Anbringen der Geoidhöhen in ellipsoidische Höhen zu überführen. Als Zwischenschritt ist die Transformation der verebneten Koordinaten ( $x y z$ ) in ellipsoidische Koordinaten ( $\varphi \lambda h$ ) notwendig. Auf ausführliche Angaben der Transformationsformel wird verzichtet und auf die Literatur verwiesen (Torge 1980, Seeber 1993, Heck 1995).

Innerhalb der GPS gestützten Blockausgleichung werden trotz eines durchgeführten Datumsüberganges Transformationsparameter bestimmt, die aus den identischen Koordinaten der Projektionszentren im Satelliten- und Bezugssystem der Aerotriangulation gegeben sind. Somit können Restfehler aus der Datumstransformation aufgefangen werden. Die vollständige Bestimmung der Datumparameter in der gemeinsamen Blockausgleichung ist ebenfalls möglich.

Der Shift- und Drift-Ansatz ist gegenüber verbleibenden Restfehlern aus der Datumstransformation unempfindlich, da zumeist streifenweise Verschiebungen zur Kompensation systematischer GPS Koordinatenfehler zugelassen werden, die nicht von Datumstranslationen zu

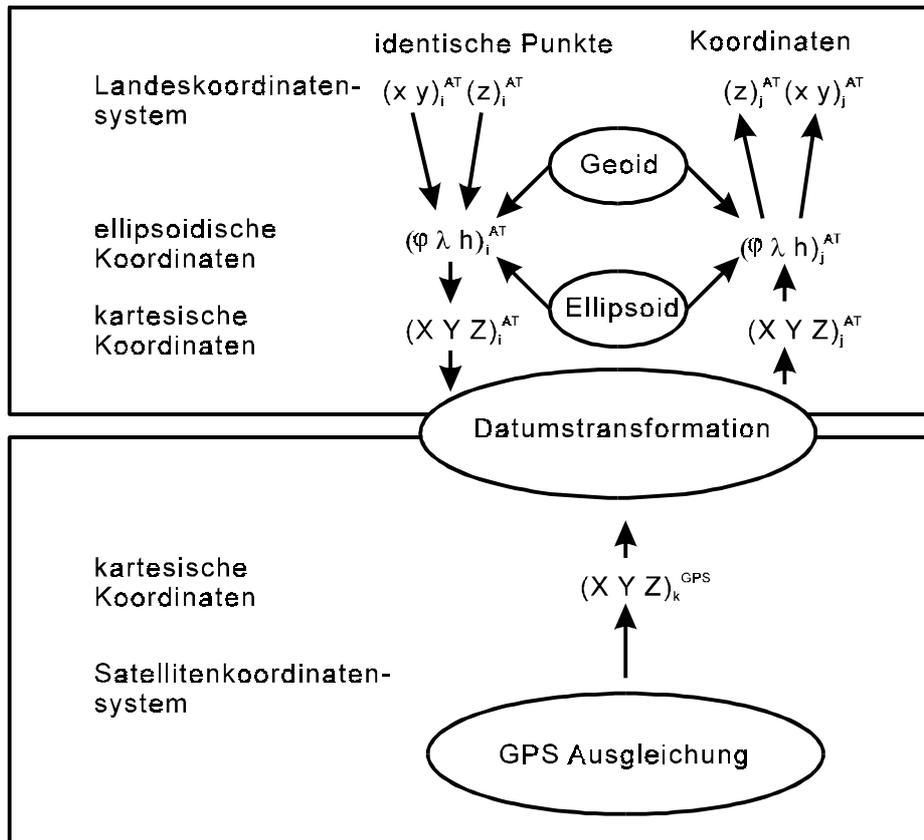


Abb. 3.3: Datums- und Koordinatentransformation vom Satelliten- in das Landessystem ( $\mathbf{X}^{GPS} \rightarrow \mathbf{X}^{AT}$ )

trennen sind. Bei der strengen GPS Parametrisierung werden zusätzlich Translationen der GPS Koordinaten nur für den gesamten Block geschätzt. Restfehler aus der Datumstransformation können somit nur kompensiert werden, wenn sie auf den gesamten Block gleich wirken.

Als Sonderfall, der in der Praxis bislang selten vorkommt, ist die Blockausgleichung im Satellitendatum anzusehen, wodurch keine Koordinatentransformation notwendig oder eine Transformation mit bekannten und genauen Transformationsparametern möglich ist. Mit dem vermehrten Einsatz der Satellitenvermessung gewinnen globale dreidimensionale Koordinatensysteme an Bedeutung. Die Landesvermessungen gehen dazu über, globale Koordinaten vorzuhalten, so daß in Zukunft die Blockausgleichung in diesem Datum durchgeführt werden kann.

### 3.4 Interpolation der GPS Koordinaten

Die GPS Beobachtungen und somit auch die zeitliche Koordinatenzuordnung erfolgen in diskreten Epochen innerhalb des präzisen GPS Zeitrahmens. Der Auslösezeitpunkt der Kamera wird innerhalb des GPS Zeitrahmens bestimmt, fällt aber gewöhnlich nicht mit einer GPS Beobachtungsepoche zusammen. Für die eindeutige Zuordnung von Aufnahme und GPS Koordinaten der Antenne werden deshalb die GPS Koordinaten auf den Auslösezeitpunkt, interpoliert.

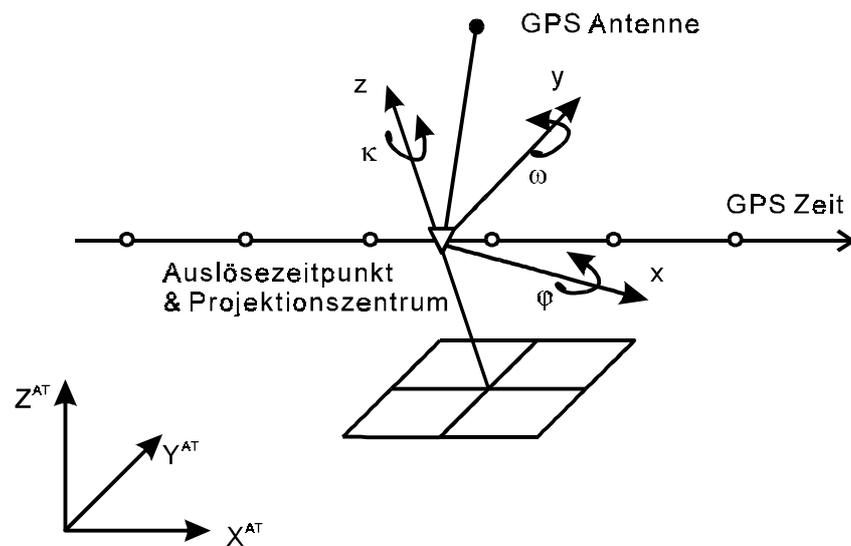


Abb. 3.4: Zeitliche Zuordnung des Auslösezeitpunktes innerhalb der GPS Beobachtungsepochen  $\circ$  sowie räumliche Zuordnung von Projektionszentrum  $\nabla$  und GPS Antenne  $\bullet$

Rein technisch ist die Synchronisation von GPS Beobachtungsepoche und Kamera-Auslösezeitpunkt mit ausreichender Genauigkeit möglich. In der Praxis hat jedoch die exakte Einhaltung der Bildflugplanung (z.B. Quer- und Längsüberdeckung der Bilder) größere Bedeutung für die nachfolgende photogrammetrische Auswertung. Typischerweise soll die geplante Überdeckung nicht mehr als 5% abweichen (Schade, Fritsch 1995). Deshalb ist eine Interpolation der GPS Koordinaten auf den Zeitpunkt der Bildaufnahme notwendig.

Die Interpolation wird im allgemeinen unabhängig von der Blockausgleichung durchgeführt. Schwiertz (1994) hat die zeitliche Zuordnung von GPS Koordinaten und Auslösezeitpunkten, sowie die GPS Koordinateninterpolation in die Blockausgleichung integriert. Der numerische Aufwand innerhalb der Blockausgleichung steigt jedoch erheblich, so daß nur in Sonderfällen eine integrierte Interpolation durchgeführt werden sollte.

Verwendet werden bekannte Interpolationsverfahren wie beispielsweise Polynome oder Splines (Press u.a. 1992). Eine GPS Aufzeichnungsrate von 1 Sekunde ergibt für eine übliche Fluggeschwindigkeit von 200 km/h Koordinatenintervalle von 55 m. Die Interpolation ist jedoch in hohem Maße von der Dynamik der einzelnen Befliegung abhängig, die zwar im allgemeinen unter günstigen atmosphärischen Bedingungen durchgeführt wird, aber durch plötzlich auftretende Turbulenzen in sehr kurzen Zeitabständen gestört sein kann.

Um den Einfluß der Interpolation abzuschätzen, wurden GPS Koordinaten, die mit 2 Hz vorlagen auf 1 Hz ausgedünnt und für unterschiedliche Interpolationen verwendet. Abbildung 3.5 zeigt die mittlere Differenz zwischen interpolierten Koordinaten und tatsächlich beobachteten GPS Koordinaten aus ca. 5000 Interpolationen. Als Interpolationsansatz wurden Polynome unterschiedlichen Grades und Splines mit unterschiedlicher Anzahl von Stützpunkten verwendet. Es zeigt sich ein typisches Einlaufverhalten in Abhängigkeit vom Grad bzw. Stützpunktanzahl, das aus anderen Befliegungsdaten mit unterschiedlichem Genauigkeitsniveau bekannt ist (Corbett, Short 1994, 1995). Polynomansätze mit Interpolationsgraden

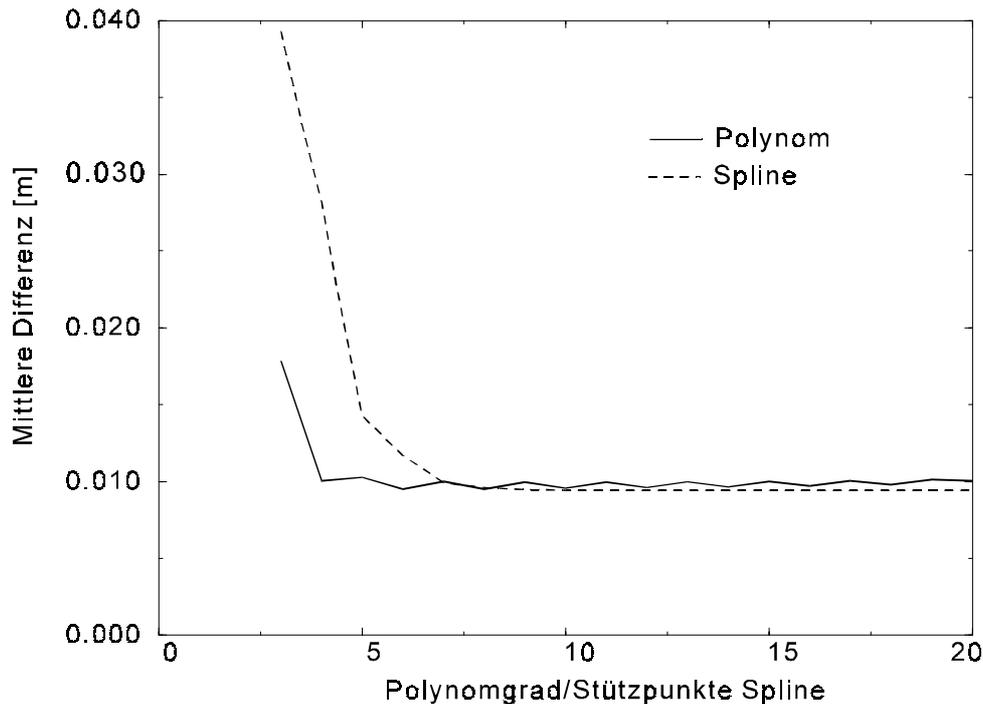


Abb. 3.5: Abhängigkeit der Interpolationsgenauigkeit vom Grad des Polynomansatzes und Anzahl der Stützpunkte beim Spline-Ansatz

zwischen 5 und 7 sind demnach am besten geeignet. Die Übereinstimmung mit den tatsächlich beobachteten GPS Koordinaten liegt bei den verwendeten Daten im Mittel bei 1 cm. Dies hat bei der Größe der Stichprobe nur geringe Aussagekraft. Die Interpolation verursacht erwartungsgemäß zusätzliche Unsicherheiten in den GPS Koordinaten. In der Praxis haben sich für die Anwendung in der GPS gestützten Blockausgleichung Polynome 3. Grades als ausreichend und effizient erwiesen.

In Abbildung 3.6 ist die GPS Koordinatendifferenz eines Befliegungsstreifens aus zwei GPS Auswertungen dargestellt, wobei in einer Lösung durch fehlerhaftes Festsetzen einer Mehrdeutigkeit systematische Fehler eingeführt wurden. Gegen Ende des Streifens ändert sich durch einen zusätzlichen Satelliten die Satellitenkonstellation und verursacht eine Unstetigkeit in den GPS Koordinatendifferenzen. Es müssen Koordinatendifferenzen für die Beurteilung verwendet werden, da anhand der absoluten Koordinaten diese Effekte nicht von Positionsänderungen zu trennen sind.

Im allgemeinen wird über Konstellationsänderungen und somit über potentielle Unstetigkeiten hinweg interpoliert, da die zusätzlich benötigten Informationen hierzu nicht vorgehalten werden. Wie in Abbildung 3.6 ersichtlich, können Fehler von einigen Zentimetern bis mehreren Dezimetern entstehen. Werden jedoch die Zeitpunkte vor bzw. nach einem solchen Ereignis berücksichtigt, können durch eine Extrapolation die GPS Koordinaten ohne diesen Interpolationsfehler bestimmt werden.

Die Interpolation über Unstetigkeiten kann für eine approximative Modellierung der GPS Koordinatenfehler (z.B. lineare Drift) einen vorteilhaften, ausgleichenden Effekt haben. Für die in dieser Arbeit vorgestellte strenge GPS Parametrisierung sind die Unstetigkeiten durch

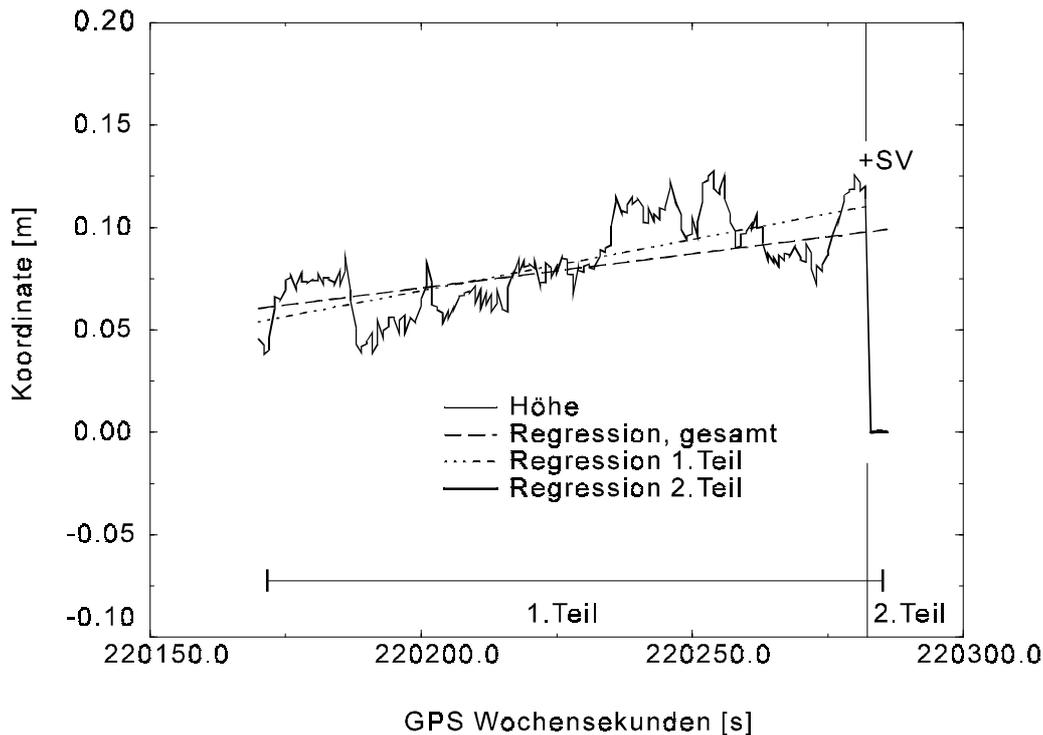


Abb. 3.6: Interpolation über Unstetigkeit (Beispiel aus Datensatz Vechtel)

Satellitenkonstellationsänderungen in der Interpolation jedoch zu berücksichtigen, um weitere zusätzliche Fehler durch Unstetigkeiten zu vermeiden.

Die Erfassung der Aufnahmezeitpunkte wurde zunächst durch den Einbau von Dioden in die Kamera nachträglich realisiert, um systematische und zufällige Zeitfehler auszuschließen (Jacobsen, Li 1990). Moderne Kameras sind auf die GPS gestützte Anwendung abgestimmt und erlauben eine präzise Zeitzuordnung.

Der GPS Empfängermarkt bietet inzwischen spezielle kinematische Empfänger mit Aufzeichnungsraten bis zu 10 Hz an, so daß bei entsprechender Ausrüstung die Interpolation der GPS Koordinaten keine kritische Rolle mehr spielt, jedoch erhöhte Anforderungen an Datenerfassung und -speicherung entstehen. Es können in diesem Fall kinematische Echtzeit-Systeme verwendet werden, die bereits endgültige GPS Koordinaten liefern und die anfallenden Datenmengen deutlich verringern, jedoch sind dann keine detaillierte Analysen der Ergebnisse basierend auf den Rohdaten möglich. Eine Synchronisation von GPS und Kameraauslösung sollte trotzdem weiterhin angestrebt werden, die bei den heutigen Empfänger-technologien auch hinsichtlich einer integrierten Bildflugplanung möglich ist. Die integrierte Bildflugplanung überprüft während der Durchführung eines Bildfluges anhand von GPS Echtzeit-Navigation mit ausreichender Genauigkeit die Einhaltung der Planungsgrößen (Bildüberdeckung etc.).

### 3.5 Antennenexzentrizität

Die GPS Antenne ist um einen Vektor  $\mathbf{dX}_A$  exzentrisch zum Projektionszentrum im Flugzeug angebracht, dessen Orientierung im Raum sich in Abhängigkeit von der Orientierung des Flugzeuges und der Kamera zeitlich ändert. Mit Hilfe der Orientierungswinkel  $\varphi$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$  aus der

Blockausgleichung lassen sich die GPS Koordinaten der Antenne  $\mathbf{X}_A^{\text{GPS}}$  über eine räumliche Drehmatrix  $\mathbf{R}$  auf das Projektionszentrum  $\mathbf{X}_p^{\text{GPS}}$  reduzieren.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_p \\ \mathbf{X}_p \\ \mathbf{X}_p \end{bmatrix}^{\text{GPS}} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_A \\ \mathbf{X}_A \\ \mathbf{X}_A \end{bmatrix}^{\text{GPS}} + \mathbf{R}(\varphi\omega\kappa) \cdot \begin{bmatrix} d\mathbf{X}_A \\ d\mathbf{X}_A \\ d\mathbf{X}_A \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Gleichung 3.1 setzt ein identisches Koordinatensystem der GPS Koordinaten und der Orientierungsparameter voraus. Die Rotationsmatrix ist im Detail im Anhang 11.1 angegeben.

Den größten Einfluß auf die Reduktion der GPS Antenne auf das Projektionszentrum haben Lageexzentrizitäten, die jedoch durch die Montage der GPS Antenne über der Kamera klein gehalten werden können. Eine Exzentrizität in der Höhe wirkt sich ebenfalls in Abhängigkeit von der Größe der Lageexzentrizitäten vorwiegend in den Lagekomponenten aus, durch die die Koordinaten des aus GPS bestimmten Projektionszentrums verfälscht werden.

Zur Bestimmung der Antennenexzentrizität kann eine klassische Vermessung oder auch ein photogrammetrisches Verfahren mit einer Teilmeßkammer verwendet werden (Dorrer 1988, Schwirtz, Dorrer 1991). Der Vorteil der photogrammetrischen Methode liegt in der schnellen Durchführung, die nach jeder Änderung der Kamera-Horizontierung durchgeführt werden kann.

Die Ergebnisse der Blockausgleichung werden durch ungenaue Kenntnis der Antennenexzentrizität systematisch beeinflusst. Die strenge GPS Parametrisierung ist sensitiv gegenüber solchen Fehlern und verlangt nach einer präzisen Einmessung der GPS Antenne. Der Shift- und Drift-Ansatz ist dagegen unempfindlicher, da systematische Fehler der Antennenexzentrizität in der Blockausgleichung durch die Bestimmung von Shift Parametern kompensiert werden. Dies ist insbesondere der Fall, wenn für jeden Bildstreifen unterschiedliche Shift Parameter geschätzt werden.

### Abtritt

Idealerweise sollte die Aufnahmekamera während eines Bildfluges fest mit dem Vermessungsflugzeug verbunden sein, damit Orientierungsunterschiede zur GPS Antenne konstant bleiben. Alternativ, aber aufwendiger, können die Abweichungen der Kamera von einer bekannten und vermessenen Position aufgezeichnet und als zeitabhängige Korrektur angebracht werden. Dies trifft in der Regel jedoch nicht für den Abtrittwinkel bei einer Befliegung zu, der sich für jeden Bildflugstreifen ändern kann und gewöhnlich nicht für eine weitere Korrektur innerhalb der GPS gestützten Blockausgleichung bestimmt wird.

Bedingt durch die Windverhältnisse entspricht die Flugrichtung nicht dem geplanten Kurs über Grund. Um Vorgaben der Bildflugplanung (gleichmäßige Überdeckung etc.) einhalten zu können, ist eine Ausrichtung der Kamera parallel zur Flugrichtung über Grund notwendig (Abb. 3.7). Der eingestellte Abtrittwinkel kann permanent nachgeführt werden und wird im allgemeinen nicht aufgezeichnet. Die Luftbildkamera wird gewöhnlich nur zwischen den Bildflugstreifen gedreht und der eingestellte Abtrittwinkel bleibt für die Dauer eines Bildflugstreifens unverändert (Burman, Torlegard 1994, Winter 1995).

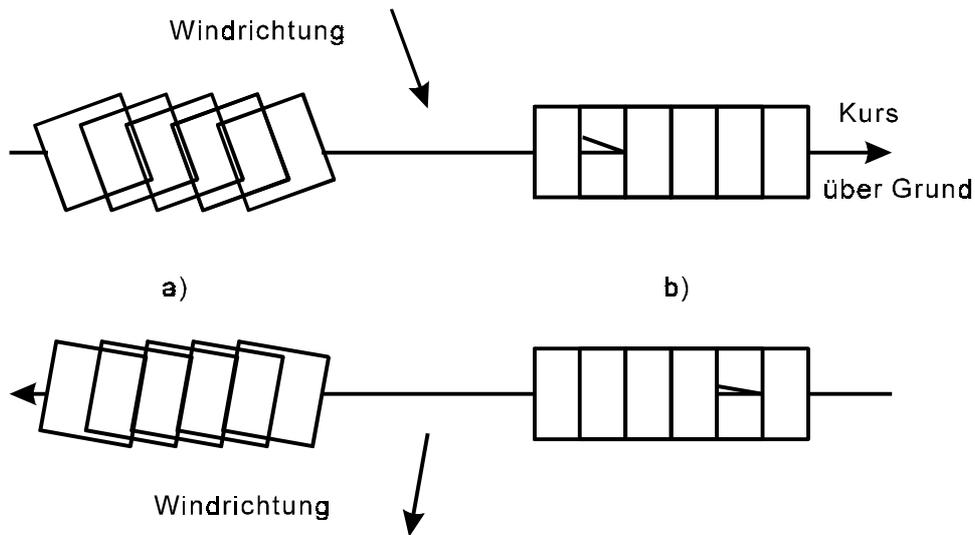


Abb. 3.7: Auswirkung der Abtrift auf die Bildanordnung a) und Korrektur des Abtriftwinkels b) bei wechselnder Windrichtung und alternierender Streifenbefliegung

Der Einfluß auf die kombinierte Blockausgleichung mit GPS ist somit für jeden Streifen unterschiedlich und wirkt sich auf die Exzentrizität GPS/Kamera aus. Insbesondere bei großen Lageexzentrizitäten können sich größere Beträge ergeben. Die unterschiedlichen Abtriftwinkel werden in der Blockausgleichung durch die konstanten und linearen Parameter pro Streifen aufgefangen. Bei der strengen GPS Parametrisierung und blockinvarianten, datumsabhängigen Translationen verbleiben die Effekte im Modell. Eine Modellierung dieser Fehleranteile ist nicht möglich und verursacht eine Verschlechterung der Ausgleichungsergebnisse.

Die Änderungen des Abtriftwinkels sind im wesentlichen Änderungen des Orientierungswinkels  $\kappa$  und sind somit in ihrer Auswirkung für kleine Lageexzentrizitäten ebenfalls klein, so daß der Effekt durch geeignete Installation der GPS Antenne beeinflußt werden kann. Kreisels stabilisierte Aufhängungen für photogrammetrische Kameras sind auf dem Markt, die Bewegungen in allen drei Orientierungskomponenten kompensieren und ebenfalls die Ausgabe der Winkel zur Bestimmung der Vektoren zwischen GPS Antenne und Objektivzentrum ermöglichen (Lorch 1991, Mark 1993).

Damit ist eine strenge Berücksichtigung der Abtrift durch zusätzliche Meßeinrichtungen möglich, die eine nachträgliche Korrektur erlauben. Gleichzeitig ist eine kontinuierliche Nachführung auch während des Bildfluges problemlos möglich.

#### 4. Analyse systematischer GPS Koordinatenfehler

Die unterschiedlichen Fehlerkomponenten des GPS sind bereits in Kapitel 2 diskutiert worden. Für präzise kinematische GPS Anwendungen sind vor allem Einflüsse von fehlerhaft festgesetzten Mehrdeutigkeiten auf die Koordinatenbestimmung von Interesse. Grundsätzlich wird von zuverlässigen Algorithmen zur Bestimmung der Mehrdeutigkeiten ausgegangen. Die Beobachtungsdaten und -bedingungen können jedoch so ungünstig sein, daß es zu fehlerhaften Festsetzungen kommt, was sich als systematische Verfälschung der GPS Koordinaten zeigt. Die systematischen Effekte in den Koordinaten sind von der Satellitenkonstellation und insbesondere von Konstellationsänderungen abhängig.

GPS Auswerteprogramme können für kinematische Anwendungen nur innere Genauigkeitsangaben aus der Ausgleichung liefern, da eine Wiederholung der Messung nicht möglich ist. Die inneren Genauigkeitsmaße sind meist zu optimistisch und können aufgrund von systematischen Fehlern nicht die tatsächliche Positionsgenauigkeit wiedergeben, so daß für die Analyse der GPS Ergebnisse alternative Hilfsmittel zur Beurteilung notwendig sind.

Die GPS Positionsgenauigkeit  $\sigma^*$  kann über einen mittleren Streckenfehler  $\sigma_r$  und ein Maß für die Qualität der Satellitenkonstellation beschrieben werden (Seeber 1993):

$$\sigma^* = \sigma_r \cdot \text{DOP} \quad (4.1)$$

Der DOP- (Dilution of Precision) Faktor wird aus dem GPS Beobachtungsmodell abgeleitet und kann zu Planungszwecken, aber auch für eine Analyse von gemessenen GPS Daten genutzt werden. Mit Hilfe von Satellitalmanachdaten, die Bahninformationen mit geringer Genauigkeit enthalten oder aus GPS Ephemeriden kann ein DOP-Wert abgeleitet werden. Mit der Designmatrix  $\mathbf{A}$ , die die partiellen Ableitungen der Streckenmessung zum Satelliten nach den Koordinaten und dem Uhrfehler enthält (siehe Kapitel 5 und 6), ergibt sich für den kombinierten Effekt für Position und Zeit, den geometrischen DOP (GDOP) (Seeber 1993):

$$\text{GDOP} = \text{spur}(\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1} = \text{spur}(\mathbf{Q}) \quad (4.2)$$

Für eine Beurteilung der Positionsgenauigkeit wird der Uhrfehler von den Koordinaten getrennt und zu einem Position DOP (PDOP) zusammengefaßt. Ebenso lassen sich DOP-Werte für Lage, Höhe und Zeit ableiten.

DOP-Werte beziehen sich auf eine einzelne Station und geben nicht ohne weiteres die DGPS-Genauigkeit wieder. Ebenso berücksichtigt der DOP-Wert zunächst nicht das Mehrdeutigkeitsproblem der Trägerphasenmessung, sondern gilt nur für die Navigationslösung mit GPS. Spezielle Genauigkeitsmaße für DGPS sind bekannt (Goad 1988, Grant u.a. 1990, Tiberius u.a. 1997), werden jedoch in der Praxis kaum verwendet.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen DOP- und DGPS-DOP-Werten ist, daß DOP-Werte momentane Genauigkeiten wiedergeben, wobei für DGPS Genauigkeitsmaße grundsätzlich integrierte DOP-Werte über die Beobachtungszeit wichtig sind. DOP-Werte sind deshalb zunächst für DGPS Anwendungen weniger signifikant und repräsentativ. Dennoch kann der DOP-Wert für die DGPS-Genauigkeit mit Trägerphasenmessungen für die Planung und beim Post-Prozessing zur Analyse der tatsächlichen DGPS Bedingungen genutzt werden.

Aus Formel 4.1 ergibt sich, daß jeder Satellitenwechsel, aber auch Änderungen im Signalrauschen der Satelliten (niedrige Elevation), Änderungen in der Positionsgenauigkeit verursachen. Damit ist die Positionsgenauigkeit nicht allgemein vom Signalrauschen oder der Anzahl der Satelliten, sondern grundsätzlich von Änderungen in der Geometrie abhängig. Werden alle Fehleranteile korrekt modelliert oder berücksichtigt, werden die geschätzten GPS Koordinaten nicht durch Geometrieänderungen beeinflusst. Ist dies jedoch nicht der Fall, können Unstetigkeiten auftreten, die durch vorhandene systematische Fehler und durch eine schlechte Satellitengeometrie noch verstärkt werden (Shi, Cannon 1995).

Im allgemeinen sind systematische Fehler und Unstetigkeiten in luftgestützten Anwendungen nicht in den reinen GPS Koordinaten zu erkennen, weil sie von der tatsächlichen Flugtrajektorie und deren mögliche Störungen durch Turbulenzen nicht zu trennen sind. Die wesentlichen systematischen Fehler stellen fehlerhaft festgesetzte Mehrdeutigkeiten und atmosphärische Einflüsse dar, aber auch Satellitenkonstellationsänderungen. Um trotzdem diese Fehler untersuchen zu können sind entweder unterschiedliche Auswertungen mit unabhängigen Referenzstationen notwendig oder reduzierte bzw. künstlich verfälschte Datensätze zu verwenden.

Der Effekt von Geometrieänderungen wird im folgenden anhand von GPS Daten der Befliegung Vechtel näher untersucht (siehe Anhang 11). Der Datensatz ist 1993 unter starken ionosphärischen Einflüssen und bei unvollständigem Satellitenausbau durchgeführt worden. Die Daten der  $L_2$  Frequenz sind durch unverhältnismäßig vielen Signalunterbrechungen nicht nutzbar und erlauben nur eine  $L_1$  Koordinatenschätzung. Ein Ausfall der Datenaufzeichnung im Flugzeug verursacht eine Datenlücke, der dann eine ausgesprochen schlechte Satellitenkonstellation folgt (siehe Abbildung 4.1).

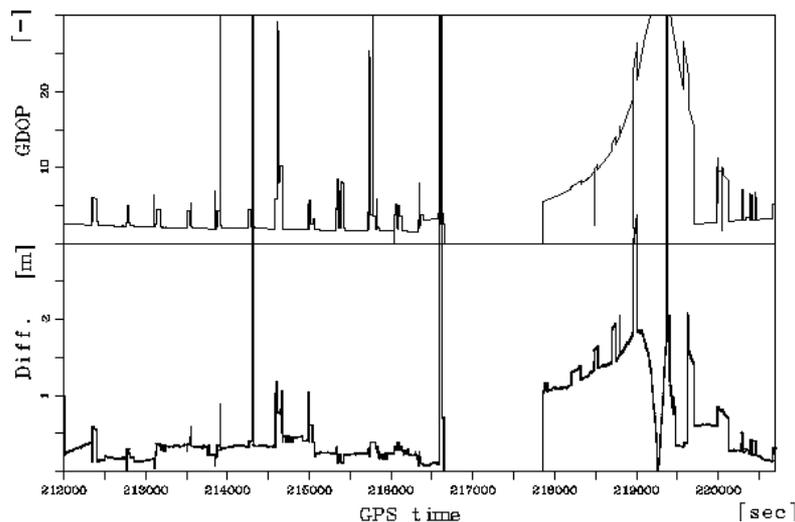


Abb. 4.1: PDOP Werte und Differenz der Höhenkomponente bei Verwendung einer lokalen Referenzstation bzw. einer entfernten Referenzstation (30 km)

Abbildung 4.1 zeigt die grundsätzliche Eignung von DOP-Werten für die Beurteilung von DGPS Ergebnissen. Die Differenz in der GPS Höhenkomponente aus zwei Auswertungen mit

unterschiedlichen Referenzstationen ist gleichzeitig mit dem Verlauf der PDOP-Werte aufgetragen. In die PDOP Berechnung sind die tatsächlich auf beiden Stationen, Referenzstation und Flugzeug, beobachteten Satelliten eingegangen.

Deutlich zeigt sich eine Korrelation zwischen Satellitenkonstellationsänderungen und Koordinatenunterschieden zwischen den beiden Auswertungen. Der vorherrschende Fehlereinfluß ist die ionosphärische Refraktion, die durch die verwendeten  $L_1$  Messungen nicht korrigiert werden konnte und systematische Koordinatendifferenzen von rund 16 ppm verursacht. Diese Größenordnung ist gleichzeitig ein Indiz für die starke ionosphärische Refraktion, die für Einfrequenzmessungen mit 0.1-50 ppm angegeben wird (Wanninger 1995). Satellitenkonstellationsänderungen ergeben deutliche Sprünge in den GPS Koordinatendifferenzen, und somit Unstetigkeitsstellen, wenn sie innerhalb eines Befliegungstreifens auftreten.

Zur Beurteilung der GPS Koordinaten kann somit eine Analyse der tatsächlichen PDOP-Werte verwendet werden, wobei Werte kleiner als 5 unkritische Verhältnisse beschreiben. Vereinzelte PDOP Spitzen sind auf den Verlust der Satellitensignale während der Kurvenflüge zurückzuführen. Die ansteigenden und hohen PDOP-Werte nach der Datenlücke deuten auf unsichere GPS Koordinaten für diese Zeiten hin und sollten in der GPS gestützten Blockausgleichung aufmerksam analysiert werden.

### **Unstetigkeiten durch Satellitenkonstellationsänderungen**

GPS Messung und Aufnahme sind in der Regel nicht synchronisiert, wodurch eine Interpolation der GPS Koordinaten auf die Auslösezeitpunkte notwendig ist. Ebenso werden in den gegenwärtigen Ansätzen zur GPS gestützten Blockausgleichung die verbleibenden systematischen GPS Fehler durch lineare, zeitabhängige Korrekturen oder Polynomansätze approximiert. Für die GPS gestützte Blockausgleichung sind deshalb Satellitenkonstellationsänderungen während eines Befliegungstreifens von Bedeutung, durch die bei vorhandenen systematischen Fehlern Unstetigkeiten in den GPS Koordinaten verursacht werden. Sprungstellen in den GPS Koordinaten werden in der Interpolation der GPS Koordinaten oder den Shift- und Drift-Ansätzen nicht berücksichtigt und können zu Fehlern in der GPS gestützten photogrammetrischen Auswertung führen.

In den folgenden beiden Abbildungen 4.2 und 4.3 sind die Differenzen der GPS Auswertungen mit und ohne den Satelliten PRN 13 dargestellt, der während eines Bildflugstreifens nicht durchgängig sichtbar war. Als Referenzstation wurde jeweils dieselbe Station verwendet, so daß die Koordinatendifferenzen klein sind und ausschließlich den Einfluß der Satellitenkonstellationsänderung zeigen. In Abbildung 4.2 ergeben sich in der Mitte des Streifens sprunghafte Änderungen bis zu 1.75 m in der Höhe. In Abbildung 4.3 betragen die Unstetigkeiten zum Ende des Streifens rund einen Dezimeter. Die einzelnen Koordinatenkomponenten sind dabei unterschiedlich betroffen.

Abbildung 4.3 zeigt zusätzlich zu der Unstetigkeit am Ende des Befliegungstreifens zeitabhängige, systematische Koordinatenfehler, die sich als deutliche Drift, vor allem im Hochwert und in der Höhenkomponente, zeigen. Der Drifteffekt wurde vielfach untersucht (z.B. Frieß 1990a, Cannon 1991, Schwiertz 1994) und kann Größenordnungen von Submillimeter bis mehrere Millimeter pro Sekunde annehmen. Ursache hierfür sind Fehler bei der Festsetzung der Mehrdeutigkeiten. Insbesondere in einem Kurvenflug werden bei Abschattungen durch das Flugzeug Signalunterbrechungen verursacht, die dann korrekt bestimmt werden

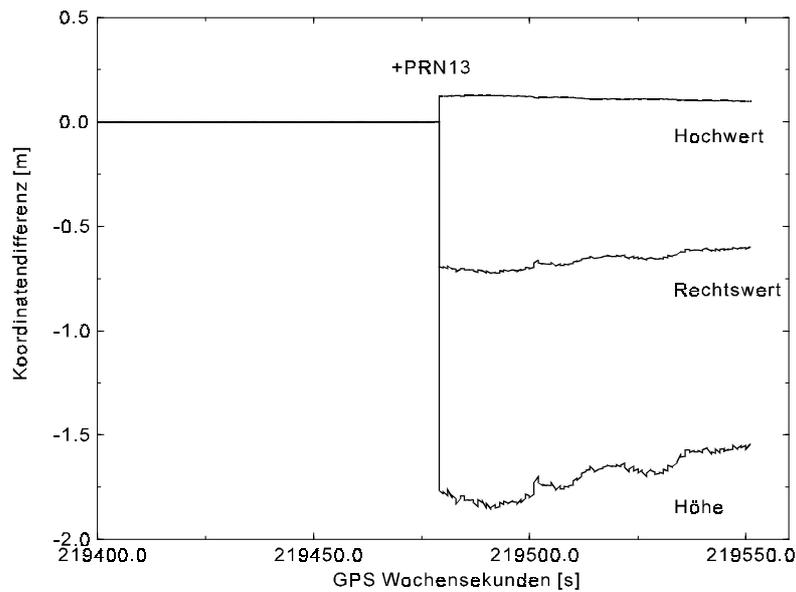


Abb. 4.2: Befliegung Vechtel, Streifen 22: Differenz in Rechts-, Hochwert und Höhe für die kinematische Station mit und ohne PRN 13

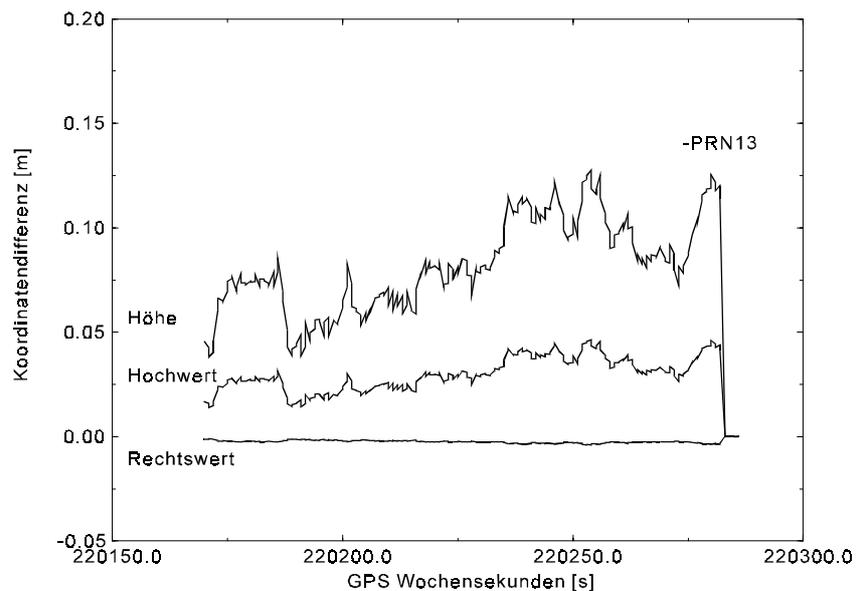


Abb. 4.3: Befliegung Vechtel, Streifen 23: Differenz in Rechts-, Hochwert und Höhe für die kinematische Station mit und ohne PRN 13

müssen. Erschwert durch den unvollständigen Ausbau des Systems, stellte dies lange Zeit eine wesentliche Fehlerquelle für die hochgenaue fluggestützte Positionierung dar. Die Problematik ist durch verbesserte OTF Algorithmen und den kompletten Satellitenausbau nur noch abgeschwächt vorhanden, tritt aber oftmals in fluggestützten Anwendungen auf.

## Linearität der systematischen GPS Fehler

Durch die hohe Dynamik der fluggestützten Anwendung ergeben sich häufig Datensätze, in denen Mehrdeutigkeiten nicht bestimmt und festgesetzt werden können. Im allgemeinen werden diese nicht zuverlässig bestimmbar Mehrdeutigkeiten auf den nächsten ganzzahligen Wert gezwungen. Die dadurch entstehenden systematischen Fehler können unter ungünstigen Bedingungen nicht-lineares Verhalten aufzeigen. Koordinatensprünge aufgrund von Satellitenkonstellationsänderungen verstärken sich durch die systematischen Fehler und sind ebenfalls zeitabhängig.

Um den Einfluß fehlerhafter Mehrdeutigkeiten aufzuzeigen, wird in einem Streifen die Mehrdeutigkeit zu einem Satellit um einen Zyklus verändert und der ursprünglichen Koordinatenlösung gegenübergestellt. Unstetigkeiten durch Satellitenwechsel sind nicht vorhanden, da nur Satelliten benutzt werden, die während des gesamten Bildflugstreifens sichtbar sind.

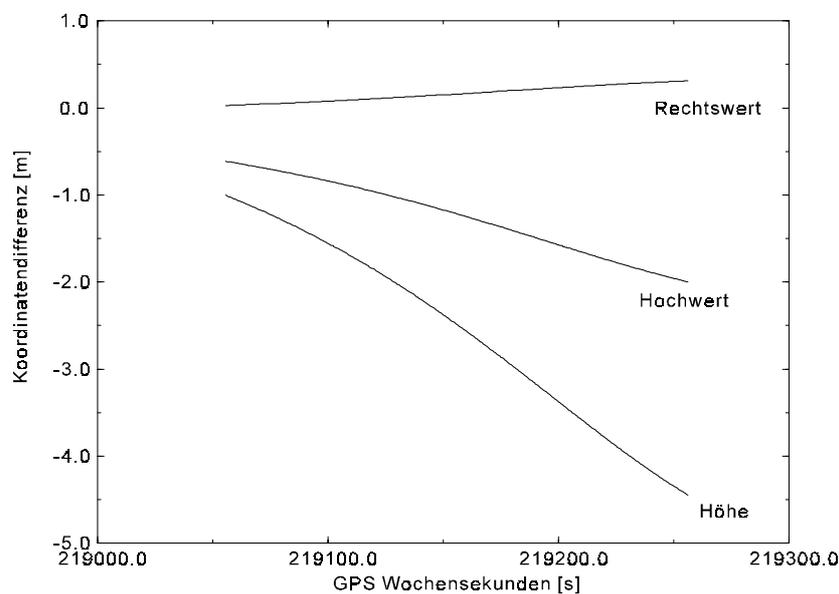


Abb. 4.4: Bildflug Vechtel, Streifen 21: Koordinatendifferenz nach Verfälschung der Mehrdeutigkeit zu PRN 26 um +1 Zyklus

In Abbildung 4.4 zeigen sich Koordinatendifferenzen bis zu mehreren Metern, aber auch ein nicht-lineares Verhalten der Differenzen. Die Koordinatendifferenzen innerhalb des Streifens entsprechen einer Drift von 1-2 mm/s für die Lagekomponente und 13 mm/s in der Höhenkomponente. Von Driftraten in vergleichbarer Größenordnung wird auch in Hogholen (1993) für  $L_1$  GPS Daten berichtet. Die Nicht-Linearität wird anhand der Residuen aus einer Regression, angewendet auf die Koordinatendifferenzen, in Abbildung 4.5 deutlich. Die Residuen betragen zu Beginn des Streifens bis zu 22 cm und in Streifenmitte bis zu einem Dezimeter.

Die Residuen der Regression spiegeln einen zusätzlichen Koordinatenfehler der Aufnahmezentren in der GPS gestützten Blockausgleichung wider, der entsteht, wenn die Fehler nicht-lineares Verhalten zeigen und als Modell lineare Koordinatenverbesserungen verwendet werden. In Abhängigkeit vom Bildmaßstab und der geforderten Genauigkeit der GPS Koordinaten in der GPS gestützten Blockausgleichung (Tab. 1.1) können sich durch die

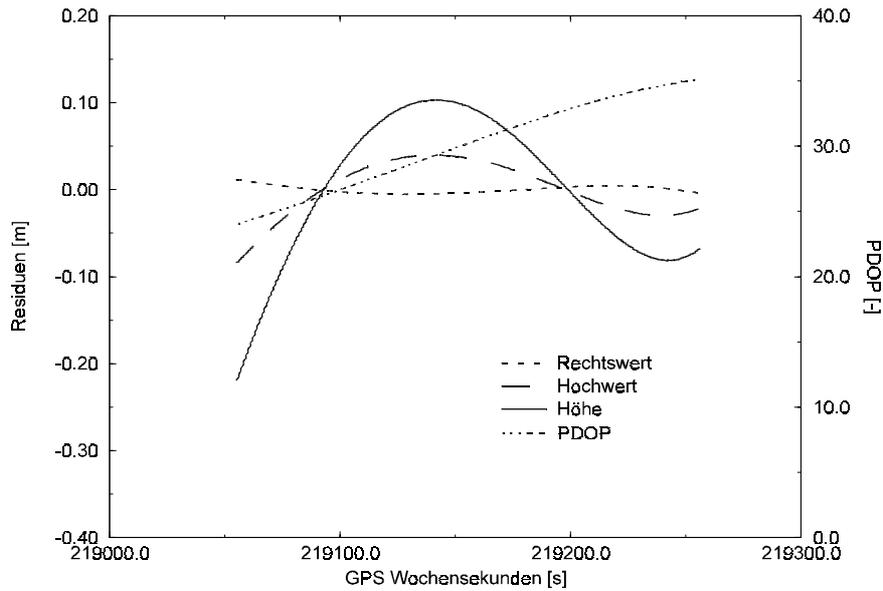


Abb. 4.5: Bildflug Vechtel, Streifen 21: Residuen der Koordinatendifferenz nach einer Linearen Regression (PRN 26 +1 Zyklus)

zusätzlichen Fehler aus der linearen Anpassung nicht ausreichende Genauigkeiten für die GPS Koordinaten ergeben. Dies ist jedoch von der GPS Satellitengeometrie abhängig.

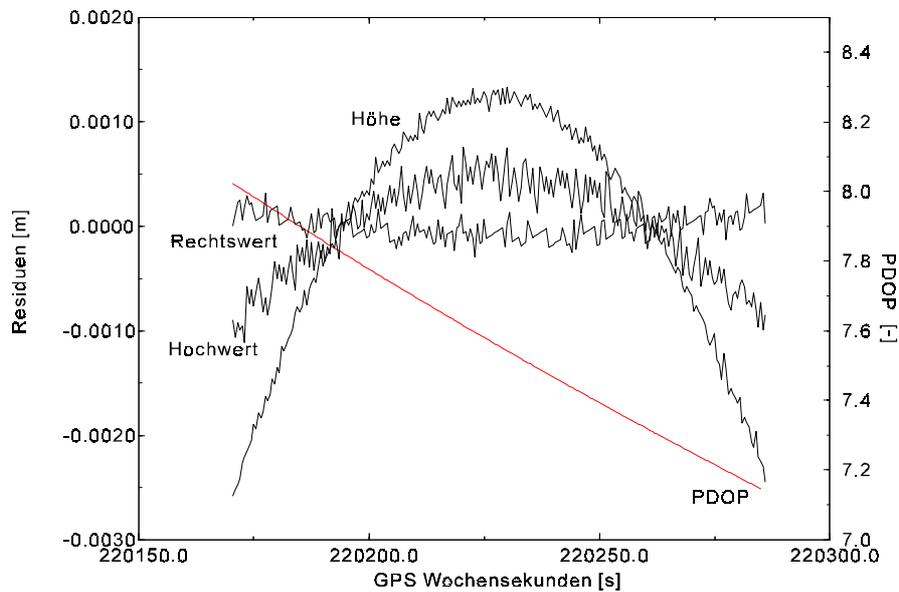


Abb. 4.6: Bildflug Vechtel, Streifen 23: Residuen der Koordinatendifferenz nach einer Linearen Regression (PRN 26 +1 Zyklus)

Abbildung 4.6 zeigt die Residuen für den rund 15 min später beflogenen Streifen 23. Es ergeben sich bei kleineren PDOP-Werte geringere Residuen in einer linearen Regression der Koordinatendifferenzen, die mit einer Größenordnung von einigen Millimetern vernachlässigbar sind.

Aus den dargestellten Problemen der GPS Koordinatenbestimmung hat sich eine spezielle Auswertestrategie für die kinematische Auswertung von Fluganwendungen herausgebildet. Die GPS Auswertung erfolgt streifenweise (Lechner, Lohmann 1995) und es werden in einem Streifen nur Satelliten mit durchgängig vorhandenen Daten sowohl auf der Referenz- als auch auf der kinematischen Station verwendet. Alternativ können nach einem Satellitenwechsel neue Shift- und Drift-Parameter in der Blockausgleichung angesetzt werden (Andersen 1989, Colomina 1989). Mehrdeutigkeiten, die sich nach den statistischen Kriterien der GPS Auswertung nicht zuverlässig festsetzen lassen, werden auf den nächsten ganzzahligen Wert gezwungen. Die dadurch verursachten systematischen Koordinatenfehler in der GPS gestützten Blockausgleichung werden streifenweise in Form von Polynomen unterschiedlicher Ordnung approximiert.

Es wird deutlich, daß die im Shift- und Drift-Ansatz vorausgesetzte Linearität der systematischen Fehler nicht immer gegeben ist. Unstetigkeiten in den GPS Koordinaten ergeben sich aufgrund von Satellitenwechseln, die nur aufwendig in der GPS Auswertung vermieden werden können. Unter ungünstigen geometrischen Bedingungen der GPS Satellitenkonstellation zeigt sich ebenfalls ein nicht-lineares Verhalten in den GPS Koordinaten durch fehlerhaft festgesetzte Mehrdeutigkeiten, ohne daß ein Satellitenwechsel erfolgte. Bei guten geometrischen Voraussetzungen (DOP-Werte besser als 5) kann jedoch von einer Linearität der Koordinatenfehler ausgegangen werden. Unstetigkeiten aufgrund von Satellitenkonstellationsänderungen verursachen jedoch durch notwendige Interpolation der GPS Koordinaten auf den Auslösezeitpunkt zusätzliche Unsicherheiten in der Kombination von GPS und Blockausgleichung.



## 5. Mathematische Modelle

Zum besseren Verständnis der Modellbildung für eine strenge Parametrisierung der GPS Restfehler in der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung werden das vermittelnde Ausgleichungsmodell und die Beobachtungsgleichungen angegeben. Ebenso wird auf die grundsätzliche Struktur der Blockausgleichung mit GPS Daten eingegangen. Auf die detaillierte Beschreibung der Ausgleichungsansätze der verwendeten Programmpakete wird verzichtet. Darstellungen zu den eingesetzten Programmen GEONAP (*Geodetic NAVSTAR Positioning*) und BLUH (*Bundle Block Adjustment University of Hannover*) finden sich bei Wübbena (1988, 1989, 1991) und Jacobsen (1980, 1994a).

### 5.1 Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen (Gauß-Markov Modell)

Sowohl die Auswertung der GPS Daten als auch die Blockausgleichung kann durch eine Ausgleichung nach vermittelnden Beobachtungen durchgeführt werden. Für die weitere Darstellung wird die Ausgleichung vermittelnder Beobachtungen verwendet, die in linearisierter Form auch als Gauß-Markov Modell bezeichnet wird (Pelzer 1985).

Das funktionale Modell der Ausgleichung nach vermittelnder Beobachtungen stellt die “wahren” Werte  $\tilde{\mathbf{L}}$  der Beobachtungen als Funktion  $\Psi$  der “wahren” Werte  $\tilde{\mathbf{X}}$  des Parameter- bzw. Unbekanntenvektors dar

$$\tilde{\mathbf{L}} = \Psi(\tilde{\mathbf{X}}). \quad (5.1)$$

Eine Ausgleichung ist gegeben, wenn mehr Beobachtungen als Unbekannte zur Verfügung stehen. Die tatsächlichen Beobachtungen  $\mathbf{L}$  stellen zufällige Meßgrößen dar, deren Erwartungswerte als “wahre” Beobachtungen aufgefaßt werden. Ein Übergang auf Schätzwerte  $\hat{\mathbf{L}}$  und  $\hat{\mathbf{X}}$  ist notwendig, da unvermeidbare Meßfehler eine Bestimmung der “wahren” Werte nicht zulassen. Das Modell wird deshalb um Verbesserungen der Beobachtungen  $\mathbf{v}$  erweitert und führt somit zu den Verbesserungsgleichungen (Pelzer 1985)

$$\hat{\mathbf{L}} = \mathbf{L} + \mathbf{v} = \Psi(\hat{\mathbf{X}}). \quad (5.2)$$

Die Funktion der Unbekannten in Gleichung (5.1) bzw. (5.2) kann nicht-linear sein. Um lineare Gleichungssysteme zu erhalten, werden der Unbekannten- und Beobachtungsvektor mit Hilfe von Näherungswerten der Unbekannten  $\mathbf{X}_0$  in einen gekürzten Unbekanntenvektor  $\tilde{\mathbf{x}}$  und einen gekürzten Beobachtungsvektor  $\tilde{\mathbf{l}}$  zerlegt.  $\mathbf{L}_0$  ist der an der Näherungsstelle  $\mathbf{X}_0$  berechnete Beobachtungsvektor.

$$\tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{X}} - \mathbf{X}_0 \quad (5.3)$$

$$\tilde{\mathbf{l}} = \tilde{\mathbf{L}} - \mathbf{L}_0 \quad (5.4)$$

$$\mathbf{L}_0 = \Psi(\mathbf{X}_0) \quad (5.5)$$

Damit ist eine Entwicklung der Funktion an der Näherungsstelle  $\mathbf{X}_0$  nach Taylor möglich, die nach den Gliedern 1. Ordnung abgebrochen werden kann, wenn  $\mathbf{X}_0$  eine gute Näherung von  $\hat{\mathbf{X}}$  darstellt. Das linearisierte Modell oder Gauß-Markov Modell lautet

$$\tilde{\mathbf{I}} = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{x}}. \quad (5.6)$$

Die Modell- oder Designmatrix  $\mathbf{A}$  enthält die partiellen Ableitungen der Beobachtungen nach den Unbekannten an der Entwicklungsstelle  $\mathbf{X}_0$

$$\mathbf{A} = \left( \frac{\partial \Psi(\tilde{\mathbf{X}})}{\partial \tilde{\mathbf{X}}} \right)_0. \quad (5.7)$$

In gleicher Weise werden mit einer Zerlegung des Beobachtungsvektors  $\mathbf{L}$  und dem Schätzwert für den Parametervektor  $\hat{\mathbf{X}}$ ,

$$\mathbf{l} = \mathbf{L} - \mathbf{L}_0, \quad (5.8)$$

$$\hat{\mathbf{l}} = \hat{\mathbf{L}} - \mathbf{L}_0, \quad (5.9)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{X}} - \mathbf{X}_0, \quad (5.10)$$

aus Gleichung 5.6 die linearisierten Verbesserungsgleichungen

$$\hat{\mathbf{l}} = \mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}} \quad (5.11)$$

erhalten. Die Kofaktormatrix  $\mathbf{Q}_{11}$  stellt das stochastische Modell der Ausgleichung dar und wird durch die Kovarianzmatrix  $\Sigma_{11}$  der Beobachtungen und der im allgemeinen unbekanntes Varianz der Gewichtseinheit  $\sigma_0^2$  definiert

$$\mathbf{Q}_{11} = \frac{1}{\sigma_0^2} \Sigma_{11}. \quad (5.12)$$

Durch die Kovarianzmatrix können unterschiedliche Genauigkeiten der Beobachtungen berücksichtigt werden. Ausgleichungsbedingung ist die bekannte Forderung von Gauß (Methode der kleinsten Quadrate), daß die Verbesserungen in der Quadratsumme minimiert werden

$$\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} \rightarrow \min. \quad (5.13)$$

Im Ausgleichungsprozeß ist dies durch die Gewichtsmatrix  $\mathbf{P}$  gegeben

$$\mathbf{P} = \mathbf{Q}_{11}^{-1}. \quad (5.14)$$

Die Normalgleichungen

$$\mathbf{N}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{n} = \mathbf{0} \quad (5.15)$$

bestehen aus der Normalgleichungsmatrix  $\mathbf{N}$  und dem Absolutgliedvektor  $\mathbf{n}$ :

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} \quad (5.16)$$

$$\mathbf{n} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l} . \quad (5.17)$$

Die Normalgleichungen werden nach bekannter Weise durch die Inverse der Normalgleichungsmatrix  $\mathbf{Q}$  aufgelöst. Es wird die erwartungstreue Schätzung mit minimaler Varianz des gekürzten Unbekanntenvektors  $\hat{\mathbf{x}}$  erhalten, der durch Einsetzen und Auflösen in Gleichung 5.10 das Ausgleichungsergebnis für die Unbekannten liefert (Pelzer 1985).

$$\mathbf{Q} = \mathbf{N}^{-1} \quad (5.18)$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{Q} \mathbf{n} \quad (5.19)$$

Die Inverse der Normalgleichungsmatrix  $\mathbf{Q}$  ist gleichzeitig Kofaktormatrix des Parametervektors. Als empirische Varianz der Gewichtseinheit  $s_0^2$  wird aus der Ausgleichung eine Schätzung für die Varianz  $\sigma_0^2$  erhalten, die eine wichtige Kenngröße der verwendeten Beobachtungen darstellt:

$$s_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{n - u} . \quad (5.20)$$

## 5.2 Beobachtungsgleichung der GPS Auswertung

Die GPS Beobachtung ist eine einfache Streckenmessung, die zusätzlich mit Uhrfehlern behaftet ist und deshalb als Pseudo-Entfernungsmessung bezeichnet wird. Beide grundsätzlichen Beobachtungsgrößen, Code- und Trägerphasenmessung, lassen sich als Laufzeitmessungen auffassen und beschreiben (Wübbena 1989, Seeber 1993, Kleusberg, Teunissen 1996).

Um die Genauigkeitsforderungen geodätischer Anwendungen zu erreichen, kommen nur Trägerphasenmessungen mit ihrem geringen Meßrauschen (besser als 1-3 mm) in Betracht. Von Nachteil ist jedoch die nicht eindeutige Natur der Trägerphasenmessung, die eine gesonderte Bestimmung der Anzahl ganzer Wellenlängen (Mehrdeutigkeitslösung) zwischen Satellit und Antenne notwendig macht. Zur Lösung des Mehrdeutigkeitsproblems sind jedoch Methoden der Code- und Trägerphasenkombination einsetzbar, die die Bedeutung von Codephasenmessungen auch für hochgenaue Anwendungen aufzeigen.

Die nachfolgende Entwicklung der Beobachtungsgleichungen folgt im wesentlichen der Darstellung von Kleusberg, Teunissen (1996). Empfangsverzögerungen (Hardware-Delay) in Empfänger und Satellit sowie relativistische Effekte bleiben unberücksichtigt. Die Hardware-Delays können im allgemeinen als konstant für alle Kanäle eines Empfängers angesehen werden, so daß der Effekt nicht von dem Empfängeruhrfehler zu trennen ist.

### GPS Codephasenmessung

Aus der maximalen Korrelation des empfangenen Codes mit einer im Empfänger generierten Kopie wird die gesamte Signallaufzeit  $\tau_i^k$  zwischen Empfänger  $i$  und Satellit  $k$  aus der Verzögerung der Codephase bestimmt. Die Codemessung ist dabei die Differenz zwischen dem Empfangszeitpunkt im Empfänger  $t_i$  und dem Aussendezeitpunkt im Satelliten  $t^k$ . Der Aussendezeitpunkt ist eine Funktion der tatsächlichen GPS Empfangszeit  $t$  und der Signallaufzeit und kann als  $t^k(t - \tau_i^k)$  dargestellt werden. Um eine metrische Größe zu erhalten, ist die Zeitdifferenz mit der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c_0$  zu multiplizieren, so daß sich als Codemessung  $PR_i^k$  ergibt:

$$PR_i^k(t) = c_0 \cdot (t_i(t) - t^k(t - \tau_i^k)) + \varepsilon_{PR_i^k}. \quad (5.21)$$

Beide Zeitmessungen beziehen sich auf den GPS Zeitrahmen, sind aber mit Uhrfehlern behaftet. Der Zeitpunkt  $t$  stellt den Empfangszeitpunkt im GPS Zeitrahmen dar. Dabei treten, wie in den Gleichungen berücksichtigt, neben der Meßgröße zufällige Meßfehler  $\varepsilon_i^k$  auf. Für den Empfangs- und Aussendezeitpunkt läßt sich für den Empfängeruhrfehler  $dt_i$  und den Satellitenuhrfehler  $dt^k$  schreiben:

$$t_i(t) = t + dt_i(t), \quad (5.22)$$

$$t^k(t - \tau_i^k) = t - \tau_i^k + dt^k(t - \tau_i^k). \quad (5.23)$$

Hieraus ergibt sich eine Darstellung direkt mit der Signallaufzeit  $\tau_i^k$ ,

$$PR_i^k(t) = c_0 \tau_i^k + c_0 \cdot (dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)) + \varepsilon_{PR_i^k}. \quad (5.24)$$

Der erste Term der Gleichung 5.24 gilt für die tatsächliche Signallaufzeit und unterscheidet sich von der geometrischen Entfernung  $\rho_i^k$  zwischen Satellit und Empfänger um die Laufzeitänderungen des Signals in der Erdatmosphäre. Üblicherweise wird der Ausbreitungsfehler in der Atmosphäre in die zwei Anteile der ionosphärischen  $dI_i^k$  und troposphärischen Refraktion  $dT_i^k$  unterteilt. Zudem können Mehrwegausbreitung (Multipath)  $dm_i^k$  und Phasenzentrumsvariationen  $dp_i^k$  in der Messung auftreten, so daß der ursprüngliche Term erweitert werden muß. Es ergibt sich

$$PR_i^k(t) = \rho_i^k(t, t - \tau_i^k) + dI_i^k + dT_i^k + dm_{PR_i^k} + dp_{PR_i^k} + c_0 \cdot (dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)) + \varepsilon_{PR_i^k}. \quad (5.25)$$

Die mit der Lichtgeschwindigkeit metrisch skalierte Signallaufzeit wurde dabei durch die geometrische Entfernung  $\rho_i^k$  ersetzt:

$$\rho_i^k(t, t - \tau_i^k) = c_0 \tau_i^k. \quad (5.26)$$

## GPS Trägerphasenmessung

Bei der Trägerphasenmessung wird nicht direkt die vom Satelliten ausgesendete Trägerphase  $\phi^k$  gemessen, sondern die Differenz  $\phi_i^k$  zu einem im Empfänger erzeugten Referenzsignal  $\phi_i$ . Die Trägerphasenmessung erlaubt mit dem Empfang eines Signals nur die Bestimmung der Phasenänderung, wodurch die Anzahl der ganzen Zyklen  $N_i^k$  unbekannt und die Messung nicht eindeutig ist. Die Differenz der Trägerphasenmessung zum Empfangszeitpunkt im Empfänger  $t_i$  und dem Aussendezeitpunkt im Satelliten  $t^k$  stellt zusammen mit der Mehrdeutigkeit die Phasendifferenz zwischen Satellit und Empfänger dar:

$$\phi_i^k(t) = \phi_i(t) - \phi^k(t - \tau_i^k) + N_i^k + \varepsilon_{\phi_i}^k. \quad (5.27)$$

Wird die sowohl im Satelliten als auch im Empfänger verwendete nominelle Frequenz  $f_0$  des entsprechenden Signals eingeführt, so lassen sich die ausgesendete und empfangene Phase mit den durch die Uhrfehler im Empfänger und im Satelliten bedingten Phasenfehlern darstellen:

$$\phi_i(t) = f_0 \cdot (t + dt_i(t)) + \phi_i(t_0) \quad (5.28)$$

$$\phi^k(t - \tau_i^k) = f_0 \cdot (t - \tau_i^k + dt^k(t - \tau_i^k)) + \phi^k(t_0). \quad (5.29)$$

Die Phasenlage im Satelliten und im Empfänger ist bei Beginn des Signalempfangs nicht null, so daß die anfänglichen Phasen  $\phi_i(t_0)$  und  $\phi^k(t_0)$  zu berücksichtigen sind. Mit den Gleichungen 5.28 und 5.29 ergibt sich eine Darstellung der gesamten Signallaufzeit  $\tau_i^k$  zwischen Satellit und Empfänger aus der Trägerphasenmessung zu

$$\phi_i^k(t) = f_0 \tau_i^k + f_0 \cdot (dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)) + (\phi_i(t_0) - \phi^k(t_0)) + N_i^k + \varepsilon_{\phi_i}^k. \quad (5.30)$$

Um aus der Phasenmessung eine metrische Größe zu erhalten, ist die Multiplikation mit der Wellenlänge  $\lambda$  notwendig

$$\Phi_i^k(t) = c_0 \tau_i^k + c_0 \cdot (dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)) + \lambda \cdot (\phi_i(t_0) - \phi^k(t_0)) + \lambda N_i^k + \lambda \varepsilon_{\phi_i}^k. \quad (5.31)$$

Der dritte Term in Gleichung 5.31 beschreibt die anfängliche Phasenlage der Messung im Satelliten und Empfänger und ist eine Konstante. Zur Vereinfachung wird im folgenden die anfängliche Phasenlage zu Null angenommen, so daß sich bei der weiteren Entwicklung der Gleichung analog zu Gleichung 5.25 mit der geometrischen Entfernung  $\rho_j^i$  und den unterschiedlichen Fehlerkomponenten schreiben läßt

$$\begin{aligned} \Phi_i^k(t) = & \rho_i^k(t, t - \tau_i^k) - dI_i^k + dT_i^k + dm_{\phi_i}^k + dp_{\phi_i}^k \\ & + c_0 \cdot (dt_i(t) - dt^k(t - \tau_i^k)) + \lambda N_i^k + \lambda \varepsilon_{\phi_i}^k. \end{aligned} \quad (5.32)$$

Betrachtet man die Gleichungen 5.25 und 5.32, so ist festzustellen, daß der wesentliche Unterschied zwischen Code- und Trägerphasenmessung der Mehrdeutigkeitsterm  $N_i^k$  ist.

Mehrwegeeffekt, Phasenzentrumsvariationen und Meßrauschen sind unterschiedlich für die jeweiligen Signale ( $L_1$  und  $L_2$ ) und Signaltypen (Code- und Trägerphase).

Satelliten- und Empfängerkoordinaten  $\mathbf{X}^k$  und  $\mathbf{X}_i$  können über die geometrische Entfernung  $\rho_i^k$  eingeführt werden

$$\rho_i^k(t, t - \tau_i^k) = \|\mathbf{X}^k - \mathbf{X}_i\|, \quad (5.33)$$

so daß sich eine vollständige Beobachtungsgleichung aus den beiden Gleichungen 5.32 und 5.33 für jedes Signal aufstellen läßt.

### Linearkombinationen

In der GPS Auswertung werden Linearkombinationen der Beobachtungsgrößen verwendet, deren unterschiedliche Eigenschaften für eine zuverlässige und schnelle Mehrdeutigkeitsbestimmung ausgenutzt werden. Grundsätzlich wird mit Messungen auf zwei unterschiedlichen Frequenzen die Möglichkeit geschaffen, die ionosphärische Phasenverzögerung 1. Ordnung zu bestimmen (Wells 1986, Seeber 1993). Die korrigierte Phase ist eine Linearkombination der Trägerphasen  $L_1$  und  $L_2$  (Wübbena 1989). Es eröffnen sich jedoch weitere Einsatzmöglichkeiten von anderen Linearkombination, wobei Kombinationen von Beobachtungen gleichen Typs und unterschiedlichen Typs (Code- und Trägerphase) denkbar sind. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Beobachtungen vom gleichen Empfänger und Satelliten stammen.

Linearkombinationen sind Grundlage für die Mehrdeutigkeitslösung und Behandlung von Signalunterbrechung (Cycle Slip Problem), durch das erneut unbekannte Mehrdeutigkeiten entstehen. Von besonderer Bedeutung sind, wegen des geringen Meßrauschens und den nicht von allen Empfängern bereitgestellten Codemessungen, Linearkombinationen von Trägerphasen für Zweifrequenzempfänger. Eine wesentliche Voraussetzung für die Bestimmung von Mehrdeutigkeiten ist die ganzzahlige Natur der Mehrdeutigkeiten in den ursprünglichen Beobachtungsgrößen. Um diesen Vorteil weiter zu nutzen, muß die resultierende Mehrdeutigkeit einer Linearkombination ebenfalls Ganzzahligkeit besitzen. Weitere Kriterien für den sinnvollen Einsatz sind das Rauschniveau, die Verstärkung der ionosphärischen Refraktion und die Wellenlänge des abgeleiteten Signals (Wübbena 1989).

Betrachtet man Beobachtungen gleichen Typs von unterschiedlichen Empfängern, Satelliten und/oder Epochen, so läßt sich eine weitere, sinnvolle Gruppe von Linearkombinationen definieren, die im allgemeinen als Differenzen von Beobachtungen bezeichnet wird. Auf diese Gruppe wird im folgenden kurz eingegangen, da sie Grundlage für eine Vielzahl von GPS Auswerteprogrammen ist.

In der GPS Auswertung sind grundsätzlich zwei Konzepte zu unterscheiden (Seeber 1993). Werden die undifferenzierten GPS Beobachtungen aus Gleichung 5.25 und 5.32 verwendet, so ist es notwendig, alle Parameter im Zuge der Ausgleichung zu schätzen. Das Konzept wird deshalb als Parameterschätzung bezeichnet. Das zweite GPS Auswertekonzept basiert auf der Parameterelimination durch Differenzbildung der Beobachtungen, wodurch der Satelliten- und Empfängeruhrfehler vollständig eliminiert werden können. Alle weiteren Fehlerkomponenten werden wesentlich reduziert, müssen aber im allgemeinen weiterhin in der Ausgleichung modelliert werden.

Der Effekt der Trägerphasendifferenzbildung wird anhand von einer Einfach-Differenz und der Doppel-Differenz aufgezeigt. Aus der undifferenzierten Beobachtungsgleichung der Trägerphasenmessung (Gleichung 5.32) ergibt sich für die Differenz zwischen zwei Stationen  $i, j$  (Wells 1986, Kleusberg, Teunissen 1996)

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{ij}^k(t) = & \rho_j^k(t, t - \tau_j^k) - \rho_i^k(t, t - \tau_i^k) \\ & - \Delta dI_{ij}^k + \Delta dT_{ij}^k + \Delta dm_{\phi_{ij}}^k + \Delta dp_{\phi_{ij}}^k + c_0 \Delta dt_{ij}(t) + \Delta \lambda N_{ij}^k + \epsilon_{\phi_{ij}}^k \end{aligned} \quad (5.34)$$

Durch die Differenzbildung zwischen den beiden Stationen wird der Satellitenuhrfehler  $dt^k$  eliminiert. Bei einer Doppel-Differenz zwischen zwei Satelliten  $k, l$  und zwei Stationen  $i, j$  entfallen zusätzlich zu den Satellitenuhrfehlern  $dt^k$  und  $dt^l$  die Empfängeruhrfehler  $dt_i$  und  $dt_j$ :

$$\begin{aligned} \nabla \Delta \Phi_{ij}^{kl}(t) = & \rho_j^l(t, t - \tau_j^l) - \rho_j^k(t, t - \tau_j^k) - \rho_i^l(t, t - \tau_i^l) + \rho_i^k(t, t - \tau_i^k) \\ & - \nabla \Delta dI_{ij}^{kl} + \nabla \Delta dT_{ij}^{kl} + \nabla \Delta dm_{\phi_{ij}}^{kl} + \nabla \Delta dp_{\phi_{ij}}^{kl} + \nabla \Delta \lambda N_{ij}^{kl} + \epsilon_{\phi_{ij}}^{kl} \end{aligned} \quad (5.35)$$

Der Doppel-Differenz Ansatz ist das am weitesten verbreitete Konzept in GPS Auswerteprogrammen. Die Beobachtungsgröße läßt ebenfalls Linearkombinationen der ursprünglichen Signale zu. Als eine weitere Linearkombination werden häufig zeitliche Differenzen der Doppel-Differenzen verwendet, durch die vor allem Cycle Slips detektiert und korrigiert werden können. Der im Kapitel 6 dargestellte Ansatz zur gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung ist unabhängig vom gewählten GPS Auswertekonzept Parameterschätzung oder Parameterelimination.

### 5.3 Beobachtungsgleichung der Bündelblockausgleichung

Die grundlegenden Beziehungen der Bündelblockausgleichung können aus der Zentralprojektion hergeleitet werden, die den Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten  $\mathbf{x}_B$  sowie der Kamerakonstanten  $c$  und den Koordinaten der Objektpunkte  $\mathbf{X}$  liefert.

$$\mathbf{x}_B = [x_B \quad y_B \quad -c]^T \quad (5.36)$$

$$\mathbf{X} = [X \quad Y \quad Z]^T \quad (5.37)$$

$$\mathbf{x}_H = [x_H \quad y_H]^T \quad (5.38)$$

Die Parameter neben den Bild- und Objektkoordinaten sind die Bildhauptpunktverschiebung  $x_H, y_H$  und die Kamerakonstante  $c$  (innere Orientierung), sowie die Objektkoordinaten des Aufnahmeortes  $X_P, Y_P, Z_P$  und einer räumlichen Drehmatrix  $\mathbf{R}$  (äußere Orientierung), außerdem noch einen Maßstabsfaktor  $\lambda_P$  (siehe Abb. 5.1).

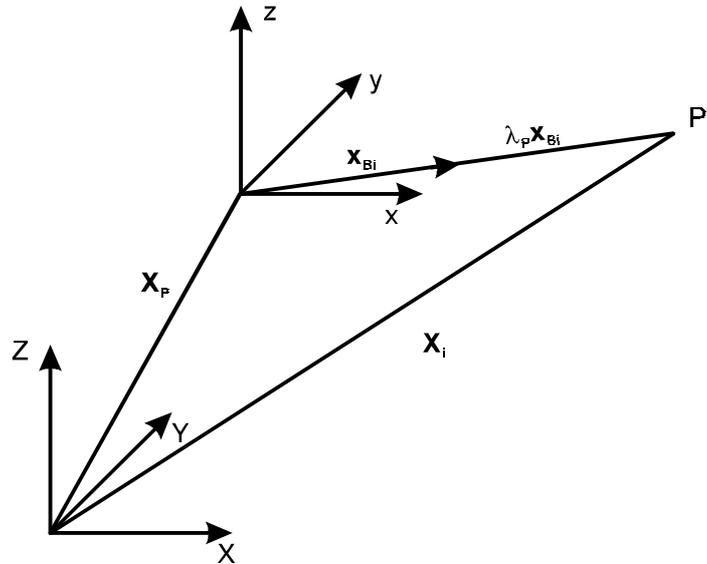


Abb. 5.1: Vereinfachte Räumliche Beziehung zwischen Bildkoordinate  $\mathbf{x}_{Bi}$ , Aufnahmezentrum  $\mathbf{X}_P$  und Objektpunkt  $P_i$  mit Koordinaten  $\mathbf{X}_i$

Die Beziehung zwischen den Koordinaten lautet

$$\mathbf{X} - \mathbf{X}_P = \lambda_P \cdot \mathbf{R}(\varphi\omega\kappa) \cdot (\mathbf{x}_B - \mathbf{x}_H). \quad (5.39)$$

Die Drehmatrix ist abhängig von den drei Orientierungswinkeln  $\varphi$ ,  $\omega$  und  $\kappa$  der Kamera. Insgesamt definieren die neun Parameter der inneren und äußeren Orientierung die Zentralprojektion eines Bildes. Die Kollinearitätsgleichung als Beobachtungsgleichung stellt eine Transformation eines dreidimensionalen Raumes in einen zweidimensionalen Raum dar und ist nicht umkehrbar. Koordinaten von Objektpunkten können nur bestimmt werden, wenn Bildkoordinaten aus zwei räumlich unterschiedlichen Bildern vorliegen. Gleichung 5.39 läßt sich umformen, so daß sich die Bildkoordinaten als Funktion der Objektpunkte und Orientierungsparameter ergeben:

$$\mathbf{x}_B = \mathbf{x}_H + \lambda_P^{-1} \cdot \mathbf{R}(\varphi\omega\kappa)^T (\mathbf{X} - \mathbf{X}_P). \quad (5.40)$$

Aus der vektoriellen Darstellung 5.40 ergibt sich nach Eliminieren von  $\lambda_P$  die für die Bündelblockausgleichung wesentliche mathematische Darstellung der Kollinearitätsgleichung als Beobachtungsgleichung mit den Elementen  $r_{jk}$  ( $j, k=1,2,3$ ) der räumlichen Drehmatrix  $\mathbf{R}$ :

$$x_B = x_H - c \frac{r_{11}(X - X_P) + r_{21}(Y - Y_P) + r_{31}(Z - Z_P)}{r_{13}(X - X_P) + r_{23}(Y - Y_P) + r_{33}(Z - Z_P)} = x_H - c \frac{Z_x}{N_K}, \quad (5.41)$$

$$y_B = y_H - c \frac{r_{12}(X - X_P) + r_{22}(Y - Y_P) + r_{32}(Z - Z_P)}{r_{13}(X - X_P) + r_{23}(Y - Y_P) + r_{33}(Z - Z_P)} = y_H - c \frac{Z_y}{N_K}. \quad (5.42)$$

Der Zähler und Nenner des Quotienten sind in einer vereinfachten Schreibweise zu  $Z_x$  bzw.  $Z_y$  und  $N$  zusammengefaßt. Für eine eindeutige Bestimmung der Parameter (insbesondere der  $Z$ -Koordinate) werden im allgemeinen redundante Beobachtungen aus weiteren Bildern

verwendet. In der klassischen Aerotriangulation wird die äußere Orientierung durch Paßpunkte und die innere Orientierung mit geeigneten Laborverfahren vorab bestimmt. In der kombinierten GPS/Block-Ausgleichung werden die Koordinaten des Aufnahmeortes während des Fluges mit GPS erfaßt.

Wie bereits beschrieben, werden alle bekannten Fehlerkomponenten der Blockausgleichung durch Korrekturen an den Bildkoordinaten als Ausgangsdaten anbracht. Zur Modellierung systematischer Bildfehler und nicht näher spezifizierbarer systematische Fehler werden häufig zusätzliche Parameter im Bildraum eingeführt, die in Abhängigkeit von den Parametern der inneren Orientierung formuliert werden.

Die um zusätzliche Parameter  $\zeta_x$  und  $\zeta_y$  erweiterte, vereinfachte Darstellung der Kollinearitätsgleichung lautet

$$x_B = x_H + \zeta_x - c \frac{Z_x}{N_K}, \quad (5.43)$$

$$y_B = y_H + \zeta_y - c \frac{Z_y}{N_K}. \quad (5.44)$$

Die zusätzlichen Parameter werden für jede Kamera in der Ausgleichung angesetzt und über unterschiedliche statistische Verfahren auf Signifikanz überprüft (Jacobsen 1980). Daraufhin wird die Anzahl der zusätzlichen Parameter automatisch reduziert (Selbstkalibrierung).

#### 5.4 Struktur der Blockausgleichung

Die Verbesserungs- und Normalgleichungen der Blockausgleichung sind für die gemeinsame Verarbeitung von photogrammetrischen Daten und GPS von Bedeutung. Die Unterteilung und Anordnung der einzelnen Beobachtungen kann auf unterschiedliche Art vorgenommen werden, so daß die hier angegebene Struktur nur eine mögliche Lösung darstellt. Die Unbekannten einer Blockausgleichung werden allgemein in drei Gruppen unterteilt. Dies sind die (gekürzten) Koordinaten der beteiligten Objektpunkte  $\hat{\mathbf{x}}_1$ , die (gekürzten) Parameter der äußeren Orientierung  $\hat{\mathbf{x}}_2$  und die (gekürzten) zusätzlichen Parameter  $\hat{\mathbf{x}}_3$  zur Erfassung unterschiedlicher Einflüsse, vorwiegend jedoch von systematischen Bildfehlern.

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{B}\hat{\mathbf{x}}_2 + \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}_3 - \mathbf{l} \quad (5.45)$$

Die Beobachtungen können in der klassischen Aerotriangulation in zwei Gruppen, die Bildkoordinaten  $\mathbf{l}_1$  und die Objektkoordinaten der Paßpunkte  $\mathbf{l}_2$  unterteilt werden. Für Paßpunkte entfallen entweder die entsprechenden Einträge der partiellen Ableitungen für die Koordinatenkomponenten in der Designmatrix, oder die Koordinaten werden über die Gewichtsmatrix als Paßpunkte eingeführt. Teilt man die Verbesserungsgleichungen in  $\mathbf{v}_1$  für Objektpunkte und  $\mathbf{v}_2$  für Paßpunkte auf, so läßt sich schreiben:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{B}_1 & \mathbf{C}_1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_2 & \mathbf{C}_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_1 & \hat{\mathbf{x}}_2 & \hat{\mathbf{x}}_3 \end{bmatrix}^T - \begin{bmatrix} \mathbf{l}_1 \\ \mathbf{l}_2 \end{bmatrix} \quad (5.46)$$

Die Normalgleichungsmatrix in 5.47 ergibt sich aus Gleichung 5.16 und besteht bei der obigen Anordnung der Unbekannten aus zwei Hyperdiagonalmartizen  $\mathbf{N}_{AA}$  und  $\mathbf{N}_{BB}$  von jeweils  $3 \times 3$  bzw.  $6 \times 6$  Elementen. Die Matrix  $\mathbf{N}_{AB}$  besitzt bei geeigneter Umordnung der Verbesserungsgleichungen eine Bandstruktur (Konecny, Lehmann 1984). Die zusätzlichen Parameter erzeugen gegenüber der großen Anzahl von Objektpunkten und Orientierungsunbekannten eine schmale Bandstruktur  $\mathbf{N}_{AC}$ ,  $\mathbf{N}_{BC}$ ,  $\mathbf{N}_{CC}$ . Als Gewichtsmatrix der Bildkoordinaten wird gewöhnlich die Einheitsmatrix verwendet. Die Gewichtsmatrizen für Paßpunkte und GPS Punkte werden ebenfalls nicht vollständig eingeführt, obwohl sie für die GPS Koordinaten meist bekannt sind, sondern nur unterschiedlich für Lage- und Höhenkomponente mit einem für den gesamten Block gültigen Wert belegt. Allgemein werden die Beobachtungen als unkorreliert betrachtet, mit Ausnahme der Orientierungs- und Punktparameter einer Aufnahme (Konecny, Lehmann 1984).

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_{AA} & \mathbf{N}_{AB} & \mathbf{N}_{AC} \\ \mathbf{N}_{AB}^T & \mathbf{N}_{BB} & \mathbf{N}_{BC} \\ \mathbf{N}_{AC}^T & \mathbf{N}_{BC}^T & \mathbf{N}_{CC} \end{bmatrix} \quad (5.47)$$

### Direkte Bestimmung des Projektionszentrums mit GPS

Als weitere Beobachtungen  $\mathbf{l}_3$  fallen bei der GPS gestützten Blockausgleichung die mit GPS bestimmten Objektkoordinaten der Aufnahmepositionen an, also Elemente der äußeren Orientierung. Weitere Unbekannte  $\hat{\mathbf{x}}_4$  in der Verbesserungsgleichung der GPS Koordinaten sind ein möglicher Datumsunterschied zwischen GPS- und Objektkoordinatensystem und die Exzentrizität zwischen Antenne und Aufnahmeort sowie im Falle der Shift- und Drift-Ansätze zeitabhängige Unbekannte für die Modellierung systematischer GPS Koordinatenfehler. Die Designmatrix  $\mathbf{D}_3$  enthält die entsprechenden partiellen Ableitungen des Unbekanntenvektors  $\hat{\mathbf{x}}_4$ . Die Verbesserungsgleichungen lauten somit:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{v}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{B}_1 & \mathbf{C}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_2 & \mathbf{C}_2 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_3 & \mathbf{0} & \mathbf{D}_3 \end{bmatrix} \cdot [\hat{\mathbf{x}}_1 \quad \hat{\mathbf{x}}_2 \quad \hat{\mathbf{x}}_3 \quad \hat{\mathbf{x}}_4]^T - \begin{bmatrix} \mathbf{l}_1 \\ \mathbf{l}_2 \\ \mathbf{l}_3 \end{bmatrix}. \quad (5.48)$$

Die Normalgleichungsmatrix mit GPS Koordinaten für die Aufnahmeorte der äußeren Orientierung ergibt sich zu:

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_{AA} & \mathbf{N}_{AB} & \mathbf{N}_{AC} & \mathbf{0} \\ \mathbf{N}_{AB}^T & \mathbf{N}_{BB} & \mathbf{N}_{BC} & \mathbf{N}_{BD} \\ \mathbf{N}_{AC}^T & \mathbf{N}_{BC}^T & \mathbf{N}_{CC} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{N}_{BD}^T & \mathbf{0} & \mathbf{N}_{DD} \end{bmatrix}. \quad (5.49)$$

Bei geeigneter Umordnung der Verbesserungsgleichungen bleibt die bekannte numerische Struktur der photogrammetrischen Blockausgleichung trotz Einbeziehung von GPS Daten grundsätzlich erhalten (Ackermann 1988, 1990). Die zusätzlichen GPS Koordinaten vergrößern die Anzahl der Beobachtungen und die einzelnen Diagonalmatrizen der Hyperdia-

gonalmatrix erweitern sich durch die GPS Beobachtungen auf  $9 \times 6$  Elemente. Dabei wird von unkorrelierten Beobachtungen ausgegangen. Die zusätzlichen Unbekannten  $\hat{\mathbf{x}}_4$  werden zweckmäßigerweise wie zusätzliche photogrammetrische Parameter in der Blockausgleichung behandelt und erweitern die bereits bestehende Bandmatrix. Die bekannten Techniken zur Behandlung schwach besetzter Matrizen (Kruck 1983, Kraus 1996) können damit weiterhin verwendet werden und die Eingriffe für die Erweiterung einer Blockausgleichung zu einer GPS gestützten Blockausgleichung sind verhältnismäßig gering.

Auf die speziellen zusätzlichen Parameter zur Erfassung systematischer GPS Fehler und der Modellierung der gesamten äußeren Orientierung in Form von zusätzlichen Parametern im Bildraum wird im folgenden Kapitel 6 eingegangen.



## 6. GPS Modellierung in der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung

In einer konventionellen Aerotriangulation ist die Positionsgenauigkeit des Projektionszentrums vom Bildmaßstab abhängig. Für großmaßstäbige Bilder von beispielsweise 1:7500 liegen die Differenzen der Koordinaten, bestimmt mit GPS bzw. aus der Blockausgleichung, im Bereich von 5 cm (Seeber u.a. 1995). Damit eignet sich die Aerotriangulation als unabhängige Methode, um GPS in Fluganwendungen zu verifizieren (Frieß 1988, Mader, Lucas 1989, Frieß 1990a, 1990b). Ebenso können in einer gemeinsamen Ausgleichung die Informationen aus der photogrammetrischen Auswertung zur Verbesserung der GPS Koordinaten genutzt werden. Die Übereinstimmungen der Koordinaten liegen bei großmaßstäbigen Bildern unterhalb der GPS Trägerphasenwellenlängen (beispielsweise  $\frac{1}{4} \lambda$ , s.o.), so daß sich über eine gemeinsame GPS/Block-Ausgleichung im Idealfall Mehrdeutigkeiten bestimmen lassen. Die grundsätzliche Möglichkeit, in einer integrierten GPS/Block-Ausgleichung Mehrdeutigkeiten zu bestimmen, wurde mehrfach angesprochen (Cannon 1991, Schwiertz 1994). Der programmtechnische und mathematische Aufwand der Zusammenführung wurde bislang als zu groß abgeschätzt, so daß konkreten Modellen nicht weiter nachgegangen wurde.

Für eine geeignete Zusammenführung von GPS-Auswertung und photogrammetrischer Bündelblockmethode sind einige Vorüberlegungen hinsichtlich der mathematischen Behandlung notwendig. Auf eine vollständige Beschreibung der Rechenverfahren wird wegen des Umfangs verzichtet. Die folgenden Angaben beschränken sich auf grundsätzliche Hinweise und Besonderheiten.

GPS Beobachtungen werden im allgemeinen zeitabhängig in einem dynamischen Algorithmus behandelt. Mathematisches Modell ist vorzugsweise das Kalman-Filter (Gelb 1974). Die Beobachtungsdaten fallen sequentiell und chronologisch an, während die wesentlichen Unbekannten, d.h. Koordinaten, Uhrfehler und Mehrdeutigkeitsterme zu den Satelliten, im Filter geschätzt werden. Das Gleichungssystem kann somit klein gehalten werden, und es ergeben sich keine großen Anforderungen an die programmtechnische Inversion der Normalgleichungsmatrix.

Photogrammetrische Auswertungen werden dagegen als statische, rein geometrische Aufgabe aufgefaßt. Durch die Paßpunkte und die große Anzahl von Verknüpfungspunkten zwischen unterschiedlichen Bildern und unterschiedlichen Streifen ergibt sich ein komplexer Bildverband. Es entstehen große Normalgleichungssysteme, die durch spezielle mathematische Algorithmen aufgelöst werden müssen. In der Blocktriangulation haben rechentechnische Gesichtspunkte der Ausgleichungsprogramme erhebliche Bedeutung. Der Umfang der numerischen Aufgaben ist auch unter heutigen Bedingungen insbesondere durch die Entwicklungen der automatisierten Aerotriangulation in der Digitalen Photogrammetrie erheblich. Deswegen werden unterschiedliche Strategien zur effektiven numerischen Behandlung der Normalgleichungen angewendet (Kruck 1983). Insbesondere wird die schwach besetzte Form der Normalgleichungsmatrix ausgenutzt (Konecny, Lehmann 1984, Kraus 1996).

Eine vollständig integrierte GPS-Auswertung innerhalb der photogrammetrischen Blockausgleichung, die auf den Beobachtungen beider Verfahren basiert, ist aufgrund des daraus resultierenden Umfangs des Programmsystems nicht anstrebenswert. Gegen eine gemeinsame Ausgleichung in einem Schritt sprechen auch programmtechnische und ausgleichungstechnische Aspekte, so daß eine möglichst späte Zusammenführung der unterschiedlichen Verfahren mit jedoch möglichst geringem Informationsverlust angestrebt werden muß. Dieser

zweistufige Ansatz ermöglicht zudem die optimale Behandlung der spezifischen Probleme bei der Koordinatenbestimmung der beiden einzelnen Verfahren. Ausgangspunkt für eine GPS gestützte Blockausgleichung müssen somit GPS Koordinaten sein, die jedoch um zusätzliche Informationen ergänzt werden können. Ein Auswertemodell für eine strenge Modellierung von GPS wird in diesem Kapitel entwickelt.

Für die Modellierung von GPS Fehlern in der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung ergibt sich zusätzlich die Möglichkeit, die Beschreibung im Bildraum statt im Objektraum vorzunehmen. Hierauf wird zunächst eingegangen, bevor das Auswertemodell für den Shift- und Drift-Ansatz angegeben und das Auswertemodell der strengen GPS Parametrisierung entwickelt wird.

### 6.1 Modellierung der Äußeren Orientierung im Bildraum

Die Modellierung der GPS Koordinatenfehler wird grundsätzlich im Objektraum der Blockausgleichung, also im Landeskoordinatensystem, vorgenommen. Die GPS Fehler können jedoch auch im Bildraum modelliert werden. Dies hat den Vorteil, daß die GPS abhängigen Parameter genauso wie zusätzliche photogrammetrische Parameter als Korrekturen der Bildkoordinaten und der Kamerakonstanten behandelt werden können. Nachteilig ist, daß eine Umparametrisierung der tatsächlichen Verbesserungen unter Verwendung von Approximationen erfolgt und die Strenge der Modellierung geschwächt wird. Ausschlaggebend für eine Modellierung im Bildraum sind ausschließlich programmtechnische Aspekte. Voraussetzung für die Modellierung im Bildraum ist die fast perfekte Korrelation von Parametern in der Kollinearitätsgleichung, die in der englischen Literatur oftmals als projektive Kompensation bezeichnet wird (Goldfarb 1987, Lapine 1991, Skaloud u.a. 1994).

#### Projektive Kompensation

Als projektive Kompensation wird die direkte Koppelung von Parametern in der Kollinearitätsgleichung verstanden, die anhand einer Senkrechtaufnahme anschaulich beschrieben werden kann. Unter der Voraussetzung, daß das Bildkoordinatensystem  $\mathbf{x}_B$  bereits parallel zum Objektkoordinatensystem  $\mathbf{X}$  (Landessystem) liegt, gilt für die perfekte Senkrechtaufnahme:

$$x_B = x_H - c \frac{X - X_P}{Z - Z_P}, \quad (6.1)$$

$$y_B = y_H - c \frac{Y - Y_P}{Z - Z_P}. \quad (6.2)$$

Auf die Kennzeichnung der einzelnen Bild- und Objektkoordinaten sowie der bild- und kameraabhängigen Größen wird hierbei verzichtet. Die Änderungen der einzelnen Parameter der Gleichungen 6.1 und 6.2 werden durch die nachfolgenden partiellen Ableitungen beschrieben:

$$\frac{\partial x_B}{\partial x_H} = 1, \quad \frac{\partial y_B}{\partial y_H} = 1, \quad (6.3)$$

$$\frac{\partial x_B}{\partial X} = -\frac{c}{Z - Z_p}, \quad \frac{\partial y_B}{\partial Y} = -\frac{c}{Z - Z_p}, \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial x_B}{\partial X_p} = \frac{c}{Z - Z_p}, \quad \frac{\partial y_B}{\partial Y_p} = \frac{c}{Z - Z_p}, \quad (6.5)$$

$$\frac{\partial x_B}{\partial c} = -\frac{X - X_p}{Z - Z_p}, \quad \frac{\partial y_B}{\partial c} = -\frac{Y - Y_p}{Z - Z_p}, \quad (6.6)$$

$$\frac{\partial x_B}{\partial Z} = c \frac{X - X_p}{(Z - Z_p)^2}, \quad \frac{\partial y_B}{\partial Z} = c \frac{Y - Y_p}{(Z - Z_p)^2}, \quad (6.7)$$

$$\frac{\partial x_B}{\partial Z_p} = -c \frac{X - X_p}{(Z - Z_p)^2}, \quad \frac{\partial y_B}{\partial Z_p} = -c \frac{Y - Y_p}{(Z - Z_p)^2}. \quad (6.8)$$

Betrachtet man die Verhältnisse einiger partieller Ableitungen, so ergeben sich identische Ausdrücke für (Goldfarb 1987):

$$\frac{\partial x_B / \partial X}{\partial x_B / \partial x_H} = \frac{\partial y_B / \partial Y}{\partial y_B / \partial y_H} = -\frac{c}{Z - Z_p} \approx \text{konstant} \quad (6.9)$$

$$\frac{\partial x_B / \partial X_p}{\partial x_B / \partial x_H} = \frac{\partial y_B / \partial Y_p}{\partial y_B / \partial y_H} = \frac{c}{Z - Z_p} \approx \text{konstant} \quad (6.10)$$

$$\frac{\partial x_B / \partial Z}{\partial x_B / \partial c} = \frac{\partial y_B / \partial Z}{\partial y_B / \partial c} = \frac{c}{Z - Z_p} \approx \text{konstant} \quad (6.11)$$

$$\frac{\partial x_B / \partial Z_p}{\partial x_B / \partial c} = \frac{\partial y_B / \partial Z_p}{\partial y_B / \partial c} = -\frac{c}{Z - Z_p} \approx \text{konstant.} \quad (6.12)$$

Für die meisten Luftbilder ist für alle Punkte die Höhenkomponente des Projektionszentrums  $Z_p$  sehr viel größer als die Höhenkomponente der Objektkoordinaten  $Z$  (Geländekoordinaten), so daß der sich ergebende Quotient praktisch konstant ist. Aus den nahezu konstanten Verhältnissen der partiellen Ableitungen folgt für diese Paare (Goldfarb 1987), daß die Bildkoordinaten des Bildhauptpunktes  $x_H, y_H$  und die Kamerakonstante  $c$  (innere Orientierung) mit den Koordinaten des Projektionszentrums  $X_p, Y_p, Z_p$  und den Objektkoordinaten  $X, Y, Z$  (äußere Orientierung) sehr hoch korreliert sind. Ausgedrückt durch den Korrelationskoeffizient  $\rho_r$  gilt:

$$\rho_r(x_H, X) = \rho_r(y_H, Y) = \rho_r(x_H, X_p) = \rho_r(y_H, Y_p) = \rho_r(c, Z) = \rho_r(c, Z_p) \approx 1. \quad (6.13)$$

Diese nahezu perfekte lineare Abhängigkeit der Elemente schließt die Bestimmung von beiden Teilen eines Paares für vertikale Bilder aus bzw. es können die Fehleranteile der Elemente nicht voneinander getrennt werden. Fehler der inneren Orientierung werden so durch Verbesserungen der Projektionszentren in der Blockausgleichung aufgefangen. Dieser Effekt

ergibt sich aus der Koppelung von Kamerakonstante und Geländehöhe ( $c \leftrightarrow Z$ ), die einen ähnlichen Anteil an beiden Gleichungen enthält. Deshalb wird der Effekt auch als projektive Kompensation bezeichnet. Da die Projektionszentren in der klassischen Aerotriangulation von untergeordneter Bedeutung sind, führt die projektive Kompensation zu vorteilhaften Effekten für die rein bodengestützte konventionelle Blockausgleichung. Die ausgeglichenen Koordinaten des Projektionszentrums entsprechen nicht dem tatsächlichen Ort, ergeben aber innerhalb der Blockausgleichung die beste Anpassung des Bildverbandes auf die Paßpunkte.

Werden dagegen die Objektkoordinaten des Aufnahmezentrums beobachtet, ergeben sich nachteilige Effekte aus der projektiven Kompensation. Fehler in der inneren Orientierung werden nicht kompensiert und wirken sich durch die zusätzlichen Bedingungen für das Projektionszentrum auf die Objektkoordinaten aus (Goldfarb 1987, Dorrer 1988). Simulationen hierzu bestätigen die grundsätzliche Abhängigkeit der Objektkoordinaten von der Genauigkeit der inneren Orientierung in der GPS gestützten Blockausgleichung (Ligterink 1988).

Zusätzlich bestehen sekundäre Abhängigkeiten zwischen den Rotationswinkeln der äußeren Orientierung  $\phi$  und  $\omega$  und den Koordinaten der inneren Orientierung  $x_H$  und  $y_H$ , auf die jedoch an dieser Stelle nur hingewiesen werden soll (Kenefick u.a. 1972, Lapine 1991).

### Änderungen der äußeren Orientierung als zusätzliche Parameter im Bildraum

Genau wie die Modellierung systematischer Bildfehler können systematische Fehler der äußeren Orientierung durch zusätzliche Parameter im Bildraum beschrieben werden. Zur Modellierung sind die Parameter der äußeren Orientierung als Funktionen des Bildhauptpunktes und der Kamerakonstanten darzustellen. Dies ist aufgrund der projektiven Kompensation gerechtfertigt.

Die um zusätzliche Parameter erweiterten, vereinfachten Darstellungen der Kollinearitätsgleichungen (5.41, 5.42) lauten

$$x_B = x_H + \zeta x - c \frac{Z_x}{N_K} = x_H + \zeta x_p + \zeta x_D + \zeta x_{GPS} - c \frac{Z_x}{N_K}, \quad (6.14)$$

$$y_B = y_H + \zeta y - c \frac{Z_y}{N_K} = y_H + \zeta y_p + \zeta y_D + \zeta y_{GPS} - c \frac{Z_y}{N_K}. \quad (6.15)$$

Dabei werden die zusätzlichen Parameter als Korrekturglieder  $\zeta x$  und  $\zeta y$  an den Bildkoordinaten angebracht. Für die weiteren Darstellungen und insbesondere für die empirischen Untersuchungen werden photogrammetrische, datumsabhängige und GPS abhängige Parameter  $\zeta x_p$ ,  $\zeta x_D$ ,  $\zeta x_{GPS}$  unterschieden.

Die projektive Kompensation ist streng nur für den Normalfall der Bildaufnahme gegeben, der bei heutigen Bildflügen im allgemeinen sehr gut eingehalten werden kann. Die tatsächlichen Orientierungswinkel, auch wenn sie sehr klein sind, beeinflussen die lineare Abhängigkeit der Elemente aus innerer und äußerer Orientierung, so daß eine Modellierung der äußeren Orientierung im Bildraum vom Standpunkt der Modellstrenge aus als eine Approximation angesehen werden muß (Schwiertz 1994). Empirische Ergebnisse mit dem Bündelblock-

ausgleichungsprogramm BLUH (Jacobsen 1994b, 1994c), das die Modellierung von Shift- und Drift-Parametern im Bildraum verwendet, haben jedoch die Funktionalität des Verfahrens gezeigt.

## 6.2 Auswertemodell des Shift- und Drift-Ansatzes

In Kapitel 4 wurden die systematischen GPS Koordinatenfehler und deren Effekte aufgezeigt. Die grundlegende Idee des Shift- und Drift-Ansatzes ist es, vorhandene systematische GPS Koordinatenfehler durch konstante und zeitabhängige Korrekturen zu erfassen und zu korrigieren. Dabei wird bewußt ein Näherungsverfahren verwendet, das nicht direkt aus GPS abgeleitet, jedoch einfach zu handhaben ist.

### Beschreibung der gemeinsamen Ausgleichung im Objektraum

Um GPS mit einer Blockausgleichung zu kombinieren, ist die Reduktion der GPS Antennenkoordinaten auf das Projektionszentrum der Kamera notwendig. Zu diesem Zweck muß die Antennenexzentrizität bekannt sein. Für die räumliche Orientierung des Vektors Antenne-Projektionszentrum werden in der GPS gestützten Blockausgleichung die Winkel der äußeren Orientierung zusammen mit einer räumlichen Drehmatrix verwendet. Die Orientierungswinkel ergeben sich photogrammetrisch aus den Bodenpaßpunkten und dem Bildverband des Blockes.

Es wird von der Identität der Projektionszentrumskoordinaten  $\mathbf{X}_p^{AT}$  eines Bildes  $i$ , bestimmt aus der Blockausgleichung im Objektkoordinatensystem, und  $\mathbf{X}_p^{GPS}$ , bestimmt mit GPS im Satellitenkoordinatensystem, ausgegangen (Colomina 1989, 1993, Frieß 1990a):

$$\mathbf{X}_{p\ i}^{AT} = \mathbf{X}_{p\ i}^{GPS}. \quad (6.16)$$

Die vollständige Identität ist jedoch wegen der Anordnung der photogrammetrischen Kamera (Aufnahmerichtung zum Boden) und der GPS Antenne  $\mathbf{X}_A^{GPS}$  (Horizontfreiheit) nicht möglich, so daß eine Exzentrizität  $d\mathbf{X}_A$  der GPS Koordinaten berücksichtigt wird. Die Orientierung des Exzentrizitätsvektors ist eine Funktion der Orientierungswinkel  $\varphi$ ,  $\omega$ ,  $\kappa$  des Bildes  $i$ , die in der Blockausgleichung bestimmt und über die Rotationsmatrix  $\mathbf{R}$  angebracht wird. Es läßt sich deshalb schreiben:

$$\mathbf{X}_{p\ i}^{GPS} = \mathbf{X}_{A\ i}^{GPS} + \mathbf{R}_i(\varphi\omega\kappa) \cdot d\mathbf{X}_A. \quad (6.17)$$

Die Exzentrizität  $d\mathbf{X}_A$  wird für die gesamte Befliegung als konstant angenommen. Desweiteren sind die GPS Koordinaten meist in einem von der Blockausgleichung abweichenden Datum  $(\mathbf{X}_A^{GPS})_D$  definiert, so daß ein Datumsübergang notwendig wird. Der Datumsübergang kann innerhalb der Blockausgleichung durch eine räumliche Ähnlichkeitstransformation berücksichtigt werden. Eine räumliche Ähnlichkeitstransformation ist durch drei Translationen  $d\mathbf{X}_D$ , einen Maßstab  $m_D$  sowie eine Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_D$  definiert (Seeber 1993). Es ist dann

$$\mathbf{X}_{p\ i}^{AT} = d\mathbf{X}_D + (1 + m_D) \cdot \mathbf{R}_D \cdot \left( (\mathbf{X}_{A\ i}^{GPS})_D + \mathbf{R}_i(\varphi\omega\kappa) \cdot d\mathbf{X}_A \right). \quad (6.18)$$

Die Datumparameter werden im allgemeinen für den gesamten Block bestimmt. Zusätzlich können weitere identische Bodenpunkte verwendet werden, wenn beispielsweise die Koordinaten der Referenzempfänger in die Blockausgleichung aufgenommen werden (Colomina 1989, 1993). Die identischen Bodenpunkte müssen nicht zwingend mit GPS beobachtete Paßpunkte sein, sondern können völlig unabhängig von der photogrammetrischen Auswertung sein.

Eine GPS gestützte Blockausgleichung verlangt zusätzlich die Modellierung systematischer GPS Fehler (Ackermann 1990, Frieß 1990a, Colomina 1993). Eine Darstellung der GPS gestützten Blockausgleichung mit zusätzlichen Parametern zur Kompensation von konstanten Verschiebungen  $\mathbf{d}$  (Shift) der GPS Koordinaten sowie linearen Verbesserungen  $\bar{\mathbf{t}}$  (Drift) in Abhängigkeit von der GPS Zeit  $t$  läßt sich schreiben als:

$$\mathbf{X}_P^{AT} = \mathbf{dX}_D + (1 + m_D) \cdot \mathbf{R}_D \cdot ((\mathbf{X}_A^{GPS})_D + \mathbf{R}_i(\varphi\omega\kappa) \cdot \mathbf{dX}_A) + \mathbf{d}_j + (t_i - t_j) \cdot \bar{\mathbf{t}}_j. \quad (6.19)$$

Die Shift- und Drift-Parameter sind dabei nicht vom einzelnen Bild  $i$  abhängig, sondern werden streifen- oder blockinvariant, aber auch für Abschnitte eines Streifens oder eines Blockes definiert. Hierdurch wird auch der Startzeitpunkt  $t_j$  der Drift-Parameter vorgegeben, der gleichzeitig einen Satz von Shift- und Drift-Parametern beschreibt.

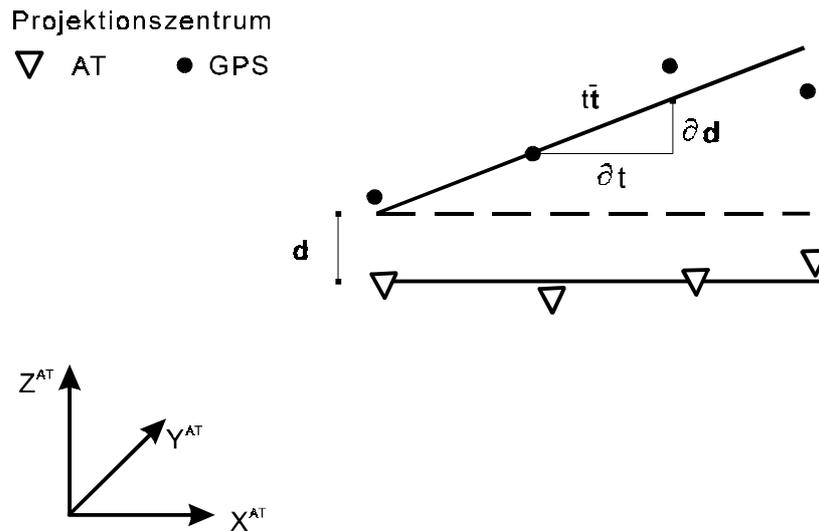
Zwischen den Datumparametern (vor allem  $\mathbf{dX}_D$ ), den Shift-Parametern ( $\mathbf{d}$ ) und weiteren photogrammetrischen Parametern der Blockausgleichung (projektive Kompensation) bestehen hohe Korrelationen, so daß die Datumstransformation im allgemeinen vor der Blockausgleichung durchgeführt wird, um Singularitäten in der Blockausgleichung zu vermeiden. Hierdurch vereinfacht sich die Beobachtungsgleichung zu:

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix}_i^{AT} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix}_i^{GPS} + \mathbf{R}_i(\varphi\omega\kappa) \cdot \begin{bmatrix} dX_A \\ dY_A \\ dZ_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix}_j + (t_i - t_j) \cdot \begin{bmatrix} \bar{t}_x \\ \bar{t}_y \\ \bar{t}_z \end{bmatrix}_j. \quad (6.20)$$

Die Bestimmung der Shift- und Drift-Parameter wird eindimensional, also für jede Koordinatenkomponente formuliert. Eine Abhängigkeit ergibt sich aus der gemeinsamen Ausgleichung.

Abbildung 6.1 stellt die Wirkungsweise der Shift- und Drift-Parameter schematisch dar. Die Differenzen zwischen Projektionszentrum aus GPS und Blockausgleichung werden durch konstante und lineare, zeitabhängige Verbesserungen modelliert. Es besteht kein direkter funktionaler Zusammenhang aus dem GPS Modell heraus, sondern die Parameter stellen ein Näherungsverfahren dar, um systematische GPS Fehler zu erfassen. Die Verbesserungen enthalten aber auch Unsicherheiten der Blockausgleichung oder weitere unbekannte systematische Fehler.

Die zeitabhängigen Parameter können mit unterschiedlichem Grad eingeführt werden. Neben den linearen Termen sind Polynomansätze mit quadratischen und kubischen Termen untersucht worden (Jacobsen 1994b, 1994c). Polynome höherer Ordnung führen im allgemeinen nicht zu einer Verbesserung der GPS gestützten Blockausgleichung, so daß der Begriff Shift- und Drift-Ansatz für diese Modellierung der systematischen GPS Fehler verwendet wird.

Abb. 6.1: Wirkungsweise der Shift- und Drift-Parameter  $\mathbf{d}$  und  $\bar{\mathbf{t}}$ 

Die Shift- und Drift-Parameter können streifeninvariant, für benachbarte Streifen oder blockinvariant definiert werden. In der Praxis werden die Parameter jedoch selten über mehr als einen Bildflugstreifen angesetzt, da GPS Signalverluste vorwiegend während der Kurvenflüge zwischen den Streifen auftreten. Zudem können blockinvariante Parameter die vorhandenen systematischen Fehler im allgemeinen nur unbefriedigend erfassen.

### Beschreibung der gemeinsamen Ausgleichung im Bildraum

Die folgende Modellierung im Bildraum geht davon aus, dass die Abweichungen der Kameraorientierung  $\varphi$  und  $\omega$  um die  $x$ - bzw.  $y$ -Achse des Bildkoordinatensystems klein sind, wodurch der Normalfall der photogrammetrischen Aufnahme angenommen werden kann. Die strengen partiellen Ableitungen der Kollinearitätsgleichung sind zum Vergleich im Anhang 11.1 angegeben. Die partiellen Ableitungen 6.3 bis 6.8 für den Normalfall der photogrammetrischen Aufnahme lassen sich vereinfachen zu:

$$\frac{\partial x_B}{\partial Z_p} = -c \frac{X - X_p}{(Z - Z_p)^2} \approx -\frac{X - X_p}{c} \approx -\frac{x_B}{c}, \quad (6.21)$$

$$\frac{\partial y_B}{\partial Z_p} = -c \frac{Y - Y_p}{(Z - Z_p)^2} \approx -\frac{Y - Y_p}{c} \approx -\frac{y_B}{c}, \quad (6.22)$$

$$\frac{\partial x_B}{\partial X_p} = \frac{\partial y_B}{\partial Y_p} \approx 1. \quad (6.23)$$

Damit ergibt sich direkt die bereits festgestellte Möglichkeit, Änderungen der äußeren Orientierung im Objektraum durch Änderungen der inneren Orientierung im Bildraum zu ersetzen:

$$\frac{\partial x_B}{\partial X_P} \approx \frac{\partial x_B}{\partial Y_P} \approx \frac{\partial x_B}{\partial x_H} \approx \frac{\partial y_B}{\partial y_H} \approx 1, \quad (6.24)$$

$$\frac{\partial x_B}{\partial Z_P} \approx \frac{\partial x_B}{\partial c} \approx -\frac{x_B}{c}, \quad (6.25)$$

$$\frac{\partial y_B}{\partial Z_P} \approx \frac{\partial y_B}{\partial c} \approx -\frac{y_B}{c}. \quad (6.26)$$

Aus den partiellen Ableitungen ergeben sich die zusätzlichen Parameter  $\zeta_x$  und  $\zeta_y$  für eine konstante Verschiebung der GPS Koordinaten. Dabei werden bei den heutigen Bedingungen nur geringe Abweichungen vom Normalfall während eines Bildfluges erreicht, so daß auf die vereinfachte Form aus Gleichung 6.1 und 6.2 zurückgegriffen werden kann:

$$\zeta_{X_{GPS_i}}(\mathbf{d}) = d_{x_j} + \left(-\frac{x_{Bi}}{c}\right) \cdot d_{z_j}, \quad (6.27)$$

$$\zeta_{Y_{GPS_i}}(\mathbf{d}) = d_{y_j} + \left(-\frac{y_{Bi}}{c}\right) \cdot d_{z_j}. \quad (6.28)$$

Die Parameter  $d_x$  und  $d_y$  in Gleichung 6.27 und 6.28 entsprechen einer Änderung des Bildhauptpunktes  $\mathbf{x}_H$ , während der Parameter  $d_z$  einer Änderung der Kamerakonstante  $c$  entspricht. Die Änderungen der Kamerakonstanten und des Bildhauptpunktes im Bildraum entsprechen Verschiebungen der äußeren Orientierung im Objektraum (Jacobsen 1994a). Die Gleichungen gehen bereits von der Parallelität von Bild- und Objektkoordinatensystem aus, wodurch Terme aufgrund der Kantung  $\kappa$  des Bildes nicht enthalten sind.

In den Gleichungen 6.29 bis 6.32 sind entsprechend einer linearen bzw. quadratischen Abhängigkeit von der GPS Zeit  $t$ , Änderungen von Bildhauptpunkt und Kamerakonstanten zugelassen, die einer Drift  $\bar{\mathbf{t}}$  bzw. quadratische Verbesserungen  $\bar{\mathbf{tt}}$  der GPS Koordinaten im Objektraum repräsentieren (Jacobsen 1994a). Die Kamerakonstante kann gegebenenfalls mit der Z-Komponente der Unbekannten zusammengefaßt werden. Es gilt:

$$\zeta_{X_{GPS_i}}(\bar{\mathbf{t}}) = \bar{t}_{x_j} + (t_i - t_j) \cdot \left(-\frac{x_{Bi}}{c}\right) \cdot \bar{t}_{z_j}, \quad (6.29)$$

$$\zeta_{Y_{GPS_i}}(\bar{\mathbf{t}}) = \bar{t}_{y_j} + (t_i - t_j) \cdot \left(-\frac{y_{Bi}}{c}\right) \cdot \bar{t}_{z_j}, \quad (6.30)$$

$$\zeta_{X_{GPS_i}}(\bar{\mathbf{tt}}) = \bar{tt}_{x_j} + (t_i - t_j)^2 \cdot \left(-\frac{x_{Bi}}{c}\right) \cdot \bar{tt}_{z_j}, \quad (6.31)$$

$$\zeta_{Y_{GPS_i}}(\bar{\mathbf{tt}}) = \bar{tt}_{y_j} + (t_i - t_j)^2 \cdot \left(-\frac{y_{Bi}}{c}\right) \cdot \bar{tt}_{z_j}. \quad (6.32)$$

Für den Shift- und Drift-Ansatz mit einer konstanter Verschiebung (Shift) und linearen zeitlichen Drift lauten die vollständigen zusätzlichen Parameter für die Modellierung im Bildraum somit:

$$\zeta_{\mathbf{x}_i} = \zeta_{\mathbf{x}_{p_i}} + \zeta_{\mathbf{x}_{\text{GPS}_i}}(\mathbf{d}) + \zeta_{\mathbf{x}_{\text{GPS}_i}}(\bar{\mathbf{t}}). \quad (6.33)$$

Ein quadratisches Polynom ist durch Erweitern von Gleichung 6.33 durch den Vektor  $\xi_{\mathbf{x}_{\text{GPS}}}(\bar{\mathbf{t}})$ , der die Terme aus Gleichung 6.31 und 6.32 enthält, definiert.

### **6.3 Auswertemodell der strengen GPS Parametrisierung**

Für eine strenge gemeinsame Behandlung von GPS und Blockausgleichung ist ein Modell zu entwickeln, das aufgrund der unabhängigen Koordinatenbestimmung des Projektionszentrums in der Blockausgleichung, die verbleibenden systematischen GPS Koordinatenfehler bestimmen kann. Ausgangspunkt hierfür muß das Modell der GPS Beobachtungen sein. Durch Satellitenkonstellationsänderungen ergeben sich für alle systematischen GPS Fehler Unstetigkeiten, die insbesondere durch eine ungünstige Satellitengeometrie verstärkt werden und im Modell zu berücksichtigen sind.

#### **Modellierung fehlerhaft festgesetzter GPS Mehrdeutigkeiten**

Die systematischen Verfälschungen der GPS Koordinaten werden durch fehlerhaft festgesetzte Anfangsmehrdeutigkeiten oder fehlerhaftes Festsetzen von Mehrdeutigkeiten aufgrund von Signalunterbrechungen während des Bildfluges verursacht. Im folgenden wird davon ausgegangen, daß eine Mehrdeutigkeitslösung in der GPS Auswerte-Software durchgeführt und angestrebt wird. Es werden statistische Methoden zur Bestimmung der Zuverlässigkeit der Mehrdeutigkeitsfestsetzung eingesetzt. Grundsätzlich ist somit davon auszugehen, daß die Mehrdeutigkeits-schätzung in der GPS Auswerte-Software zuverlässig und korrekt durchgeführt wird. Somit sind nach statistischen Kriterien festgesetzte Mehrdeutigkeiten als korrekt gelöst und fehlerfrei anzusehen und bedürfen nicht mehr der Kontrolle in der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung.

In der GPS-Auswertung können jedoch nicht zuverlässig festsetzbare Mehrdeutigkeiten verbleiben. Bisher wurden diese Mehrdeutigkeiten ohne Rücksicht auf die statistischen Aussagen auf den nächsten ganzzahligen Wert gezwungen oder es wurden die reellen Mehrdeutigkeitsschätzungen für die Koordinatenbestimmung verwendet. Der folgende Ansatz zeigt eine Methode auf, um diese fehlerhaft festgesetzten Mehrdeutigkeiten zu bestimmen, wenn externe Informationen über die GPS Koordinaten vorliegen. Zur Ableitung des funktionalen Zusammenhanges wird zunächst der Effekt von fehlerhaft festgesetzten Mehrdeutigkeiten auf die GPS Positionsschätzung dargestellt.

Der Ausgleichungsansatz ist das Gauß-Markov Modell. Die Wahl des Ausgleichungsansatzes ist unabhängig von der tatsächlich durchgeführten Ausgleichungsmethode in der GPS Auswerte-Software, da sich das hier vorwiegend verwendete Kalman Filter in Normalgleichungen darstellen läßt (Wübbena 1991) bzw. sich die Ausgleichungsansätze grundsätzlich mathematisch ineinander überführen lassen (Vanicek, Krakiwsky 1986).

Betrachtet wird zur Vereinfachung eine kinematische GPS Koordinatenbestimmung zu einer Epoche  $i$ . Die Modellierung sämtlicher Fehlereinflüsse wurde in der GPS Auswerte-Software korrekt berücksichtigt. Die Mehrdeutigkeiten sind festgesetzt, und es ergeben sich die Koordinaten, die Bestandteil des Unbekanntenvektors  $\mathbf{x}$  sind. Der linearisierte, vermittelnde Ausgleichungsansatz lautet nach Gleichung 5.11 somit für die GPS Auswertung

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{A}_i \hat{\mathbf{x}}_i + \mathbf{v}_i. \quad (6.34)$$

Im Beobachtungsvektor  $\mathbf{l}$  sind die Streckenmessungen zu den Satelliten enthalten. Die Designmatrix  $\mathbf{A}$  enthält sämtliche für die GPS Koordinatenbestimmung notwendigen geometrischen Informationen. Somit werden auch Satellitenkonstellationsänderungen von Epoche zu Epoche berücksichtigt. Erweitert man den Beobachtungsvektor um einen Vektor mit Mehrdeutigkeiten, der insbesondere fehlerhaft festgesetzte Mehrdeutigkeiten enthält, so ergibt sich

$$\mathbf{l}_i + \lambda \cdot \mathbf{N}_i = \mathbf{A}_i \hat{\mathbf{x}}_i + \mathbf{v}_i. \quad (6.35)$$

Der Mehrdeutigkeitsvektor  $\mathbf{N}$  enthält für zuverlässig gelöste Mehrdeutigkeiten einen Nulleintrag und ansonsten die fehlerhafte Mehrdeutigkeit. Weiteres Auflösen der Normalgleichungen führt zu dem Unbekanntenvektor  $\mathbf{x}$  mit den GPS Koordinaten:

$$\hat{\mathbf{x}}_i = \mathbf{Q}_i \mathbf{n}_i = (\mathbf{Q} \mathbf{A}^T \mathbf{P})_i (\mathbf{l}_i + \lambda \cdot \mathbf{N}_i). \quad (6.36)$$

Als Gewichtsmatrix  $\mathbf{P}$  wird im allgemeinen die Einheitsmatrix  $\mathbf{I}$  eingeführt. Es kann jedoch auch die vollständige Varianz-Kovarianz-Matrix aus der GPS Ausgleichung verwendet werden, wenn entsprechende Informationen vorliegen. Werden die Mehrdeutigkeit und die Wellenlänge des GPS Trägersignals zu einem Korrekturterm  $\bar{\mathbf{N}} = \lambda \cdot \mathbf{N}$  zusammengefaßt, läßt sich

$$\hat{\mathbf{x}}_i = (\mathbf{Q} \mathbf{A}^T \mathbf{P})_i \mathbf{l}_i + (\mathbf{Q} \mathbf{A}^T \mathbf{P})_i \bar{\mathbf{N}}_i = \bar{\mathbf{x}}_i + \delta \hat{\mathbf{x}}_i. \quad (6.37)$$

schreiben. Dies ist die entscheidende Darstellung, die eine fehlerhafte Koordinatenschätzung  $\bar{\mathbf{x}}$  und eine Koordinatenverbesserung  $\delta \hat{\mathbf{x}}$  aufgrund fehlerhafter Mehrdeutigkeiten verbindet. Es müssen jedoch vom GPS unabhängige Beobachtungen vorliegen, um die Mehrdeutigkeitsterme in einer erneuten Ausgleichung bestimmen zu können. Dies ist in der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung in idealer Weise und, abhängig vom Bildmaßstab der Befliegung, mit ausreichender Genauigkeit gegeben. Ebenso müssen die Kofaktormatrix  $\mathbf{Q}$  und die Designmatrix  $\mathbf{A}$  der GPS Ausgleichung bekannt sein. Ist beides gegeben, lassen sich unter Einhaltung des strengen GPS Modells Koordinatenkorrekturen aufgrund fehlerhaft festgesetzter Mehrdeutigkeiten bestimmen.

Abbildung 6.2 stellt den Ansatz schematisch dar. Aus den reellwertigen Streckenkorrekturen zu den Satelliten kann die ursprüngliche GPS Position mit der Positionsinformation des Projektionszentrums aus der Blockausgleichung verbessert werden. Satellitenkonstellationsänderungen werden durch die Designmatrix korrekt und entsprechend dem GPS Modell berücksichtigt. Fehler durch Interpolation über Unstetigkeitsstellen in den GPS Koordinaten treten zunächst nicht auf. Die Bestimmung von Mehrdeutigkeiten aus den Streckenkorrekturen ist bei entsprechender Genauigkeit der Projektionszentren aus der Blockausgleichung möglich.

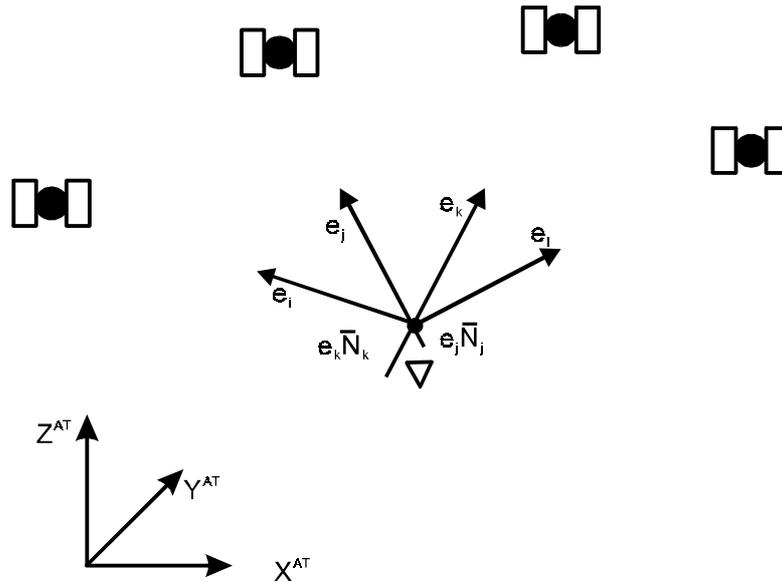


Abb. 6.2: Wirkungsweise der Koordinatenverbesserung bei der strengen GPS Parametrisierung mit Richtungscosinus  $e$  und Streckenverbesserung  $\bar{N} = \lambda \cdot N$  ( $\nabla$  Projektionszentrum aus AT und  $\bullet$  aus GPS)

### Beschreibung der gemeinsamen Ausgleichung im Objektraum

Die Beschreibung der gemeinsamen Ausgleichung nach der strengen Parametrisierung kann direkt aus der Entwicklung des Modells (Gleichung 6.37) entnommen werden, da das Koordinatensystem des Objektraumes verwendet wird. Unter Berücksichtigung der Antennenexzentrizität  $d\mathbf{X}_A$  und einem Datumsübergang mit Translationsvektor  $d\mathbf{X}_D$ , Maßstabsfaktor  $m_D$  sowie Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_D$  läßt sich in Anlehnung an den Shift- und Drift-Ansatz in Gleichung 6.19 für das Projektionszentrum  $i$  schreiben:

$$\mathbf{X}_{P_i}^{AT} = d\mathbf{X}_D + (1 + m_D) \cdot \mathbf{R}_D \cdot \left( (\mathbf{X}_A^{GPS})_D + (\mathbf{Q}\mathbf{A}^T \mathbf{P}\bar{\mathbf{N}})_i + \mathbf{R}_i(\varphi\omega\kappa) \cdot d\mathbf{X}_A \right) . \quad (6.38)$$

Auf den vollständigen Datumsübergang innerhalb der Blockausgleichung kann beim Shift- und Drift-Ansatz verzichtet werden, wenn die GPS Koordinaten vor der Blockausgleichung in das Objektkoordinatensystem transformiert werden. Die Shift-Parameter kompensieren verbleibende Datumsunterschiede, die vorliegen können, wenn keine direkte Verknüpfung zwischen den verwendeten identischen Punkten und den Paßpunkten, die das Objektkoordinatensystem in der Blockausgleichung definieren, bestehen. Deshalb sind in der strengen GPS Parametrisierung auch bei vorgeschalteter Datumstransformation, Translationen (oder eine vollständige räumliche Ähnlichkeitstransformation) in der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung in der Regel zu berücksichtigen, so daß sich eine vereinfachte Darstellung auf

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix}_i^{AT} = \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix}_i^{GPS} + d\mathbf{X}_D + (\mathbf{Q}\mathbf{A}^T \mathbf{P})_i \cdot \bar{\mathbf{N}}_i + \mathbf{R}_i(\varphi\omega\kappa) \cdot \begin{bmatrix} dX_A \\ dY_A \\ dZ_A \end{bmatrix} \quad (6.39)$$

beschränkt. Auf die Bestimmung der  $\mathbf{QA}^T$  Matrix wird am Ende des Kapitels eingegangen.

### Beschreibung der gemeinsamen Ausgleichung im Bildraum

Anstatt die äußere Orientierung (Koordinaten des Projektionszentrums) im Objektraum zu beschreiben, besteht aufgrund linearer Abhängigkeit auch die Möglichkeit einer Darstellung im Bildraum durch Änderung der Bildhauptpunktkoordinaten  $x_H$  und  $y_H$  und der Kamerakonstanten  $c$ . Vorausgesetzt werden kleine Abweichungen der Kameraorientierung  $\varphi$  und  $\omega$  um die  $x$ - bzw.  $y$ -Achse des Bildkoordinatensystems, wodurch der Normalfall der Aufnahme aus Gleichung 6.1 und 6.2 verwendet werden kann. Bild- und Objektkoordinatensystem sind bereits parallel, so daß keine Abhängigkeit von der Kantung  $\kappa$  des Bildes dargestellt wird.

Die strenge Darstellung für die Verbesserungen der Objektkoordinaten des Aufnahmezentrums im Bildraum verlangt eine Auflösung der Matrix  $\mathbf{QA}^T$ . Die Dimension  $(n, 3)$  der  $\mathbf{QA}^T$  Matrix zum Zeitpunkt der Aufnahme  $i$  ist bestimmt durch die Anzahl  $n$  der Satelliten und die Koordinatenkomponenten  $X, Y, Z$ . Es gilt:

$$(\mathbf{QA}^T)_i = \begin{bmatrix} (qa)_{1,X} & (qa)_{1,Y} & (qa)_{1,Z} \\ \dots & \dots & \dots \\ (qa)_{k,X} & (qa)_{k,Y} & (qa)_{k,Z} \end{bmatrix}, \quad k=1, \dots, n. \quad (6.40)$$

Mit den partiellen Ableitungen der Kollinearitätsgleichung des Normalfalles aus Gleichung 6.21 bis 6.23 ergeben sich näherungsweise bzw. streng die zusätzlichen GPS abhängigen Parameter für die Modellierung im Bildraum der strengen GPS Parametrisierung. Erweitert um die Komponenten der  $\mathbf{QA}^T$  Matrix und die Mehrdeutigkeitsterme  $\bar{N} = \lambda \cdot N$  (zu  $n$  Satelliten), läßt sich schreiben:

$$\zeta_{X_{GPS_i}}(\bar{N}) = \sum_{k=1}^n \left( -\frac{x_{Bi}}{c} \cdot (qa)_{k,Z} \cdot \bar{N}_k \right) + \sum_{k=1}^n \left( (qa)_{k,X} \cdot \bar{N}_k \right), \quad (6.41)$$

$$\zeta_{Y_{GPS_i}}(\bar{N}) = \sum_{k=1}^n \left( -\frac{y_{Bi}}{c} \cdot (qa)_{k,Z} \cdot \bar{N}_k \right) + \sum_{k=1}^n \left( (qa)_{k,Y} \cdot \bar{N}_k \right). \quad (6.42)$$

Wie bei der Modellierung im Objektraum (Gleichung 6.39) sind Datumstranslationen  $d\mathbf{x}_D$  zu berücksichtigen. Für die Modellierung im Bildraum entsprechen diese den Shift-Parametern der Gleichungen 6.27 und 6.28, die hier als reine datumsabhängige, zusätzliche Parameter  $\zeta_{\mathbf{x}_D}$  aufgefaßt werden. Für die strenge GPS Parametrisierung lauten die vollständigen zusätzlichen Parameter zur Modellierung systematischer GPS Koordinatenfehler im Bildraum demnach:

$$\zeta_{\mathbf{x}_i} = \zeta_{\mathbf{x}_{p_i}} + \zeta_{\mathbf{x}_D}(\mathbf{d}) + \zeta_{\mathbf{x}_{GPS_i}}(\bar{N}). \quad (6.43)$$

Ein Vergleich der Modellierungen im Objektraum und im Bildraum zeigt, daß die Modellierung im Objektraum die strengere Methode ist. Bei der Ableitung des funktionalen Ansatzes werden Vereinfachungen und Näherungen angenommen, die in der Regel zutreffen, aber Restsystematiken verursachen können. Die Modellierung im Objektraum kommt jedoch ohne diese Annahmen aus.

### Schnittstelle zwischen GPS Auswertung und Blockausgleichung

Wie zuvor dargestellt, kann eine strenge GPS Parametrisierung in der kombinierten GPS/Block-Ausgleichung durchgeführt werden, wenn Designmatrix und unzuverlässig gelöste Mehrdeutigkeiten in der Blockausgleichung bekannt sind. GPS Koordinatenschätzung und Auslösezeitpunkte der photogrammetrischen Aufnahme sind bekanntlich nicht synchron. Eine Interpolation der GPS Koordinaten auf die Auslösezeiten ist deshalb notwendig, wobei auch die GPS Designmatrix für diese Zeitpunkte aufgestellt werden muß. Im folgenden wird vorausgesetzt, daß Satellitenelevation  $\varepsilon$  und Azimut  $\alpha$  ebenfalls auf die Auslösezeitpunkte interpoliert werden. GPS Satelliten bewegen sich sehr langsam mit einer Geschwindigkeit von 4 km/s auf der Satellitenbahn. Bei den geringen Änderungen (Abb. 6.3) der Satelliten und der trigonometrischen Funktionen in der Design-Berechnung ist eine lineare Interpolation ausreichend (Han, Rizos 1996).

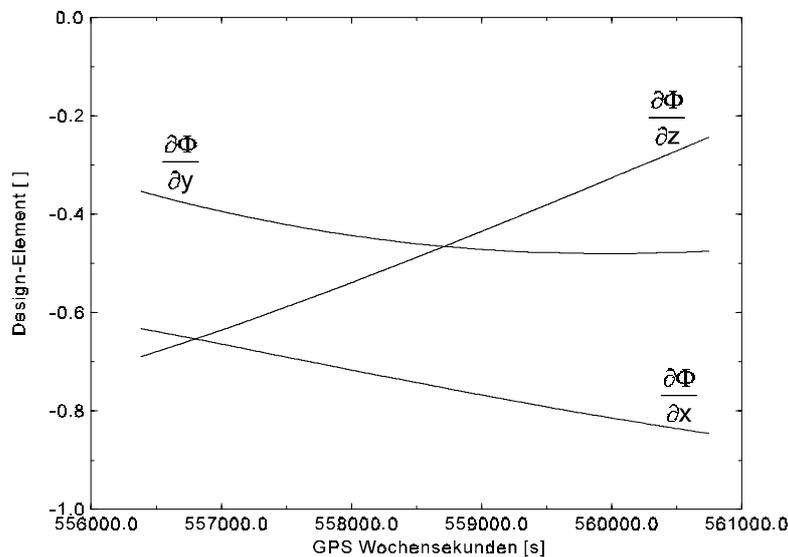


Abb. 6.3: Änderung der Design-Elemente bestimmt aus Trägerphasenbeobachtungen  $\Phi$  eines GPS Satelliten über ca. 1.5 h in Nord-, Ost- und Höhenkomponente (x, y, z)

Aus Gleichung 5.31 und 5.32 ergibt sich eine vereinfachte Form für undifferenzierte GPS Beobachtungen. Die atmosphärische Refraktion wird als korrekt modelliert angenommen bzw. Restfehler ergeben zusammen mit Mehrwegeeffekten und Phasenzentrumsvariationen das Meßrauschen  $\varepsilon_{\phi}^{\Sigma}$ . Die Uhrparameter des Satelliten und des Empfängers sind als ein Uhrparameter  $dt_{\phi}^{\Sigma}$  zusammengefaßt, so daß sich mit den Koordinaten des Satelliten  $\mathbf{X}^k$  und des Empfänger  $\mathbf{X}_i$  sowie der Mehrdeutigkeit  $N$  schreiben läßt:

$$\Phi_i^k(t) = \|\mathbf{X}^k - \mathbf{X}_i\| + c_0 dt_{\phi}^{\Sigma} + \lambda N_i^k + \lambda \varepsilon_{\phi}^{\Sigma} \quad (6.44)$$

Der Uhrfehler ist mit der Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  und die Mehrdeutigkeit mit der Trägerphasenwellenlänge  $\lambda$  skaliert. Werden die Koordinatenkomponenten eingeführt, lassen sich aus

$$\Phi_i^k(t) = \left( (X^k - X_i)^2 + (Y^k - Y_i)^2 + (Z^k - Z_i)^2 \right)^{0.5} + c_0 dt_{\phi_i}^{\Sigma k} + \lambda N_i^k + \lambda \varepsilon_{\phi_i}^{\Sigma k} \quad (6.45)$$

die partiellen Ableitungen nach den unbekanntenen Koordinaten und dem Uhrfehler aufstellen. Für die GPS Koordinaten ergeben sich im globalen kartesischen Koordinatensystem des Satellitensystems:

$$\frac{\partial \Phi_i^k}{\partial X_i} = \frac{X^k - X_i}{\rho_i^k}, \quad (6.46)$$

$$\frac{\partial \Phi_i^k}{\partial Y_i} = \frac{Y^k - Y_i}{\rho_i^k}, \quad (6.47)$$

$$\frac{\partial \Phi_i^k}{\partial Z_i} = \frac{Z^k - Z_i}{\rho_i^k}, \quad (6.48)$$

$$\frac{\partial \Phi_i^k}{\partial t_{\phi_i}^{\Sigma k}} = c_0. \quad (6.49)$$

Für die gemeinsame GPS/Block-Ausgleichung werden die Designelemente im Objektkoordinatensystem benötigt. Abbildung 6.4 zeigt den Zusammenhang zwischen Satellitenazimut  $\alpha$  und Satellitenelevation  $\varepsilon$  im topozentrischen System, der durch einfache Substitution die Darstellung der partiellen Ableitungen in Abhängigkeit von Azimut und Elevation erlaubt (siehe 6.50). Werden kartographische Abbildungen als Objektkoordinatensystem in der Blockausgleichung verwendet, ist die Meridiankonvergenz zu berücksichtigen, um das Satellitenazimut des topozentrischen System zu korrigieren (siehe Kapitel 3.1).

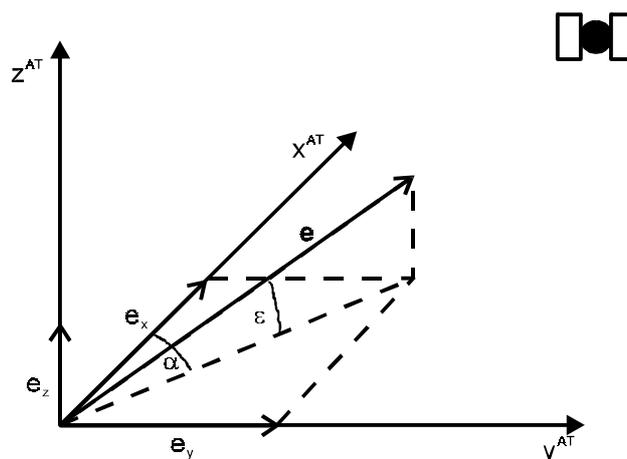


Abb. 6.4: Richtungskoeffizienten, Azimut und Elevation eines Satelliten in einem topozentrischen geodätischen Koordinatensystem

Die GPS Designmatrix ergibt sich für jedes Projektionszentrum aus den Koeffizienten  $\mathbf{a}_k$ , die aus den Richtungskoeffizienten  $e$  und dem Uhrparameter  $dt$  zu  $n$  Satelliten bestehen:

$$\mathbf{A}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1 \\ \mathbf{a}_2 \\ \mathbf{a}_3 \\ \dots \\ \mathbf{a}_k \end{bmatrix}, \quad \mathbf{a}_k^T = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \\ c_0 dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \epsilon \cos \alpha \\ -\cos \epsilon \sin \alpha \\ -\sin \epsilon \\ 1 \end{bmatrix}, \quad k=1, \dots, n. \quad (6.50)$$

Das Produkt aus Lichtgeschwindigkeit  $c_0$  und Uhrfehler  $dt$  ist in Gleichung 6.50 zusammengefaßt. Hierdurch haben alle Unbekannten die gleiche Einheit Meter und es ergeben sich numerische Vorteile (Strang, Borre 1997). Als Übergabe aus der GPS Auswertung ist somit pro Epoche Elevation  $\epsilon$  und Azimut  $\alpha$  von allen zur Koordinatenschätzung verwendeten Satelliten  $n$  ausreichend. Zur Bestimmung der interessierenden Mehrdeutigkeitskorrekturen muß zusätzlich ein Vektor, der zuverlässig gelöste und nicht zuverlässig gelöste Mehrdeutigkeiten kennzeichnet, bekannt sein. Der Vektor der zu schätzenden Mehrdeutigkeiten ergibt sich somit zu:

$$\begin{bmatrix} \bar{N}_1 \\ \bar{N}_2 \\ \bar{N}_3 \\ \dots \\ \bar{N}_k \end{bmatrix} = \lambda \cdot \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ \dots \\ N_k \end{bmatrix}, \quad N_k = \begin{cases} 0 & \text{zuverlässig gelöst} \\ 1 & \text{unzuverlässig gelöst} \end{cases}, \quad k=1, \dots, n \quad (6.51)$$

Das vollständige Modell zur Bestimmung der Mehrdeutigkeitskorrekturen kann mit der Designmatrix  $\mathbf{A}$  berechnet werden:

$$\delta \hat{\mathbf{x}}_i = (\mathbf{Q} \mathbf{A}^T \mathbf{P})_i \cdot \bar{\mathbf{N}}_i = ((\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P})_i \cdot \bar{\mathbf{N}}_i. \quad (6.52)$$

Der Uhrparameter  $dt$  ist zum korrekten Aufstellen der Designmatrix notwendig, dann aber nicht weiter von Interesse und kann aus der Normalgleichung eliminiert werden (Strang, Borre 1997). Durch Streichen der letzten Zeile und Spalte aufgrund des Uhrfehlers wird die endgültige und korrekt dimensionierte  $\mathbf{Q} \mathbf{A}^T$  Matrix erhalten. Die Gewichtsmatrix  $\mathbf{P}$  kann mit den entsprechenden Informationen aus der GPS Ausgleichung verwendet werden oder sie wird durch die Einheitsmatrix  $\mathbf{P}=\mathbf{I}$  ersetzt, wenn keine Informationen hierüber vorliegen.

Die unzuverlässig gelösten Mehrdeutigkeiten sind in einer gemeinsamen Ausgleichung von GPS und Aerotriangulation zu schätzen. Dazu werden sie zunächst in der GPS Auswertung auf ganzzahlige Werte gezwungen, um eine kontinuierliche und kontrollierte Koordinatenschätzung zu ermöglichen. In der anschließenden gemeinsamen Ausgleichung werden dann Positionskorrekturen unter Berücksichtigung der wesentlich unsicheren, weil gezwungenen, Mehrdeutigkeiten verbessert. Als optionale Vorgehensweise können auch sämtliche Mehrdeutigkeiten in der gemeinsamen Ausgleichung überprüft werden. Hierbei kann es jedoch zu Singularitäten innerhalb der Blockausgleichung kommen. Werden sehr viele, insbesondere vollständige Signalverluste zu allen Satelliten geschätzt, liegt keine ausreichende Stützung des

photogrammetrischen Blockes durch GPS mehr vor. Die reduzierte Paßpunktanzahl reicht nicht aus, um GPS Parameter und photogrammetrische Parameter gemeinsam in der photogrammetrischen Ausgleichung zu bestimmen.

## 7. Erprobung der Modelle

Für die Auswertung der Datensätze werden die GPS Koordinaten, unterschiedliche zusätzliche Parameter in Abhängigkeit vom verwendeten Ansatz und, im Falle der strengen GPS Parametrisierung, die Design-Information in die Bündelblockausgleichung eingeführt. Sämtliche zusätzlichen Parameter sind abhängig von Parametern der inneren Orientierung, unterscheiden sich jedoch funktional und modellieren unterschiedliche Fehleranteile. Tabelle 7.1 definiert allgemeine Abkürzungen und verwendete zusätzliche Parameter sowie den Einsatz der Parameter.

Abkürz.	Zusätzliche Parameter (ZP)	Modellierter Fehler	Angesetzt für
p	photogrammetrisch	$\zeta_{\mathbf{x}_p}$	systematische Bildfehler Kamera
d	datumsabhängig	$\zeta_{\mathbf{x}_D}$ ; $\zeta_{\mathbf{x}_{GPS}}$	Datumsunterschied GPS/AT; konstanter GPS Koordinatenfehler (Shift) Streifen/Block
g	mehrdeutigkeitsabhängig	$\zeta_{\mathbf{x}_{GPS}}$	GPS Koordinatenfehler unsichere Mehrdeutigkeit zu Satellit
t	linear, zeitabhängig	$\zeta_{\mathbf{x}_{GPS}}$	GPS Koordinatenfehler (Drift) Streifen/Block
tt	quadratisch, zeitabhängig	$\zeta_{\mathbf{x}_{GPS}}$	GPS Koordinatenfehler (Drift) Streifen/Block
b	blockinvariant		Block
s	streifeninvariant		Streifen

Tab. 7.1: Zusammenstellung der verwendeten zusätzlichen Parameter in der Bündelblockausgleichung BLUH

Die strenge GPS Parametrisierung verwendet zu den photogrammetrischen Parametern auch datums- und mehrdeutigkeitsabhängige Parameter. Die datumsabhängigen Parameter werden für den gesamten Block bestimmt, so daß die strenge Parametrisierung als “p d g b” gekennzeichnet wird. Die Shift- und Drift-Ansätze variieren in der Wahl der zusätzlichen Parameter, wobei die photogrammetrischen Parameter in allen Ansätzen verwendet werden. Die datumsabhängigen Parameter werden auch streifenweise angesetzt, so daß sie nicht mehr einen einheitlichen Datumsunterschied beschreiben und als Shift-Parameter bezeichnet werden. Lineare oder quadratisch von der Zeit abhängige Parameter kompensieren das Driftverhalten der GPS Koordinatenfehler. Ein wesentlicher Unterschied zum strengen Ansatz ist, daß die zusätzlichen Parameter streifen- oder blockinvariant benutzt werden können.

### Allgemeine Auswertestrategie

Für die Erprobung der Modelle wurden die Programme GEONAP (*Geodetic NAVSTAR Positioning*) (Wübbena 1988, 1989, 1991) und BLUH (*Bundle Block Adjustment University of Hannover*) (Jacobsen 1980, 1994a) erweitert und angepaßt, um zum einen sämtliche benötigte Informationen aus der GPS Auswertung bereitzustellen und zum anderen eine strenge GPS Modellierung im Bildraum in der Bündelblockausgleichung zu ermöglichen. Die Modellierung sämtlicher zusätzlicher Parameter im Bildraum und somit als Funktion der

inneren Orientierung ist eine besondere Charakteristik von BLUH. Für die gemeinsame GPS/Bündelblockausgleichung mit BLUH wurden allgemeine Auswertestrategien definiert und auf alle Berechnungen angewendet.

In der GPS Auswertung wurden die Daten der kinematischen Station relativ zu einer oder zu mehreren Referenzstationen ausgewertet. Die Koordinaten der Referenzstationen wurden als bekannt eingeführt. Alle nicht gelösten Mehrdeutigkeiten der Referenzstationen wurden gegebenenfalls auf die kinematische Station übertragen, so daß für die Referenzstationen keine Mehrdeutigkeiten mehr vorlagen. Das GPS Auswerteprogramm GEONAP erlaubt diese besondere Vorgehensweise, die für die strenge GPS Parametrisierung notwendig ist. In mehreren iterativen GPS Auswertungen wurden alle zuverlässig bestimmbaren Mehrdeutigkeiten festgesetzt. Vor der abschließenden Koordinatenberechnung wurde die Information über nicht gelöste Mehrdeutigkeiten zusammen mit Elevation und Azimut der verwendeten Satelliten für jede Epoche zur Weiterverarbeitung in der Bündelblockausgleichung mit strenger GPS Parametrisierung gesichert. Danach wurden die verbleibenden Mehrdeutigkeiten auf den nächsten ganzzahligen Wert festgesetzt und eine GPS Koordinatenberechnung für die kinematische Station durchgeführt. Ein Datumsübergang auf das Landessystem und eine Koordinatentransformation in Gauß-Krüger Koordinaten schloß sich an.

Während der Befliegung wurden die Auslösezeitpunkte der Kamera durch den GPS Empfänger an Bord präzise bestimmt. Eine Interpolation liefert die GPS Antennenpositionen zu den Aufnahmezeitpunkten. Für die Verarbeitung in der Bündelblockausgleichung wurden die interpolierten GPS Koordinaten, die  $QA^T$ -Matrix und die zu verbessernden Mehrdeutigkeiten für jedes Bild aus den vorhandenen Daten zusammengestellt.

Die GPS Koordinatenlösung für die Modellierung der GPS Koordinatenfehler mit datums- und zeitabhängigen Parametern ist nicht um Satellitenkonstellationsänderungen bereinigt. Ein Gewinn ist im allgemeinen in der GPS gestützten Blockausgleichung zu erwarten, wenn nur durchgängig beobachtete Satelliten pro Streifen oder pro Block bei der GPS Positionsbestimmung berücksichtigt werden. In der Praxis wird dies wegen des zusätzlichen Aufwandes wenig angewendet, so daß auch in dieser Untersuchung darauf verzichtet wurde. Zudem sind hierdurch die verwendeten GPS Koordinaten im strengen GPS Ansatz und in den Shift- und Drift-Ansätzen identisch.

Um eine gegenseitige Beeinflussung der zusätzlichen photogrammetrischen Parameter und der GPS abhängigen Parameter zu reduzieren, werden die photogrammetrischen Parameter im Falle der strengen GPS Parametrisierung durch eine Vorausgleichung mit Selbstkalibrierung bestimmt. Die GPS Koordinaten der Aufnahmezentren werden dabei zur Stützung der Blockausgleichung ohne datumsabhängige zusätzliche Parameter eingeführt. Bei den Shift- und Drift-Ansätzen wird grundsätzlich mit einer Selbstkalibrierung sämtlicher zusätzlicher Parameter, also auch der datums- und GPS- abhängigen Parameter in einem Auswertelauf gearbeitet. Die einzelnen Parameter werden in der Selbstkalibrierung statistisch geprüft und gegebenenfalls nicht in der abschließenden Ausgleichung berücksichtigt.

Für die strenge GPS Parametrisierung werden die datumsabhängigen zusätzlichen Parameter immer blockinvariant eingeführt. Mehrere Mehrdeutigkeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern werden automatisch zu einer Mehrdeutigkeit zusammengefaßt, da wegen fehlender Redundanz eine getrennte Bestimmung der Mehrdeutigkeiten grundsätzlich nicht möglich ist. Tabelle 7.2 zeigt die im folgenden verwendeten, unterschiedlichen Auswertemodelle, die

im wesentlichen durch die Wahl der zusätzlichen Parameter (Tab. 7.1) in dem Bündelblockausgleichungsprogramm BLUH gesteuert werden.

Auswertemodell	Abkürzung	Bemerkung
konventionelle Blockausgleichung	p b	blockinvariante photogrammetrische Parameter
strenge GPS Parametrisierung	p d g b	blockinvariante datums- und GPS Parameter
Shift- und Drift-Ansatz	p d b / p d s	block- oder streifeninvariante Verschiebung (Shift)
	p d t b / p d t s	block- oder streifeninvariante Verschiebung mit linearer GPS Modellierung (Drift)
	p d t t s	streifeninvariante Verschiebung mit quadratischer GPS Modellierung (Drift)

Tab. 7.2: Verwendete Auswertemodelle in der Bündelblockausgleichung BLUH (Abkürzungen siehe Tab. 7.1)

Die erreichte Genauigkeit der Blockausgleichung wird durch signalisierte Paßpunkte kontrolliert, die nicht in die Blockausgleichung eingeführt werden. Als Kenngrößen werden das quadratische Mittel der Abweichungen an  $n_{pp}$  unabhängigen Vergleichspunkten in Lage (SX, SY) und Höhe (SZ),

$$SX = \sqrt{(X_i - X_{pp_i}) / n_{pp}}, \quad SY = \sqrt{(Y_i - Y_{pp_i}) / n_{pp}}, \quad SZ = \sqrt{(Z_i - Z_{pp_i}) / n_{pp}}, \quad (7.1)$$

sowie die Standardabweichung der Gewichtseinheit ( $s_0$ ) der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung angegeben.  $X_{pp}$  sind die bekannten Koordinaten des Vergleichspunktes  $i$ , und  $X$  die für diesen Punkt bestimmten Koordinaten aus der Blockausgleichung. Es werden allgemein Genauigkeiten der Objektpunkte von wenigen Zentimetern erreicht. Somit sind Streuungen der quadratischen Mittel innerhalb dieser Größenordnung in den Experimenten zu erwarten und plausibel.

Insgesamt werden drei GPS gestützte Befliegungen, die Blöcke Warberg, Groß Ösingen und Vechtel für die Untersuchungen genutzt. Die Anzahl der unabhängigen Vergleichspunkte ist in Tabelle 7.3 nachgewiesen.

Datensatz	$X_{pp}$	$Y_{pp}$	$Z_{pp}$
Warberg	17	17	20
Groß Ösingen	33	33	42
Vechtel	86	86	88

Tab. 7.3: Anzahl  $n_{pp}$  der unabhängigen Vergleichspunkte für die einzelnen Koordinatenkomponenten der verwendeten Datensätze

Weitere Eckdaten sind in Tabelle 7.4 zusammengestellt, wobei auf die fortschreitende Reduktion der tatsächlich Paßpunktanzahl hinzuweisen ist. Eine vollständige Übersicht findet sich im Anhang (Kapitel 11).

Datensatz	Jahr	Bilder	Bildmaßstab	$n_{pp}/km^2$
Warberg	1995	109	1:9000	0.2
Groß Ösingen	1994	140	1:8000	0.5
Vechtel	1993	413	1:7900	0.6

Tab. 7.4: Eckdaten der verwendeten Datensätze

Für alle verwendeten Datensätze ist der eingestellte Abtriftwinkel der Kamera während der einzelnen Streifen unbekannt und kann vor allem die strenge GPS Parametrisierung empfindlich stören. Der Datensatz Warberg besitzt kleine GPS Antennenexzentrizitäten in der Lage von wenig Zentimetern, wodurch Fehler in der Exzentrizität, aber auch Einflüsse durch mögliche Abtriftwinkel, gering und unkritisch sind. Für den Datensatz Groß Ösingen mußte die Exzentrizität in einer Blockausgleichung vorab bestimmt werden, da keine zuverlässigen Angaben vorlagen. Bei der Befliegung Vechtel war die GPS Antenne um ca. 2 m exzentrisch montiert. Damit ergeben sich bereits für kleine Abtriftwinkel zusätzliche, nicht explizit bestimmbare systematische Fehler im Bereich von mehreren Dezimetern in den GPS Koordinaten. Weitere Angaben zu den Datensätzen, die Blockkonfigurationen und Übersichten zu den GPS Daten finden sich im Anhang (Kapitel 11).

Die Bildkoordinaten der verwendeten Datensätze waren bereits um Abbildungsfehler korrigiert, so daß die Bündelblockausgleichung in den durchgeführten Untersuchungen mit Gauß-Krüger Koordinaten und orthometrischen Höhen ohne Berücksichtigung eines Geoids durchgeführt wurden.

## **7.1 Erprobung der Modelle mit simulierten systematischen GPS Fehlern**

### **7.1.1 Blockausgleichung Datensatz Warberg**

Beim Datensatz Warberg (siehe Anhang, Kapitel 11) wurden auf zwei Referenzstationen und im Bildflugzeug geodätische GPS Empfänger betrieben. Die Zweifrequenz-GPS-Daten aller drei Stationen lassen eine vollständige Mehrdeutigkeitsbestimmung zu. Damit sind der Flugweg und die Antennenpositionen über den gesamten Block zuverlässig bekannt. Transformationsparameter für den Übergang vom WGS84 in das Landessystem wurden über drei benachbarte Punkte des DREF (Lindstrot u.a.1992) bestimmt. Eine Transformation der GPS Koordinaten wird daher nur kleine Restfehler beinhalten, die durch Translationen aufgefangen werden können (datumsabhängige zusätzliche Parameter). Für die Interpolation der GPS Koordinaten auf die Auslösezeitpunkte wurde ein Spline mit fünf Stützpunkten verwendet. Die Interpolation hat die Mehrdeutigkeitsereignisse berücksichtigt und gegebenenfalls einseitig an die Auslösezeitpunkte interpoliert bzw. extrapoliert (siehe Kapitel 3). Dadurch wurde eine Interpolation über Unstetigkeitsstellen hinweg vermieden. In die GPS/Block-Ausgleichung wurden vier Voll- und zwei Höhenpaßpunkte, verteilt an den Blockecken, sowie die GPS Koordinaten eingeführt.

Der Block Warberg erlaubt insbesondere die Untersuchung des Einflusses von streifen- oder blockinvarianten Ansätzen der GPS abhängigen Parameter in der Blockausgleichung. Zudem ist durch die zuverlässige Mehrdeutigkeitslösung eine Simulation von fehlerhaft festgesetzten

Mehrdeutigkeiten sowie Mehrdeutigkeiten aufgrund von Signalunterbrechungen möglich. Dabei kann die in Kapitel 6 eingeführte strenge GPS Parametrisierung und der Shift- und Drift-Ansatz untersucht werden.

Da die Mehrdeutigkeitslösung der GPS Auswertung zuverlässig möglich war, wird bei der strengen Parametrisierung nur eine mögliche Translation, verursacht durch den Datumsübergang, geschätzt. Dadurch entspricht die strenge GPS Parametrisierung in diesem Fall grundsätzlich dem blockinvarianten Shift- und Drift-Ansatz. Differenzen an den unabhängigen Vergleichspunkten sind teilweise auf Unterschiede in den Näherungswerten der Blockausgleichungen zurückzuführen. Die Ergebnisse bei 60% Querüberdeckung sind in Tab. 7.5 zusammengestellt.

ZP	SX	SY	SZ	s <sub>0</sub>
	[m]	[m]	[m]	[μm]
p d g b	±0.052	±0.046	±0.124	8.77
p d b	±0.049	±0.071	±0.121	8.86
p d t b	±0.073	±0.047	±0.151	8.79
p d s	±0.048	±0.039	±0.138	8.75
p d t s	±0.062	±0.054	±0.157	8.76
p d t t s	±0.085	±0.093	±0.283	11.50

Tab. 7.5: Blockausgleichung Warberg mit 60% Querüberdeckung

Die Modellierung der systematischen GPS Fehler durch konstante datumsabhängige und zeitabhängige Verbesserungen ergeben vergleichbare Genauigkeiten wie die strenge GPS Modellierung. Eine streifen- oder blockinvariante Vorgehensweise verändert die Ergebnisse an den unabhängigen Vergleichspunkten nicht signifikant. Zeitabhängige Verbesserungen (t, tt) führen zu einer Verschlechterung der Ausgleichungsergebnisse, obwohl die zeitabhängigen Terme durch die Selbstkalibrierung teilweise oder vollständig reduziert werden. Die erhöhte Anzahl von Unbekannten schwächt jedoch die Ausgleichung und führt trotz Selbstkalibrierung nicht zu identischen Ergebnissen. Insbesondere quadratische, zeitabhängige Drift Parameter ergeben im Vergleich zu den anderen Shift- und Drift-Ansätzen mit 28 cm schlechte Ergebnisse in der Höhenkomponente. Die Ursache ist in der erhöhten Anzahl der Unbekannten zu sehen, die die Ausgleichung schwächen.

Aus der graphischen Darstellung 7.1 wird deutlich, daß der Bildflug Warberg nicht durch systematische GPS Koordinatenfehler beeinflusst ist, da die Shift- und Drift-Ansätze mit blockinvarianten Parametern keine Verschlechterung ergeben. Zeitabhängige systematische GPS Fehler machen die Verwendung von Shift- und Drift-Parametern für den gesamten Block gewöhnlich unmöglich. Die korrekte Mehrdeutigkeitslösung der GPS Auswertung wird hierdurch bestätigt.

Das Streichen jedes zweiten Bildstreifens bei einer Querüberdeckung von 60% ergibt eine Querüberdeckung von 20% für die verbleibenden Streifen. Somit kann zusätzlich die Verringerung der benötigten Bildstreifen für die unterschiedlichen Ansätze untersucht werden. Es ist bekannt, daß die Shift- und Drift-Ansätze eine 60% Querüberdeckung benötigen oder

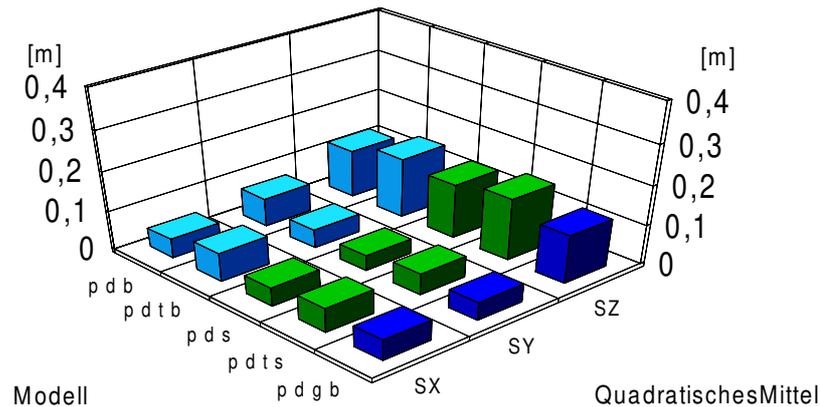


Abb. 7.1: Koordinatendifferenzen an unabhängigen Vergleichspunkten der Blockausgleichung Warberg mit 60% Querüberdeckung

durch zusätzliche Querbefliegung bzw. Paßpunktreihen an den Blockenden zusätzlich gestützt werden müssen (Ackermann, Schade 1993, Burman, Torlegard 1994).

Tabelle 7.6 zeigt, daß die strenge Parametrisierung bei 20%iger Querüberdeckung in der Höhenkomponente das gleiche Genauigkeitsniveau wie bei 60% Querüberdeckung erreicht (vergl. Tab. 7.5). Die Genauigkeit der Lagekomponenten hat sich nur geringfügig verringert. Eine Verschlechterung ist bei den Shift- und Drift-Ansätzen in den Lagekomponenten sichtbar. Die Höhenkomponente ist für den blockinvarianten Ansatz vergleichbar mit den Resultaten der 60%igen Überdeckung.

ZP	SX	SY	SZ	$s_0$
	[m]	[m]	[m]	[ $\mu\text{m}$ ]
p d g b	$\pm 0.070$	$\pm 0.066$	$\pm 0.114$	9.27
p d b	$\pm 0.057$	$\pm 0.096$	$\pm 0.170$	8.87
p d t b	$\pm 0.054$	$\pm 0.082$	$\pm 0.159$	8.86
p d s	$\pm 0.066$	$\pm 0.173$	$\pm 0.385$	10.01
p d t s	$\pm 0.077$	$\pm 0.355$	$\pm 0.371$	12.02
p d t t s	$\pm 0.156$	$\pm 0.336$	$\pm 0.355$	13.39

Tab. 7.6: Blockausgleichung Warberg mit strenger GPS Parametrisierung und Shift- und Drift-Ansätzen mit 20% Querüberdeckung

Ein Vergleich der strengen GPS Parametrisierung und der Shift- und Drift-Ansätze bei 20% Querüberdeckung zeigt erhebliche Unterschiede in der Höhenkomponente bei streifenweisem Ansatz der Korrekturterme auf (Abb. 7.2). Dies ist in der schlechteren geometrischen Verknüpfung der Streifen begründet. Die GPS Koordinaten sind durch die streifenweisen Parameter nicht mehr in einem einheitlichen Bezugssystem gegeben, sondern bereits durch unterschiedliche datumsabhängige Translationen vollständig unabhängig voneinander. Eine blockinvariante Vorgehensweise führt insgesamt zu besseren Ergebnissen, da die fehlende photogrammetrische Verknüpfung durch die GPS Koordinaten ersetzt wird.

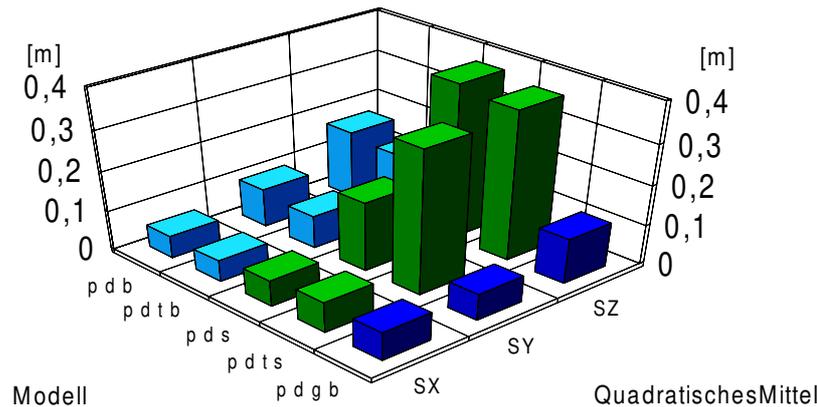


Abb. 7.2: Koordinatendifferenzen an unabhängigen Vergleichspunkten der Blockausgleichung Warberg mit 20% Querüberdeckung

Dies ist nur mit den über den gesamten Block konsistenten GPS Koordinaten möglich. Die Differenzen zwischen optimalem Shift- und Drift-Ansatz und strenger GPS Parametrisierung sind bei einer Verringerung der Querüberdeckung nicht signifikant.

Aufgrund der vollständigen und zuverlässigen Lösung aller Mehrdeutigkeiten eignet sich der Datensatz Warberg insbesondere für die Simulation von unterschiedlichen Störungen der GPS Koordinatenschätzung durch fehlerhaft festgesetzte Anfangsmehrdeutigkeiten oder fehlerhaft festgesetzte Mehrdeutigkeiten nach einer Signalunterbrechung während des Fluges. Zwei verfälschte Datensätze wurden für diese Untersuchung erzeugt. Im ersten Datensatz wurden vier Anfangsmehrdeutigkeiten, im zweiten vier Signalunterbrechungen zu vier unterschiedlichen Satelliten und Zeitpunkten auf beiden Frequenzen mit bis zu drei Zyklen fehlerhaft festgesetzt. Jeweils zwei Signalunterbrechungen wurden unverfälscht, aber als unzuverlässig bestimmt, eingeführt. Die Abbildungen 7.3 und 7.4 zeigen die künstlich erzeugten systematischen GPS Koordinatenfehler für die einzelnen Projektionszentren. Im wesentlichen können Unstetigkeiten bis zu einem halben Meter festgestellt werden. Das Verhalten innerhalb der einzelnen Flugstreifen ist bedingt durch den Maßstab nicht im Detail zu erkennen. Die Größe der Koordinatendifferenzen zwischen Referenzlösung und verfälschter Lösung nimmt erwartungsgemäß zum Ende des Blockes (hohe Bildnummern) zu.

In beiden Datensätzen wurden Mehrdeutigkeiten zu den selben Satelliten, jedoch zu unterschiedlichen Zeitpunkten verfälscht. Die entstehenden systematischen Koordinatenfehler zeigen daher zum Teil identische Verläufe. Wesentlich ist aber, daß durch die verfälschten Mehrdeutigkeiten aufgrund von Signalunterbrechungen zusätzliche, nicht durch Satellitenkonstellationsänderungen verursachte Unstetigkeiten auftreten.

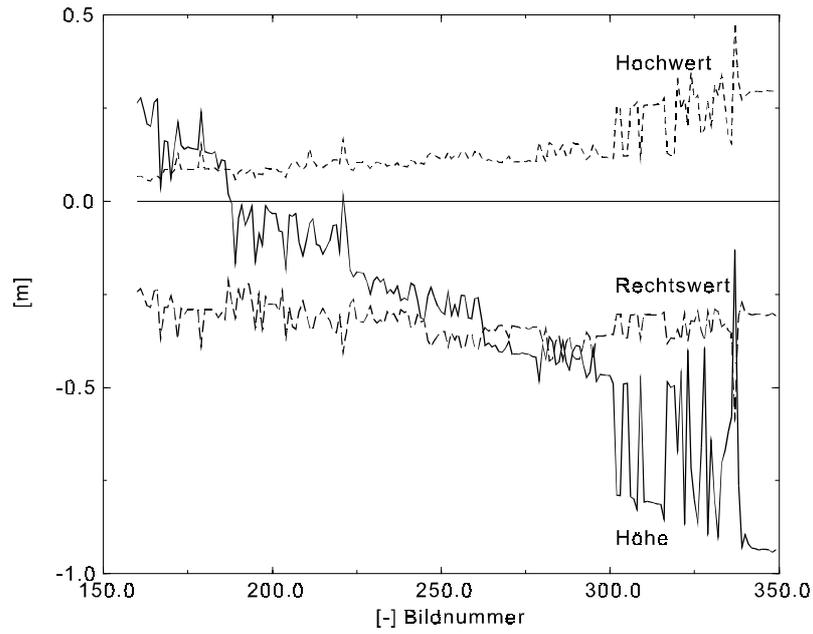


Abb. 7.3: GPS Koordinatendifferenz bei fehlerhaft festgesetzten Anfangsmehrdeutigkeiten, Block Warberg

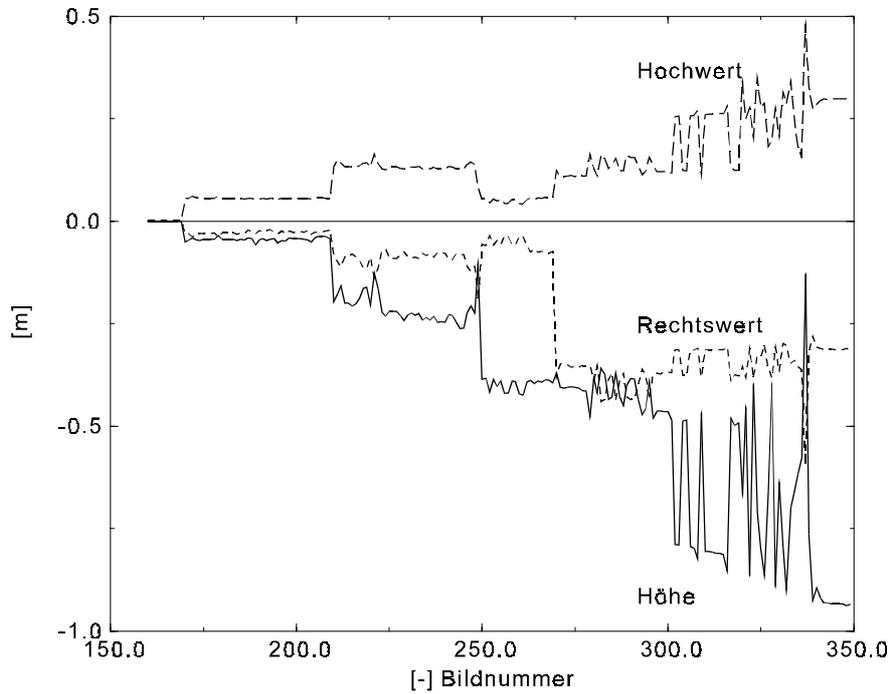


Abb. 7.4: GPS Koordinatendifferenz bei fehlerhaft festgesetzten Mehrdeutigkeiten nach Signalunterbrechungen, Block Warberg

### 7.1.1.1 Untersuchung mit verfälschten Daten und 60% Querüberdeckung

Im Falle der strengen GPS Parametrisierung ist die Verteilung der unzuverlässig bestimmten Mehrdeutigkeiten innerhalb des Blockes und der Streifen von Interesse. In Abbildung 7.5 und 7.6 ist die Situation für die fehlerhaft festgesetzten Anfangsmehrdeutigkeiten bzw. für die fehlerhaft festgesetzten Signalunterbrechungen gezeigt. Die einzelnen Streifen des Blockes bei 60% Querüberdeckung sind durch Rechtecke dargestellt und der Beginn und die Gültigkeit einer in der Blockausgleichung zu schätzenden Streckenkorrektur  $\bar{N}$  in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt.

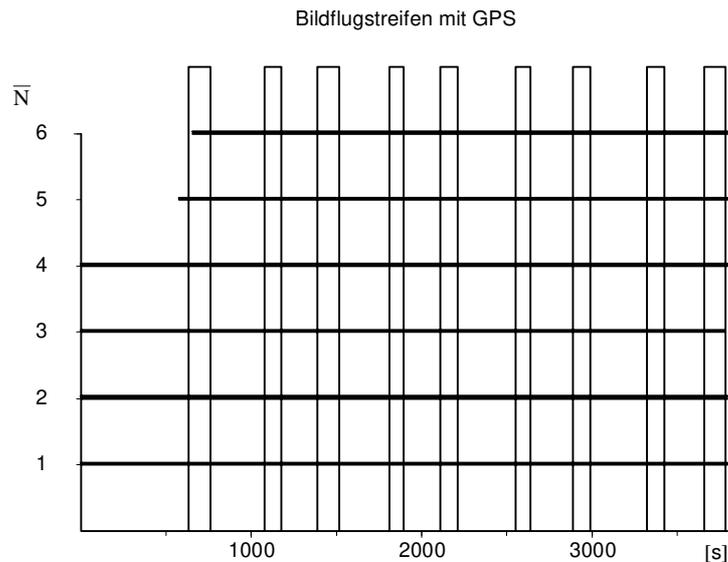


Abb. 7.5: Bildstreifen sowie Anzahl und Gültigkeit der Streckenkorrekturen  $\bar{N}$  bei fehlerhaft festgesetzten Anfangsmehrdeutigkeiten, Block Warberg

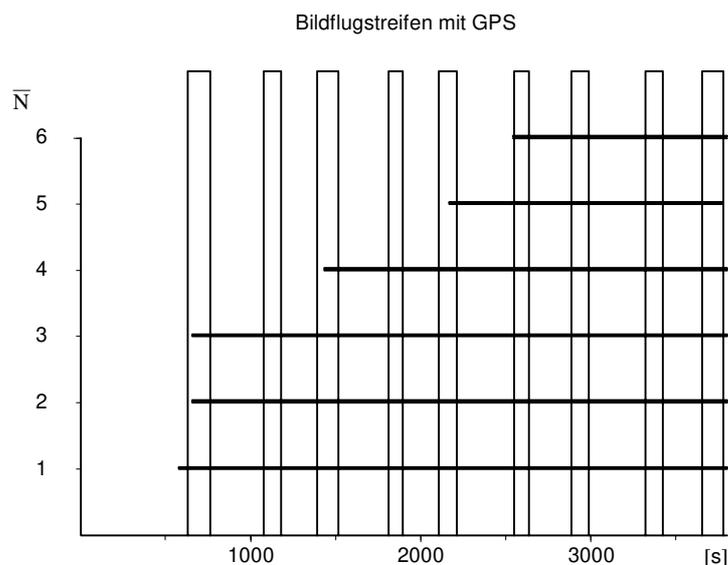


Abb. 7.6: Bildstreifen sowie Anzahl und Gültigkeit der Streckenkorrekturen  $\bar{N}$  bei fehlerhaft festgesetzten Mehrdeutigkeiten nach Signalunterbrechungen, Block Warberg

Insgesamt sind bei dem ca. einstündigen Bildflug jeweils sechs Streckenkorrekturen in der Blockausgleichung zu schätzen. Der Einfluß der fehlerhaft festgesetzten Anfangsmehrdeutigkeiten fällt mit Beginn des GPS Datensatzes zusammen, während Signalunterbrechungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten und vor allem innerhalb von Bildflugstreifen auftreten. Signalunterbrechungen innerhalb eines Streifens sind insbesondere für die Interpolation in den Shift- und Drift-Ansätzen problematisch. Bei einer Querüberdeckung von 20% entfällt jeder zweite Streifen, wobei die zeitliche Gültigkeit der Streckenkorrekturen dabei unverändert erhalten bleibt.

Die nachfolgenden Tabellen und Abbildungen 7.7 bis 7.8 zeigen die Resultate der Bündelblockausgleichung mit BLUH und 60% Querüberdeckung. Die strenge Parametrisierung kann die eingeführten fehlerhaften Mehrdeutigkeiten vollständig kompensieren und erreicht vergleichbare Ergebnisse zu dem ungestörten Datensatz (Tab. 7.5). Die Anfangsmehrdeutigkeiten beeinflussen den gesamten Block und ergeben bei blockinvariantem Ansatz der Shift- bzw. Drift-Parameter eine Verschlechterung der Ergebnisse im Vergleich zur streifeninvarianten Vorgehensweise. Dies entspricht den Erfahrungen und der Anwendungsweise der Shift- und Drift-Ansätze in der Praxis. Teilweise wird bereits eine streifenweise GPS Auswertung durchgeführt, so daß durch die GPS Auswertung die einzelnen Streifen unabhängig voneinander behandelt werden.

Gegenüber der Referenzausgleichung (Tab. 7.5) ergeben sich auch für fehlerhafte Mehrdeutigkeiten aufgrund von Signalunterbrechungen keine signifikanten Änderungen in den Ergebnissen der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung für die strenge Parametrisierung oder den streifenweisen Shift- und Drift-Ansätzen.

Die strenge Parametrisierung und der Shift- und Drift-Ansatz erreichen somit grundsätzlich gleiche Genauigkeiten, jedoch sind die GPS abhängigen Verbesserungen im Shift- und Drift-Ansatz streifenweise anzusetzen. Die künstlich eingeführten Mehrdeutigkeiten erlauben es nicht mehr, den Block über blockinvariante Parameter zu lösen. Es ergeben sich für blockinvariante Shift- und Drift-Parameter in der Höhe signifikante Änderungen. Die Lage ist durch die große geometrische Stabilität der photogrammetrischen Daten bei 60% Querüberdeckung nur gering beeinflußt.

ZP	SX	SY	SZ	s <sub>0</sub>
	[m]	[m]	[m]	[µm]
p d g b	±0.046	±0.042	±0.112	9.22
p d b	±0.061	±0.127	±0.279	9.93
p d t b	±0.065	±0.132	±0.282	9.92
p d s	±0.046	±0.046	±0.114	9.90
p d t s	±0.065	±0.045	±0.127	9.74
p d t t s	±0.070	±0.093	±0.330	11.61

Tab. 7.7: Blockausgleichung Warberg mit strenger GPS Parametrisierung und Shift- und Drift-Ansätzen: fehlerhaft festgesetzte Anfangsmehrdeutigkeiten bei 60% Querüberdeckung

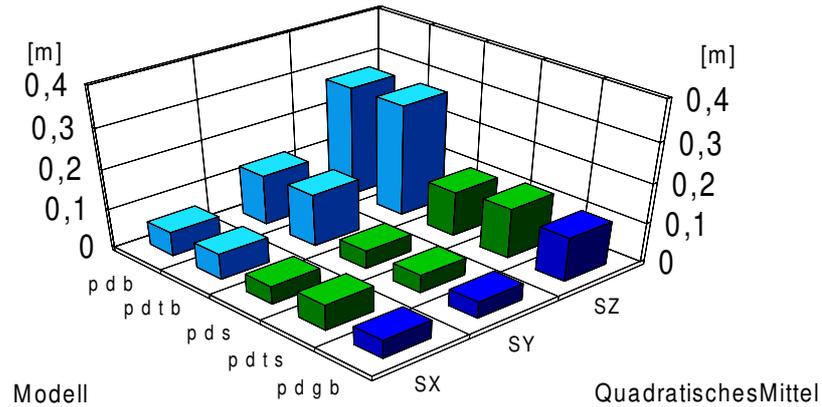


Abb. 7.7: Fehlerhafte Anfangsmehrdeutigkeiten: Koordinatendifferenzen an unabhängigen Vergleichspunkten der Blockausgleichung Warberg mit 60% Querüberdeckung

ZP	SX	SY	SZ	$s_0$
	[m]	[m]	[m]	[ $\mu\text{m}$ ]
p d g b	$\pm 0.070$	$\pm 0.066$	$\pm 0.114$	9.27
p d b	$\pm 0.050$	$\pm 0.081$	$\pm 0.248$	9.89
p d t b	$\pm 0.073$	$\pm 0.104$	$\pm 0.249$	9.91
p d s	$\pm 0.043$	$\pm 0.050$	$\pm 0.139$	9.55
p d t s	$\pm 0.051$	$\pm 0.047$	$\pm 0.156$	9.40
p d t t s	$\pm 0.079$	$\pm 0.089$	$\pm 0.310$	12.34

Tab. 7.8: Blockausgleichung Warberg mit strenger GPS Parametrisierung und Shift- und Drift-Ansätzen: fehlerhafte Mehrdeutigkeiten nach Signalunterbrechungen bei 60% Querüberdeckung

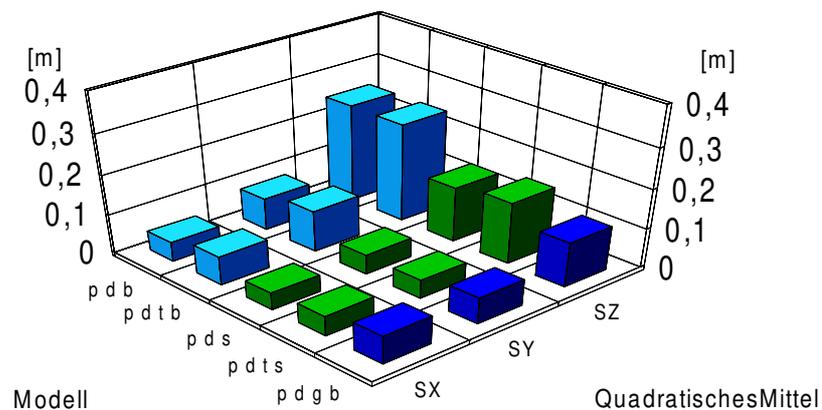


Abb. 7.8: Fehlerhafte Mehrdeutigkeiten nach Signalunterbrechungen: Koordinatendifferenzen an unabhängigen Vergleichspunkten der Blockausgleichung Warberg mit 60% Querüberdeckung

### 7.1.1.2 Untersuchung mit verfälschten Daten und 20% Querüberdeckung

Es wurden für die Simulation mit 20% Querüberdeckung die gleichen Störungen und die daraus resultierenden GPS Koordinaten wie bei 60% Überdeckung verwendet. Die Ergebnisse aus der vorangegangenen Untersuchung mit unverfälschten GPS Daten (Kapitel 7.1.1) wird mit fehlerhaften Anfangsmehrdeutigkeiten (Tab. und Abb. 7.9) und fehlerhaften Signalunterbrechungen (Tab. und Abb. 7.10) bestätigt. Es ergeben sich ebenfalls mittlere quadratische Differenzen der Höhenkomponente an den unabhängigen Vergleichspunkten von mehr als 3 dm für die streifeninvarianten Shift- und Drift-Parameter. Der blockinvariante Ansatz der Parameter erzielt bessere und zur 60% Überdeckung vergleichbare Ergebnisse, erreicht aber nicht das Niveau der strengen GPS Parametrisierung. Die Ergebnisse der strengen GPS Parametrisierung sind im wesentlichen unabhängig von der Querüberdeckung, wobei die geringe Verschlechterung in der Verringerung der photogrammetrischen Daten begründet ist.

ZP	SX	SY	SZ	$s_0$
	[m]	[m]	[m]	[ $\mu\text{m}$ ]
p d g b	$\pm 0.064$	$\pm 0.084$	$\pm 0.151$	9.12
p d b	$\pm 0.099$	$\pm 0.071$	$\pm 0.257$	10.74
p d t b	$\pm 0.096$	$\pm 0.071$	$\pm 0.261$	10.63
p d s	$\pm 0.073$	$\pm 0.115$	$\pm 0.303$	12.28
p d t s	$\pm 0.084$	$\pm 0.204$	$\pm 0.367$	13.40
p d t t s	$\pm 0.204$	$\pm 0.245$	$\pm 0.619$	13.40

Tab. 7.9: Blockausgleichung Warberg mit strenger GPS Parametrisierung und Shift- und Drift-Ansätzen: fehlerhaft festgesetzte Anfangsmehrdeutigkeiten bei 20% Querüberdeckung

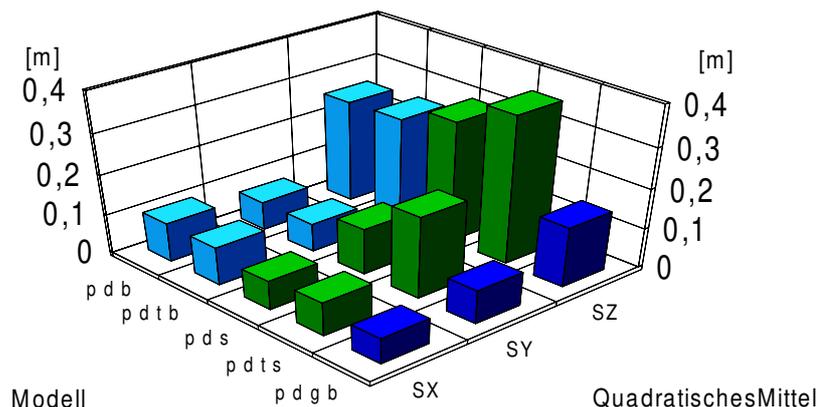


Abb. 7.9: Fehlerhafte Anfangsmehrdeutigkeiten: Koordinatendifferenzen an unabhängigen Vergleichspunkten der Blockausgleichung Warberg mit 20% Querüberdeckung

ZP	SX	SY	SZ	$s_0$
	[m]	[m]	[m]	[ $\mu\text{m}$ ]
p d g b	$\pm 0.072$	$\pm 0.105$	$\pm 0.153$	9.46
p d b	$\pm 0.109$	$\pm 0.083$	$\pm 0.232$	10.97
p d t b	$\pm 0.116$	$\pm 0.079$	$\pm 0.253$	10.31
p d s	$\pm 0.083$	$\pm 0.185$	$\pm 0.365$	11.23
p d t s	$\pm 0.101$	$\pm 0.118$	$\pm 0.333$	10.13
p d t t s	$\pm 0.244$	$\pm 0.386$	$\pm 0.541$	15.26

Tab. 7.10: Blockausgleichung Warberg mit strenger GPS Parametrisierung und Shift- und Drift-Ansätzen: fehlerhafte Mehrdeutigkeiten nach Signalunterbrechungen bei 20% Querüberdeckung

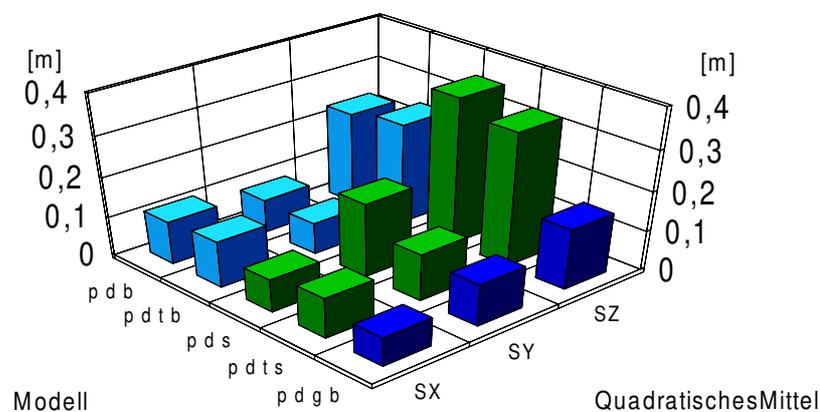


Abb. 7.10: Fehlerhafte Mehrdeutigkeiten nach Signalunterbrechungen: Koordinatendifferenzen an unabhängigen Vergleichspunkten der Blockausgleichung Warberg mit 20% Querüberdeckung

Aus den Ergebnissen mit simulierten systematischen GPS Fehlern zeigt sich kein grundsätzlicher Unterschied zwischen einem optimal angesetzten Shift- und Drift-Ansatz und der strengen GPS Parametrisierung bei einer 60%igen Querüberdeckung. Fehlt jedoch die photogrammetrische Stützung des Blockes bei einer 20% Querüberdeckung, können die Shift- und Drift-Parameter aufgrund der systematischen GPS Fehler nicht blockinvariant verwendet werden. Streifeninvariante Parameter verursachen jedoch den Verlust der Nachbarschaftsgenauigkeit der GPS Koordinaten. Es ergeben sich deutliche Abfälle in der Genauigkeit der Höhenkomponente.

## 7.2 Erprobung der Modelle mit realen Daten

Die Auswertung der unverfälschten und somit operationellen Blockausgleichung des Datensatzes Warberg hat bereits erste Unterschiede zwischen der Wirkungsweise der strengen GPS Parametrisierung und den Shift- und Drift-Ansätzen aufgezeigt. Die GPS Daten ließen die zuverlässige Bestimmung aller Mehrdeutigkeiten zu und ergaben Vorteile bei der blockinvarianten Ausgleichung bei 20% Querüberdeckung. Im folgenden werden die Untersuchungen

mit Datensätzen fortgeführt, die ungelöste und anhand der GPS Daten nicht zuverlässig festsetzbare Mehrdeutigkeiten enthalten.

### 7.2.1 Blockausgleichung Datensatz Groß Ösingen

Der Datensatz Groß Ösingen (siehe Anhang, Kapitel 11) wurde mit der strengen GPS Parametrisierung und der Modellierung durch konstante und lineare systematische Fehler ausgewertet. Die GPS Daten erlaubten nur eine Einfrequenz-Auswertung. Die Exzentrizität der GPS Antenne war nicht eindeutig bekannt, so daß in einer vorab durchgeführten photogrammetrischen Auswertung zusätzliche Parameter zur Bestimmung der Exzentrizitäten verwendet wurden. Die Lageexzentrizität wird aus der mittleren Abweichung der GPS Koordinaten von den photogrammetrisch bestimmten Projektionszentren bestimmt und hat für unterschiedliche Flugrichtungen umgekehrtes Vorzeichen. Die Höhenexzentrizität kann nicht bestimmt werden. Die Bestimmung aus einer vorab durchgeführten Blockausgleichung kann nicht die Genauigkeiten einer konventionellen Vermessung oder terrestrischen photogrammetrischen Bestimmung erreichen. Durch diese Notwendigkeit entsteht ein zusätzlicher, nicht eindeutig abschätzbarer Einfluß auf die Ergebnisse der Untersuchungen. In die GPS/Block-Ausgleichung wurden sechs Voll- und zwei Höhenpaßpunkte an den Blockecken sowie die GPS Koordinaten verwendet.

Die GPS Koordinaten wurden als Gauß-Krüger Koordinaten im Landessystem in die gemeinsame GPS/Block-Ausgleichung eingeführt. Transformationsparameter wurden über drei benachbarte Punkte des DREF (Lindstrot u.a.1992) bestimmt, um den Übergang vom WGS84 in das Landessystem zu ermöglichen. Für die Interpolation der GPS Koordinaten auf die Auslösezeitpunkte wurde eine Ausgleichung mit einem Polynom 3. Grades und fünf benachbarten GPS Positionen durchgeführt.

#### 7.2.1.1 Untersuchung mit 60% Querüberdeckung

Einige Mehrdeutigkeiten konnten in der GPS Auswertung nicht zuverlässig als ganzzahlige Werte bestimmt werden. Diese wurden in der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung mit strenger GPS Parametrisierung bestimmt. Abbildung 7.11 zeigt die Verteilung der zu schät-

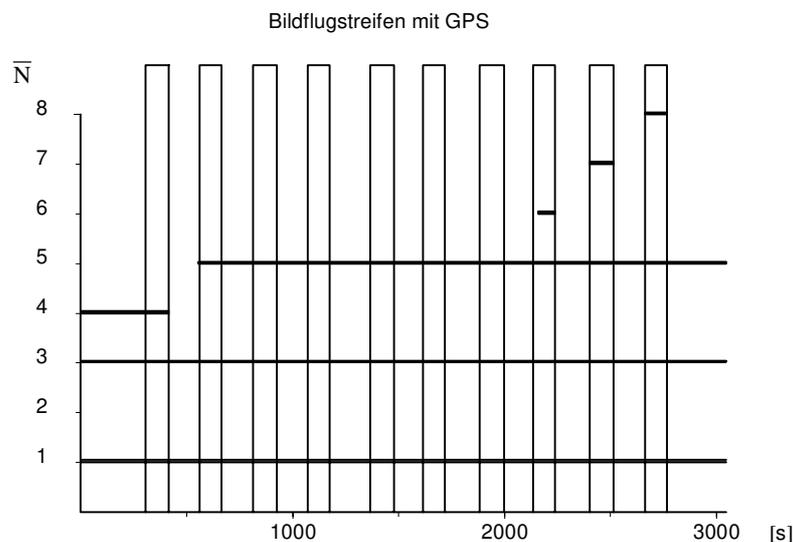


Abb. 7.11: Bildstreifen sowie Anzahl und Gültigkeit der Streckenkorrekturen  $\bar{N}$  beim Block Groß Ösingen

zenden Streckenkorrekturen  $\bar{N}$  über den gesamten Block und den einzelnen Bildflugstreifen bei einer Querüberdeckung von 60%. Die Befliegung des Blockes dauerte ca. 45 Minuten. Mehrere Mehrdeutigkeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bildern werden im Modell für die strenge GPS Parametrisierung durch einen einzelnen Parameter erfaßt, so daß von ursprünglich elf insgesamt sieben Mehrdeutigkeitsterme in der gemeinsamen Ausgleichung geschätzt werden. Dies trifft beispielsweise für die zweite Streckenkorrektur des Datensatzes zu, die in der GPS Auswertung als unzuverlässig gekennzeichnet, aber nicht während eines Befliegungsstreifens auftritt und somit nicht explizit geschätzt wird.

Für eine 60% Querüberdeckung zeigt sich beim Datensatz Groß Ösingen die bekannte Situation aus der Simulation. Die blockinvarianten Shift- und Drift-Ansätze können vorhandene systematische GPS Effekte nicht kompensieren. Es zeigen sich Unsicherheiten in den Lagekomponenten, die die Größenordnung der Höhenkomponente oder mehr aufweisen (Tab. 7.11). Dies ist für eine 60%ige Querüberdeckung und bei guter geometrischer Stabilisierung des Blockes durch die photogrammetrischen Daten ungewöhnlich. Für den blockinvarianten Shift- und Drift-Ansatz ohne zeitabhängigen Parameter ergeben sich Unsicherheiten in den Lagekomponenten, die größer als die Höhenkomponente sind. Dies muß als allgemeiner Modellfehler angesehen werden.

Streifeninvariante Shift- und Drift-Parameter erreichen im Vergleich zum strengen GPS Ansatz sehr gute Ergebnisse in den Lagekomponenten. Die Höhenkomponente der strengen GPS Parametrisierung ist geringfügig besser. Die Differenzen sind jedoch nicht signifikant, wenn man eine Genauigkeit der Objektkoordinaten von 3 cm annimmt. Die Standardabweichung der Bündelblockausgleichung zeigt eine bessere Übereinstimmung des Modells für den Shift Ansatz.

ZP	SX	SY	SZ	$s_0$
	[m]	[m]	[m]	[ $\mu\text{m}$ ]
p d g b	$\pm 0.069$	$\pm 0.067$	$\pm 0.074$	6.38
p d b	$\pm 0.373$	$\pm 0.161$	$\pm 0.179$	7.29
p d t b	$\pm 0.368$	$\pm 0.227$	$\pm 0.219$	7.67
p d s	$\pm 0.046$	$\pm 0.042$	$\pm 0.106$	5.78
p d t s	$\pm 0.041$	$\pm 0.046$	$\pm 0.147$	5.67
p d t t s	$\pm 0.073$	$\pm 0.047$	$\pm 0.161$	5.64

Tab. 7.11: Blockausgleichung Groß Ösingen mit strenger GPS Parametrisierung und Shift- und Drift-Ansätzen: 60% Querüberdeckung

Die graphische Darstellung 7.12 zeigt die grob falschen Ergebnisse der blockinvarianten Shift- und Drift-Ansätze nochmals deutlich. Die strenge GPS Parametrisierung zeigt Vorteile in der Höhenkomponente, wohingegen der Shift Ansatz Vorteile in den Lagekomponenten besitzt. Vergleicht man jedoch einen mittleren Punktfehler, berechnet aus den quadratischen Differenzen der Vergleichspunkte, so ergibt sich für beide Ansätze ein Wert von 12 cm.

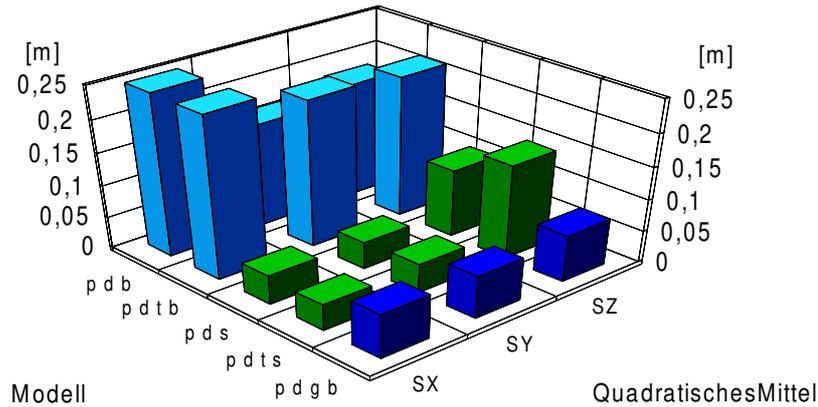


Abb. 7.12: Koordinatendifferenzen an unabhängigen Vergleichspunkten der Blockausgleichung Groß Ösingen mit 60% Querüberdeckung

### 7.2.1.2 Untersuchung mit 20% Querüberdeckung

Insgesamt wurden fünf Mehrdeutigkeitsterme in der strengen GPS Parametrisierung geschätzt. Im Vergleich zu der Simulation hat der strenge Ansatz bei einer reduzierten Querüberdeckung keine Vorteile (vgl. Tab. 7.12). Im Gegenteil, der Shift Ansatz mit streifeninvarianten Parametern erreicht vergleichbare Ergebnisse zur Blockausgleichung mit 60% Querüberdeckung.

Gegenüber der 60%igen Querüberdeckung hat sich die Stützung durch die photogrammetrischen Daten verringert. Der strenge GPS Ansatz sollte keinen Genauigkeitsabfall zeigen, vorausgesetzt, es existieren keine zusätzlichen Fehler in den verwendeten GPS Koordinaten, die durch das strenge Modell nicht erfaßt werden können. Die unsichere Antennenexzentrizität kann eine mögliche Ursache sein. Die strenge Parametrisierung erfordert die genaue Kenntnis der Exzentrizität und ist sensitiv gegenüber Fehlern in der Bestimmung. Es ist auffällig, daß auch die Lagekomponenten stark betroffen sind. Mögliche Fehler der Antennenexzentrizität in der Lage verursachen durch die projektive Kompensation Fehler in den Lagekomponenten der Objektkoordinaten. Die Shift- und Drift-Ansätze sind dagegen sehr robust gegenüber diesen Effekten, da die datumsabhängigen, streifeninvarianten Parameter eine fehlerhafte Antennen-

ZP	SX	SY	SZ	$s_0$
	[m]	[m]	[m]	[ $\mu\text{m}$ ]
p d g b	$\pm 0.112$	$\pm 0.082$	$\pm 0.142$	5.78
p d b	$\pm 0.105$	$\pm 0.209$	$\pm 0.170$	6.19
p d t b	$\pm 0.095$	$\pm 0.200$	$\pm 0.185$	8.09
p d s	$\pm 0.064$	$\pm 0.031$	$\pm 0.090$	5.59
p d t s	$\pm 0.058$	$\pm 0.041$	$\pm 0.106$	5.64
p d t t s	$\pm 0.138$	$\pm 0.096$	$\pm 0.220$	7.26

Tab. 7.12: Blockausgleichung Groß Ösingen mit strenger GPS Parametrisierung und Shift- und Drift-Ansätzen mit 20% Querüberdeckung

exzentrizität in der Lage kompensieren können.

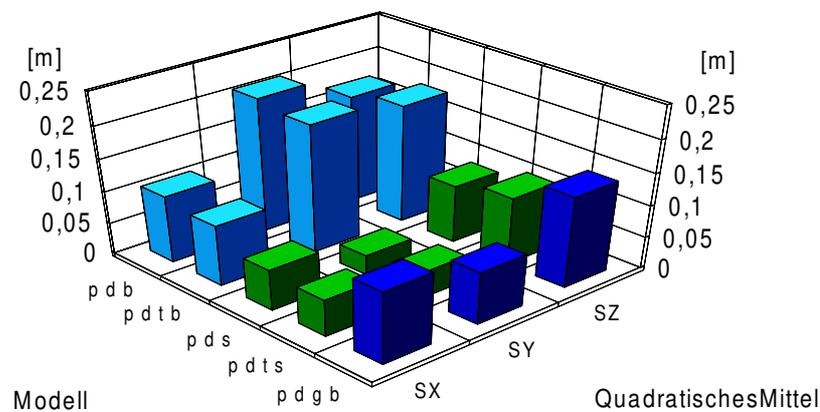


Abb. 7.13: Koordinatendifferenzen an unabhängigen Vergleichspunkten der Blockausgleichung Groß Ösingen mit 20% Querüberdeckung

Abbildung 7.13 zeigt die grundsätzliche Eignung der strengen GPS Parametrisierung und der Shift- und Drift-Ansätze auch bei einer Reduktion der Querüberdeckung. Gegenüber der Simulation ist kein Genauigkeitsabfall der Shift- und Drift-Ansätze durch die fehlende geometrische Stabilität zu erkennen. Die strenge GPS Modellierung erreicht, mit der Einschränkung der unsicheren Antennenexzentrizität, größere Abweichungen an den Vergleichspunkten als ein optimaler Shift Ansatz.

### 7.2.2 Blockausgleichung Datensatz Vechtel

In 1993 wurde ein umfangreicher Bildflug (Vechtel) zur Erprobung der GPS gestützten Blockausgleichung durchgeführt (vgl. Jacobsen 1994b, 1994c, Elsässer 1995, Lee 1996). Für diese Untersuchung wurden aus der Befliegung Vechtel ausschließlich die photogrammetrischen Daten und die GPS Daten der Trimble Empfänger verwendet (siehe Anhang, Kapitel 11). Der Ausbau des GPS war zum Zeitpunkt der Befliegung noch nicht vollständig, so daß Satellitengeometrie und -anzahl zeitweilig nicht sehr gut waren. Zudem wurden die Messungen durch starke ionosphärische Aktivität beeinflusst, die insbesondere die Mehrdeutigkeitsbestimmung verschlechtern und verfälschen kann (Wanninger 1994, Wanninger 1995).

Die GPS Daten der durchgeführten Querbefliegungen (Nord-Süd Streifen an den Blockenden) sind wegen schlechter geometrischer GPS Bedingungen und Datenausfällen sehr ungünstig, so daß für die Blockausgleichung sowohl auf die GPS Koordinaten als auch auf die photogrammetrischen Daten der Querstreifen verzichtet wurde. Der Block wird durch eine 60% Querüberdeckung bereits photogrammetrisch sehr gut gestützt. Die durch ionosphärische Störungen verursachte schlechte  $L_2$  Datenqualität ließ nur eine Einfrequenz GPS Auswertung zu. Als Referenzstation wurde der GPS Empfänger im Befliegungsgebiet verwendet. Die Transformation in das Landessystem erfolgte über drei benachbarte DREF Stationen (Lindstrot u.a.1992). In die GPS/Block-Ausgleichung wurden zwölf Doppelpaßpunkte in den Blockecken sowie die GPS Koordinaten bzw. die zusätzliche Information für die strenge Parametrisierung eingeführt.

### 7.2.2.1 Allgemeine Untersuchung zu den photogrammetrischen und GPS Daten

Die gemeinsame GPS/Block-Ausgleichung mit der strengen GPS Parametrisierung konnte für den Block Vechtel nicht zufriedenstellend durchgeführt werden. Umfangreiche GPS Berechnungen und Blockausgleichungen ergaben, daß die Störungen des strengen Ansatzes teilweise auf die GPS Daten und teilweise auf die photogrammetrischen Daten zurückzuführen sind.

Betrachtet man einen Vergleich der Projektionszentren, bestimmt aus einer Blockausgleichung mit allen verfügbaren Paßpunkten und den GPS Antennen Koordinaten, so zeigen sich in Abbildung 7.14 für die Höhenkomponente Differenzen im Bereich von wenigen Dezimetern bis zu 2.3 m über den gesamten Block. Die Differenzen streuen innerhalb eines Streifens im Dezimeterbereich und haben zu Beginn der Befliegung einen konstanten Versatz von ca. 1 m. In der Blockmitte ergeben sich insbesondere zwischen den Befliegungstreifen Sprünge in den Koordinatendifferenzen, die auf fehlerhaft festgesetzte Mehrdeutigkeiten oder Satellitenkonstellationsänderungen zurückzuführen sind.

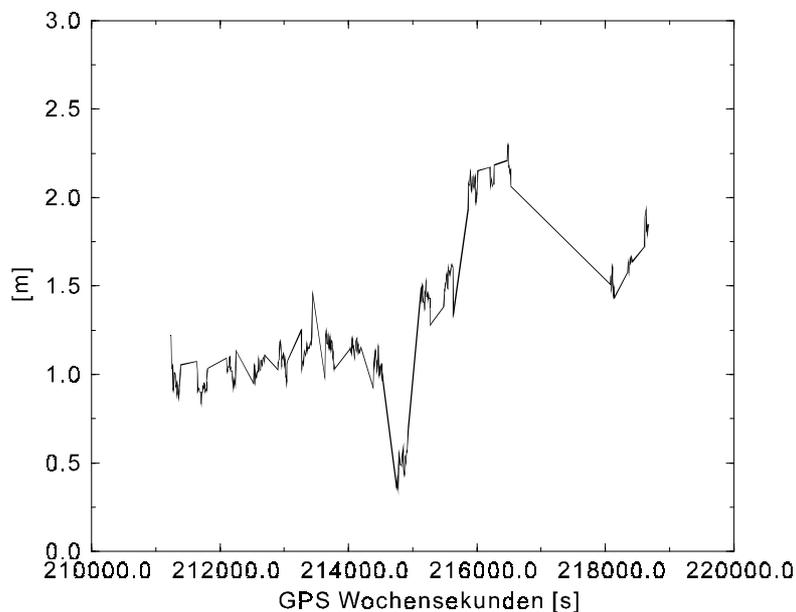


Abb. 7.14: Differenz in der Höhe zwischen den Projektionszentren aus GPS und Blockausgleichung mit allen Paßpunkten

Ein zeitlicher Vergleich zwischen den Satelliten, die für die GPS Koordinatenbestimmung verwendet wurden, und den Koordinatendifferenzen aus Abbildung 7.14 zeigt, daß die erste große Unstetigkeit (ca. 214800 s) mit dem Aufgehen eines Satelliten zusammenfällt, dessen Anfangsmehrdeutigkeit in der GPS Auswertung gelöst werden konnte. Wie bereits angesprochen, sind durch ionosphärische Störungen Fehler in der Festsetzung der Mehrdeutigkeiten insbesondere bei geringen Elevationen möglich. Die Blockausgleichung wurde singulär, wenn eine Schätzung bzw. Überprüfung aller oder zu vieler Mehrdeutigkeiten aus der GPS Auswertung versucht wurde. Dies ist auf die Korrelationen der zusätzlichen Parameter untereinander zurückzuführen. Durch Testberechnungen wurden aufwendig weitere zweifelhaft festgesetzte Mehrdeutigkeiten ermittelt, die abschließend in die gemeinsame GPS/Block-Ausgleichung als unzuverlässig gelöst eingeführt wurden.

Tabelle 7.13 stellt die Ergebnisse der Blockausgleichung mit strenger Parametrisierung und unterschiedlicher Anzahl von geschätzten Mehrdeutigkeitstermen zusammen. Das Einführen sämtlicher Anfangsmehrdeutigkeiten, unabhängig von den Zuverlässigkeitsangaben der GPS Auswertung, ergab eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse gegenüber der alleinigen Schätzung der unzuverlässig festgesetzten Mehrdeutigkeiten. Trotzdem sind die Ergebnisse insbesondere für die Höhenkomponente grob fehlerhaft. Zusätzlichen Einfluß haben die photogrammetrischen Daten wie ein Vergleich der Ergebnisse der Blockausgleichung mit strenger Parametrisierung und 20% Querüberdeckung zeigt (Tab. 7.14). Trotz Verringerung der verwendeten photogrammetrischen und GPS Daten werden bessere Ergebnisse als mit 60% Überdeckung erzielt.

ZP	SX	SY	SZ	$s_0$	Bemerkung
	[m]	[m]	[m]	[ $\mu\text{m}$ ]	
p d g b	$\pm 0.207$	$\pm 0.161$	$\pm 2.541$	18.10	unzuverlässige gelöste N
p d g b	$\pm 0.068$	$\pm 0.091$	$\pm 1.076$	13.98	unzuverlässig gelöste N und erste N zu jedem Satellit
p d g b	$\pm 0.106$	$\pm 0.096$	$\pm 0.575$	15.78	unzuverlässig gelöste N und fehlerhaft bestimmte N

Tab. 7.13: Blockausgleichung Vechtel mit strenger GPS Parametrisierung und Unterschieden in den Mehrdeutigkeitstermen (N),  $q=60\%$

ZP	SX	SY	SZ	$s_0$	Bemerkung
	[m]	[m]	[m]	[ $\mu\text{m}$ ]	
p d g b	$\pm 0.058$	$\pm 0.076$	$\pm 0.754$	6.35	unzuverlässige gelöste N
p d g b	Blockausgleichung singularär				unzuverlässig gelöste N und erste N zu jedem Satellit
p d g b	$\pm 0.059$	$\pm 0.088$	$\pm 0.165$	5.82	unzuverlässig gelöste N und fehlerhaft bestimmte N

Tab. 7.14: Blockausgleichung Vechtel mit strenger GPS Parametrisierung und Unterschieden in den Mehrdeutigkeitstermen (N),  $q=20\%$

Eine graphische Darstellung der Differenzen an den unabhängigen Vergleichspunkten (Abb. 7.15) zeigt systematische Höhenfehler in den südlichen Streifen des nördlichen Teilblockes. Eine Untersuchung der Bildkoordinaten weist auf unterschiedliche Erfassungsprogramme für diese Streifen hin, da abweichend von den anderen Bilddaten keine Rahmenmarkenmessungen vorliegen. Es ist anzunehmen, daß ein systematischer Fehler der inneren Orientierung (Definition des Bildhauptpunktes) für diese Streifen vorhanden ist. Die strenge GPS Parametrisierung kann diese streifeninvarianten systematischen Fehler nicht erfassen, da sämtliche Parameter blockinvariant angesetzt werden. Der streifenweise angesetzte Shift- und Drift-Ansatz kompensiert den systematischen Fehler der inneren Orientierung durch die Shift-

Parameter, während eine konventionelle Aerotriangulation den Einfluß durch Verschiebung der Koordinaten des Projektionszentrums (projektive Kompensation) absorbiert.

Für die nachfolgenden Analysen werden ausschließlich die GPS Daten mit den zusätzlich ermittelten fehlerhaft festgesetzten Mehrdeutigkeiten verwendet.

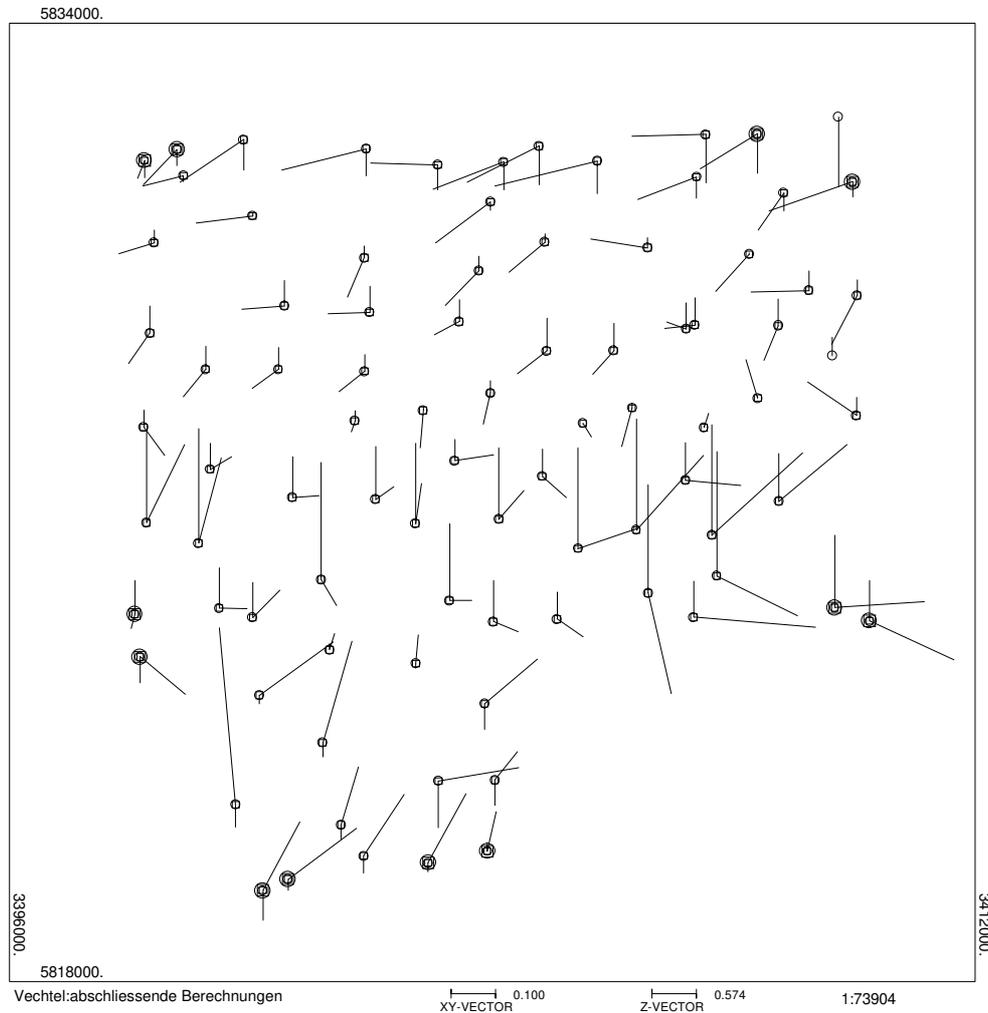


Abb. 7.15: Blockausgleichung Vechtel mit strenger GPS Parametrisierung und 60% Querüberdeckung, Differenzen an unabhängigen Vergleichspunkten

### 7.2.2.2 Untersuchung mit 60% Querüberdeckung

In Abbildung 7.16 werden nochmals die extrem gestörten Bedingungen für eine GPS gestützte Blockausgleichung beim Datensatz Vechtel deutlich. Dargestellt sind die Streckenkorrekturen, die bei einer Querüberdeckung von 60% in der Blockausgleichung mit strenger GPS Parametrisierung geschätzt werden. Eine Vielzahl der 33 Mehrdeutigkeitsterme ist nur für einen Bildflugstreifen gültig und deutet auf Signalverluste in den Kurvenflügen hin. Die Anzahl von Streckenkorrekturen ist für alle Streifen sehr groß und erreicht oftmals sechs. Bei der eingeschränkten Satellitenkonstellation zum Zeitpunkt der Befliegung konnten im allgemeinen

nur fünf bis sieben Satelliten beobachtet werden, so daß vorwiegend nur eine Mehrdeutigkeit für die GPS Antennenkoordinaten eines Streifen zuverlässig geschätzt und in der Blockausgleichung als fest eingeführt wird.

Die ca. 2.5 stündige Befliegung des Blockes Vechtel ist durch einen GPS Empfängerausfall unterbrochen. Nach dem Datenausfall werden sämtliche Mehrdeutigkeiten neu initialisiert, so daß keine Verknüpfung der GPS Beobachtungen über durchgängig beobachtete Satelliten besteht. Hierdurch ergeben sich aus den GPS Daten zunächst zwei völlig unabhängige Blöcke für die strenge GPS Parametrisierung, die nicht über gemeinsame Mehrdeutigkeiten sondern nur über die photogrammetrischen Daten miteinander in Beziehung stehen. GPS Koordinaten sind grundsätzlich in einem einheitlichen globalen Koordinatensystem gegeben. Das Nachbarschaftsprinzip kann jedoch durch die bekannten GPS Fehlerkomponenten systematisch verfälscht sein, so daß unabhängige GPS Koordinatenbestimmungen unterschiedliche nachbarschaftliche Genauigkeiten erreichen. Für die strenge GPS Parametrisierung können dadurch systematische Differenzen zwischen den Blockteilen auftreten, die jedoch durch die Streckenkorrekturen aufgefangen werden.

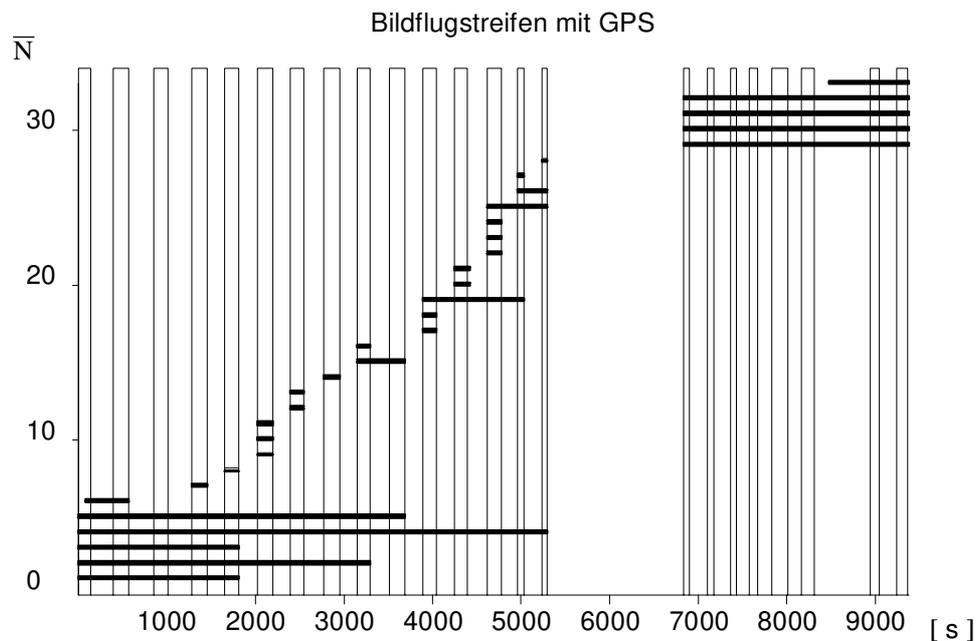


Abb. 7.16: Bildstreifen sowie Anzahl und Gültigkeit der Streckenkorrekturen  $\bar{N}$  beim Block Vechtel ohne Nord-Süd Streifen

Tabelle 7.15 zeigt die Ergebnisse der Bündelblockausgleichung der unterschiedlichen Ansätze zur kombinierten GPS/Blockausgleichung bei 60% Querüberdeckung. Die Ergebnisse der strengen GPS Parametrisierung sind für die Höhenkomponente grob fehlerhaft. Die Lagekomponente hat gegenüber den blockinvarianten Shift- und Drift-Ansätzen eine realistische Größenordnung. Der streifeninvariante Shift Ansatz erreicht die beste Übereinstimmung an den Vergleichspunkten und ist unabhängig von den zuvor beschriebenen Problemen der fehlerhaften Mehrdeutigkeitsschätzung bzw. der zusätzlichen systematischen Fehler in den Koordinaten der Projektionszentren.

ZP	SX	SY	SZ	s <sub>0</sub>
	[m]	[m]	[m]	[μm]
p d g b	±0.106	±0.096	±0.575	15.78
p d b	±1.047	±0.319	±0.618	28.34
p d t b	±0.506	±0.434	±0.586	26.43
p d s	±0.040	±0.040	±0.056	5.91
p d t s	±0.050	±0.046	±0.072	5.98

Tab. 7.15: Blockausgleichung Vechtel mit strenger GPS Parametrisierung und Shift- und Drift-Ansätzen, 60% Querüberdeckung ohne Nord-Süd Streifen

### 7.2.2.3 Untersuchung mit 20% Querüberdeckung

Die Ergebnisse der Blockausgleichung mit 20% Querüberdeckung werden in Tabelle 7.16 gezeigt. Die blockinvarianten Shift- und Drift-Ansätze liefern grob falsche Ergebnisse. Die streifeninvarianten Shift- und Drift-Ansätze erreichen die beste Übereinstimmung an den Vergleichspunkten, wobei sich die Lagekomponenten im Vergleich zur Höhenkomponente nur geringfügig gegenüber der 60% Überdeckung verschlechtern. Die strenge Parametrisierung erzielt vergleichbare Ergebnisse, besitzt aber geringfügig größere Unsicherheiten in den Lagekomponenten.

ZP	SX	SY	SZ	s <sub>0</sub>
	[m]	[m]	[m]	[μm]
p d g b	±0.059	±0.088	±0.165	5.82
p d b	±3.696	±0.685	±0.695	27.81
p d t b	±2.218	±0.540	±0.593	18.72
p d s	±0.045	±0.066	±0.149	6.20
p d t s	±0.052	±0.074	±0.181	6.19

Tab. 7.16: Blockausgleichung Vechtel mit strenger GPS Parametrisierung und Shift- und Drift-Ansätzen, 20% Querüberdeckung ohne Nord-Süd Streifen

Die deutliche Verbesserung der Blockausgleichung mit strenger GPS Parametrisierung gegenüber den umfangreicheren Daten bei 60% Querüberdeckung zeigt die Sensitivität der strengen GPS Parametrisierung gegenüber nicht modellierten systematischen Fehlern. Eine systematisch verfälschte innere Orientierung für einige Streifen (siehe Kapitel 7.2.2.1) ergibt grobe Modellfehler und dementsprechend schlechte Ergebnisse in der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung. Die Widersprüche sind durch die stärkere geometrische Stützung des Blockes bei 60% Querüberdeckung größer. Für den reduzierten Datensatz mit 20% Querüberdeckung ist das Verhältnis GPS/Photogrammetrie durch die schwächere Blockgeometrie günstiger, so daß kleinere Widersprüche entstehen, die sogar durch die strenge GPS Parametrisierung kompensiert werden können.

Die Shift- und Drift-Ansätze zeigen sich dagegen als sehr robust gegenüber den Störungen. Die streifeninvariante Modellierung kann sämtliche systematischen Fehler auffangen und liefert gute Ergebnisse in der GPS gestützten Blockausgleichung.

### 7.3 Vergleich mit konventioneller Blockausgleichung

Um den Einfluß der reduzierten Paßpunktanzahl aufzuzeigen, werden im folgenden die GPS gestützten Blockausgleichungen einer konventionellen Blockausgleichung ohne GPS Stützung gegenübergestellt. Dabei wurde die identische, reduzierte Paßpunktverteilung verwendet. Verglichen werden die Ergebnisse der strengen Parametrisierung sowie der Shift- und Drift-Ansätze mit linearen Drift-Parametern der Blockausgleichungen mit simulierten systematischen Koordinatenfehlern (Datensatz Warberg) und realen Daten (Datensatz Groß Öingen und Vechtel). Es wurde eine blockinvariante Selbstkalibrierung mit den photogrammetrischen zusätzlichen Parametern durchgeführt, was einem Standardansatz in der konventionellen Blockausgleichung entspricht. Es muß darauf hingewiesen werden, daß die konventionellen Blockausgleichungen in den folgenden Vergleichen nicht das erreichbare Genauigkeitspotential wiedergeben, sondern ausschließlich den Effekt der GPS Stützung aufzeigen.

Eine konventionelle Blockausgleichung ohne GPS ergibt mit Paßpunkten in den Blockecken für die Blöcke Warberg und Groß Öingen die in Tab. 7.17 und Tab. 7.18 zusammengestellten Ergebnisse für eine Querüberdeckung von 60% und 20%. Insgesamt werden durch die Paßpunktverteilung ausschließlich am Blockrand ca. 10 bzw. 14 Modelle überbrückt, so daß die Genauigkeiten der Höhenkomponente grundsätzlich den theoretischen Erwartungen entsprechen.

ZP	q	SX	SY	SZ	s <sub>0</sub>
	[%]	[m]	[m]	[m]	[µm]
p b	60	±0.069	±0.089	±0.070	7.67
p b	20	±0.103	±0.141	±0.333	7.42

Tab. 7.17: Konventionelle Blockausgleichung Warberg ohne GPS mit reduzierter Paßpunktanzahl

ZP	q	SX	SY	SZ	s <sub>0</sub>
	[%]	[m]	[m]	[m]	[µm]
p b	60	±0.074	±0.041	±0.194	5.18
p b	20	±0.131	±0.079	±0.478	5.05

Tab. 7.18: Konventionelle Blockausgleichung Groß Öingen ohne GPS mit reduzierter Paßpunktanzahl

Die Lagekomponente des Blockes Warberg sind für die 60% Überdeckung in der gleichen Größenordnung wie die Höhenkomponente. Dies deutet auf eine unzuverlässige Blockausgleichung mit zweifelhaften Ergebnissen hin. Die erreichten Abweichungen an den unabhängigen Vergleichspunkten sind besser als die Resultate der kombinierten GPS/Block-Ausgleichung (Tab. 7.5), stellen aber aufgrund der zweifelhaften Blockausgleichung in diesem Fall

numerisch rein zufällige Zahlen dar. Dies ist beim Vergleich der Blockausgleichungen in den Abbildungen 7.17 und 7.18 entsprechend zu berücksichtigen.

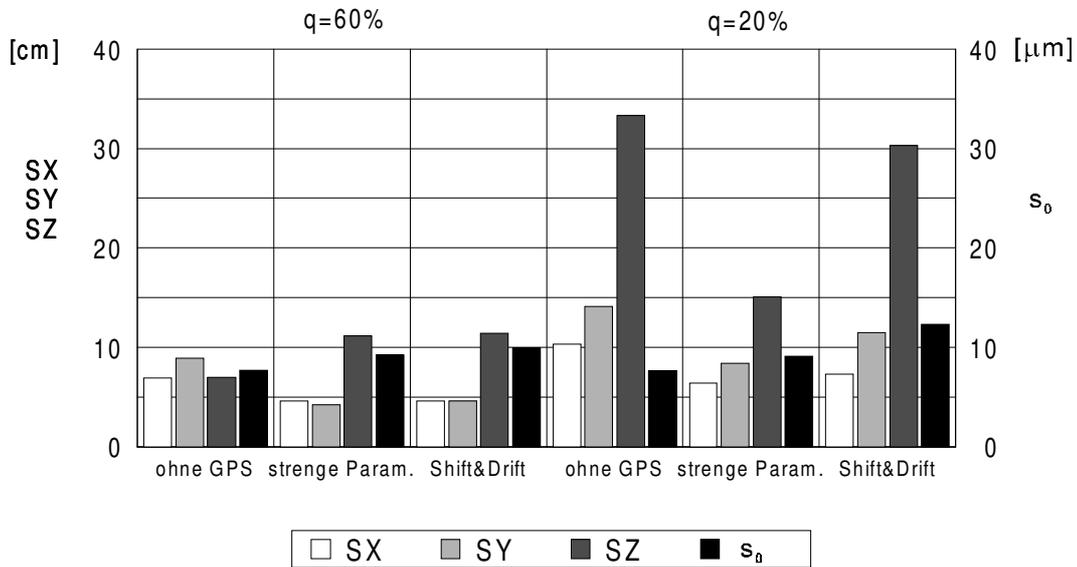


Abb. 7.17: Vergleich der Blockausgleichungen Warberg mit fehlerhaften Anfangsmehrdeutigkeiten (Blockausgleichung ohne GPS nur bedingt vergleichbar)

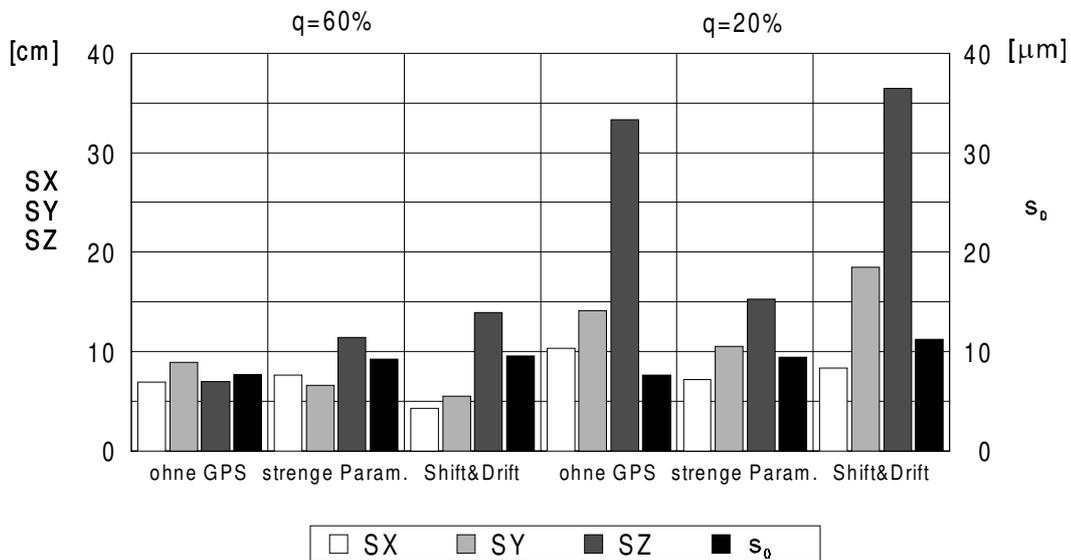


Abb. 7.18: Vergleich der Blockausgleichungen Warberg mit fehlerhaften Mehrdeutigkeiten nach Signalunterbrechungen (Blockausgleichung ohne GPS nur bedingt vergleichbar)

Für den Block Groß Ösingen ergeben sich an den unabhängigen Vergleichspunkten erwartungsgemäß eine Verschlechterung in den Lagekomponenten und eine deutliche Verschlechterung in der Höhenkomponente (Abb. 7.19).

Durch die erhebliche Reduzierung der Blockstabilität bei 20% Querüberdeckung werden vor allem in den Höhenkomponenten der Blöcke keine zufriedenstellenden Ergebnisse erreicht. Ein direkter Vergleich mit den GPS gestützten Blockausgleichungen in den Abbildungen 7.17, 7.18 und 7.19 zeigt den Effekt der mit GPS bestimmten Projektionszentren (Luftpaßpunkte).

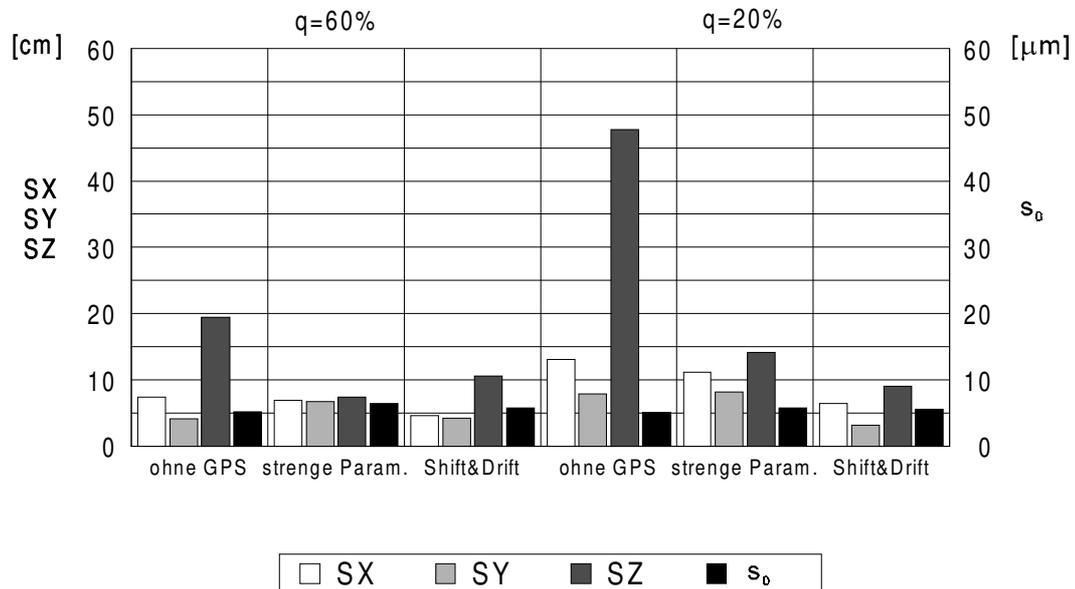


Abb. 7.19: Vergleich der Blockausgleichungen Groß Ösingen

Die Blockausgleichung Vechtel wurde, bedingt durch die Blockgeometrie (siehe Anhang, Kapitel 11) mit der reduzierten Paßpunktanzahl von sechs Doppelpaßpunkten in den Blockecken durchgeführt (Tab. 7.19). Die Blockausgleichung mit 60% Querüberdeckung erreicht in der Lage das Niveau der GPS gestützten Blockausgleichung (Tab. 7.15) und fällt im Vergleich mit den beiden vorherigen Blöcken in der Höhenkomponente nur gering ab. Dies ist in der Paßpunktanordnung begründet, die durch die Blockgeometrie eine bessere Stützung der Blockmitte erlaubt. Die Anzahl der überbrückten Modelle beträgt ca. 10, ist aber durch die Blockgeometrie nicht einheitlich und homogen. Die erreichte Genauigkeit in der Höhenkomponente entspricht dem theoretischen Wert.

ZP	q	SX	SY	SZ	s <sub>0</sub>
	[%]	[m]	[m]	[m]	[μm]
p b	60	±0.039	±0.052	±0.096	5.13
p b	20	±0.081	±0.079	±0.782	4.86

Tab. 7.19: Konventionelle Blockausgleichung Vechtel ohne GPS mit reduzierter Paßpunktanzahl

Beim Vergleich des Blockes Vechtel in Abbildung 7.20 sind die Ergebnisse der strengen GPS Parametrisierung wegen nicht modellierter Unterschiede in der inneren Orientierung nur eingeschränkt gültig (siehe Kapitel 7.2.2.1). Die Verbesserung der GPS gestützten Blockausgleichung mit den Shift- und Drift-Ansätze erreichen sowohl für die 60% als auch für

20% Querüberdeckung bessere Ergebnisse als die konventionelle Blockausgleichung mit reduzierter Paßpunktanzahl.

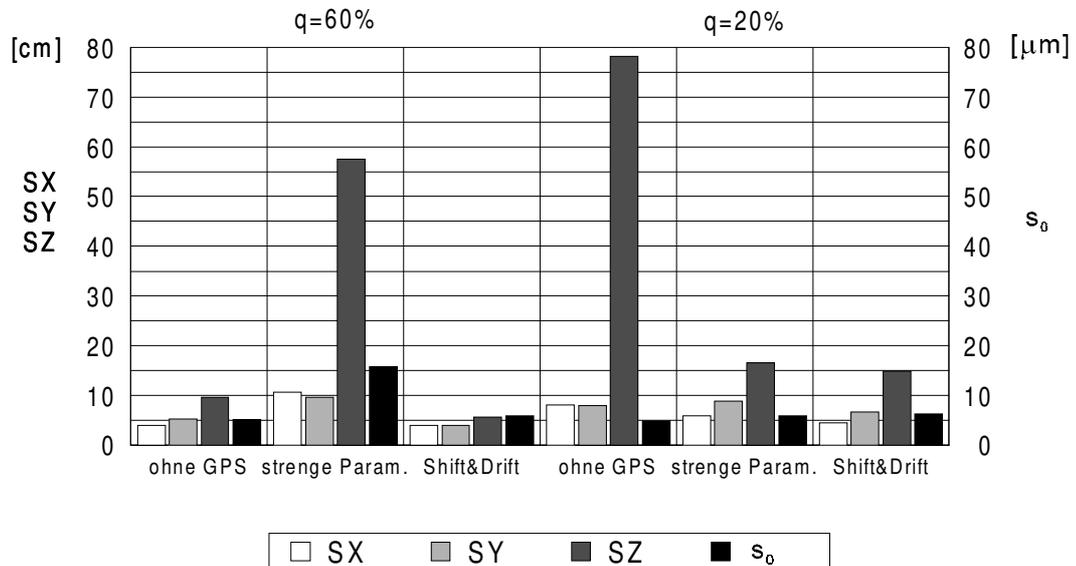


Abb. 7.20: Vergleich der Blockausgleichungen Vechtel (strenge GPS Parametrisierung nur bedingt vergleichbar)

Die Stützung der photogrammetrischen Blockausgleichung durch die Bestimmung der Projektionszentren mit GPS ist aus den Vergleichen offensichtlich. Ein Vergleich der strengen GPS Parametrisierung und der Shift- und Drift-Ansätze zeigt die grundsätzliche Eignung beider Verfahren, wobei Vorteile bei der Reduktion der Querüberdeckung für den strengen GPS Ansatz in der Blockausgleichung bestehen.

## 8. Mehrdeutigkeitsschätzung in der Blockausgleichung

Das Genauigkeitspotential der Aerotriangulation läßt auch den umgekehrten Weg, die Bestimmung von Mehrdeutigkeiten in der gemeinsamen Blockausgleichung und deren Rücksubstitution in die GPS Auswertung, zu. Im folgenden wird die grundsätzliche Eignung der vorgestellten strengen GPS Parametrisierung anhand von zwei Beispielen dargestellt und auf kritische Aspekte hingewiesen.

Das Mehrdeutigkeitsproblem ist bereits in Kapitel 5 dargestellt worden. Die Anzahl ganzer Wellenlängen zu einem Satelliten ist bei Beginn der Signalerfassung unbekannt und stellt die unbekanntes Anfangsmehrdeutigkeit dar. Solange das GPS Signal kontinuierlich empfangen und gemessen werden kann, werden die Nulldurchgänge des Signals gezählt. Bei jeder Unterbrechung des Signals entsteht eine neue Mehrdeutigkeit. Anfangsmehrdeutigkeiten und Mehrdeutigkeiten nach Signalunterbrechungen sind zu bestimmen und auf ganzzahlige Werte festzusetzen, um eine präzise Koordinatenbestimmung zu ermöglichen.

Die im Kapitel 6 dargestellte strenge GPS Parametrisierung liefert in der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung verbesserte Streckenkorrekturen  $\bar{\mathbf{N}}$  für fehlerhaft festgesetzte Mehrdeutigkeiten, die mit der entsprechenden Wellenlänge  $\lambda$  des in der GPS Auswertung verwendeten Signals skaliert sind. Eine Schätzung der Mehrdeutigkeiten  $\overline{\mathbf{N}}$  ergibt sich aus dem vektoriellen Mehrdeutigkeitsterm  $\bar{\mathbf{N}}$ :

$$\overline{\mathbf{N}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \bar{\mathbf{N}}. \quad (8.1)$$

Aus der GPS Ausgleichung werden linearisierte Mehrdeutigkeitsterme in die gemeinsame Blockausgleichung eingeführt und erneut geschätzt. Da die Schätzung bereits innerhalb eines linearisierten Modells durchgeführt wird und differentielle Größen verwendet werden, können Fehler, beispielsweise aus einem Datumsübergang, vernachlässigt werden, so daß als Ergebnis die Mehrdeutigkeit der GPS Auswertung erhalten wird.

Für den nachfolgenden Vergleich von künstlich eingeführten Mehrdeutigkeiten und geschätzten Mehrdeutigkeitstermen aus der strengen GPS/Block-Ausgleichung wird der mittlere Bildmaßstab des gesamten Blockes verwendet. Der Bildmaßstab ist bei der Modellierung der strengen GPS Parametrisierung im Bildraum (Modell im verwendeten Bündelblockausgleichungsprogramm BLUH) für die Umrechnung der Streckenkorrekturen notwendig. Für den Block Warberg (siehe Anhang 11) lassen sich alle Mehrdeutigkeiten zuverlässig bestimmen. In einer reinen  $L_1$  Koordinatenschätzung wurden zunächst sieben Mehrdeutigkeiten fehlerhaft festgesetzt. Die Verteilung der fehlerhaft festgesetzten Mehrdeutigkeiten innerhalb des Blockes und der einzelnen Streifen ist in Abbildung 8.1 für 60% Querüberdeckung angegeben. Die Streifen sind durch Rechtecke und die Gültigkeit der in der Blockausgleichung zu schätzenden Streckenkorrekturen  $\bar{\mathbf{N}}$  als Funktion der Zeit dargestellt. Zusätzlich ist die PRN Satellitennummer der jeweiligen Streckenkorrektur angegeben.

Die Blockausgleichung mit strenger GPS Parametrisierung ergibt an unabhängigen Vergleichspunkten quadratische Abweichungen von 10 cm in der Höhe bei vier Doppelpaßpunkten in den Blockecken (vgl. Tab. 8.1) und einer Querüberdeckung  $q$  von 60%. Eine Verringerung der Querüberdeckung verändert die Ergebnisse der Blockausgleichung vor allem in der

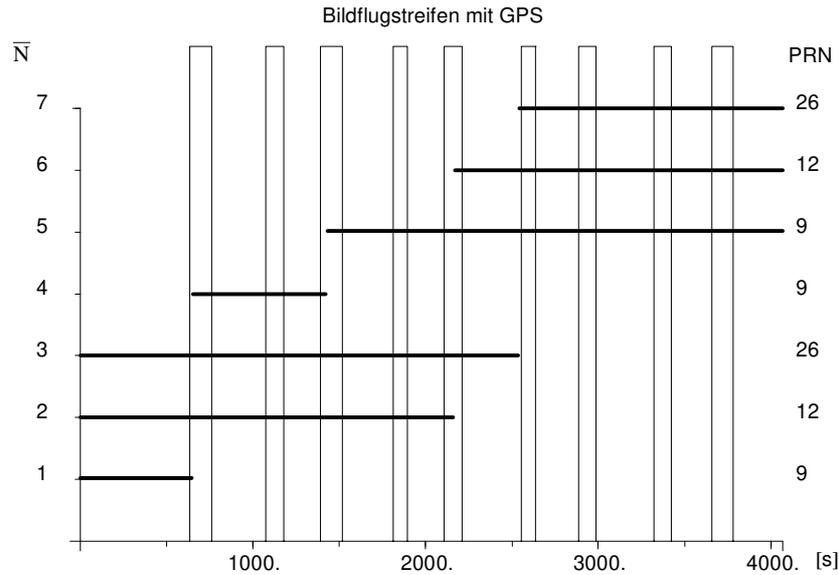


Abb. 8.1: Bildstreifen sowie Anzahl, Gültigkeit der Streckenkorrekturen  $\bar{N}$  und PRN Nummer der Satelliten bei fehlerhaft festgesetzten  $L_1$  Mehrdeutigkeiten, Block Warberg

Höhenkomponente. Dies erwartete Verhalten ist aus den Untersuchungen in Kapitel 7 bereits bekannt und wird hier mit einer veränderten GPS Koordinatenlösung für den Block Warberg erreicht.

ZP	SX	SY	SZ	$s_0$	q
	[m]	[m]	[m]	[ $\mu\text{m}$ ]	[%]
p d g b	$\pm 0.064$	$\pm 0.055$	$\pm 0.106$	8.97	60
p d g b	$\pm 0.071$	$\pm 0.055$	$\pm 0.166$	9.09	20

Tab. 8.1: Ergebnisse der GPS/Block-Ausgleichung Block Warberg mit künstlichen Fehlern in der Mehrdeutigkeitsfestsetzung und unterschiedlicher Querüberdeckung q

Tabelle 8.2 zeigt die Übereinstimmung nach einfachem Runden auf eine ganze Zahl bei einer Querüberdeckung von 60%. Es ergibt sich mit rund 70% eine hohe Anzahl von richtig bestimmten Mehrdeutigkeiten.

Für eine Querüberdeckung von 20% ergeben sich mit 40% korrekt bestimmter Mehrdeutigkeiten weniger Übereinstimmungen (Tab. 8.3). Dies ist auf die Reduzierung der photogrammetrischen Daten zurückzuführen, wodurch die Koordinaten der Aufnahmezentren sich nicht mehr mit der gleichen Genauigkeit bestimmen lassen, und die korrekte Schätzung der Mehrdeutigkeitsterme gestört wird. Grundsätzlich wird GPS zur Stützung der Photogrammetrie sowie Reduzierung der benötigten Paßpunkte und photogrammetrischen Daten genutzt, was der Verringerung der Querüberdeckung und gleichzeitigen Schätzung der Mehrdeutigkeiten für eine Rücksubstitution in die GPS Auswertung widerspricht.

PRN	$N_{AT}$	$N_{AT}$ ganzzahlig	$N_{GPS}$	richtig ✓/ falsch ✗
	[L1 cyl]	[L1 cyl]	[L1 cyl]	
9	+3.99	+4	+1	✗
12	-1.07	-1	-1	✓
26	+0.63	+1	+1	✓
9	+0.30	0	+1	✗
9	-0.93	-1	-1	✓
12	+1.57	+2	+2	✓
26	+0.82	+1	+1	✓

Tab. 8.2: Vergleich fehlerhaft eingeführter Mehrdeutigkeiten und ganzzahlig gerundeter Mehrdeutigkeitsterme aus GPS/Block-Ausgleichung,  $q=60\%$

PRN	$N_{AT}$	$N_{AT}$ ganzzahlig	$N_{GPS}$	richtig ✓/ falsch ✗
	[L1 cyl]	[L1 cyl]	[L1 cyl]	
9	+5.17	+5	+1	✗
12	-1.95	-2	-1	✗
26	+0.18	0	+1	✗
9	+1.05	+1	+1	✓
9	-1.04	-1	-1	✓
12	+0.19	0	+2	✗
26	+0.57	+1	+1	✓

Tab. 8.3: Vergleich fehlerhaft eingeführter Mehrdeutigkeiten und ganzzahlig gerundeter Mehrdeutigkeitsterme aus GPS/Block-Ausgleichung,  $q=20\%$

Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt die grundsätzliche Möglichkeit zur Schätzung von Mehrdeutigkeiten in der Blockausgleichung auf. Wird die strenge GPS Parametrisierung im Bildraum durchgeführt, so ergibt sich für die Rücksubstitution eine Abhängigkeit vom Bildmaßstab. Der Bildmaßstab ist jedoch aufgrund der Geländetopographie und Abweichungen von der Senkrechtaufnahme nicht konstant für ein Bild. Dadurch können sich Unsicherheiten ergeben, die unter ungünstigen Bedingungen Größenordnungen von mehr als einer halben GPS Trägerwellenlängen annehmen können. Theoretisch ist der mittlere Maßstab aus allen Bildern, die zur Bestimmung eines Mehrdeutigkeitstermes  $\bar{N}$  verwendet wurden, zu benutzen. Eine Modellierung im Objektraum schließt diesen Fehleranteil aus.

Das Runden der Mehrdeutigkeiten auf Ganzzahlige stellt die einfachste Methode zur Festsetzung der Mehrdeutigkeiten dar und ist im allgemeinen nicht zuverlässig. Aus der GPS Ausgleichung sind die Standardabweichungen sowie die Korrelationen mit anderen Mehrdeutigkeiten und Parametern bekannt, die grundsätzlich genutzt werden können, um auf Basis von statistischen Tests Entscheidungen über eine ganzzahlige Festsetzung zu treffen. Die stochastischen Informationen der Mehrdeutigkeiten aus der GPS Ausgleichung sollten deshalb

für eine strenge Mehrdeutigkeitsbestimmung in die GPS/Block-Ausgleichung berücksichtigt werden.

Koordinaten aus Zweifrequenz GPS Auswertungen sind grundsätzlich ebenfalls verwendbar, erfordern jedoch eine umfassende und aufwendige Buchhaltung der einzelnen Linearkombinationen. Deshalb ist eine Beschränkung auf die grundlegenden Trägerphasen  $L_1$  und  $L_2$  sinnvoll.

Die fortschreitende Entwicklung im Bereich der schnellen Mehrdeutigkeitssuche und die inzwischen immer zuverlässiger arbeitenden Algorithmen machen jedoch einen solchen externen und aufwendigen Weg zur Überprüfung und Stützung der GPS Mehrdeutigkeitsbestimmung überflüssig. Die Genauigkeit der GPS Koordinaten kann durch die korrekte Bestimmung und Festsetzung der Mehrdeutigkeiten in der Blockausgleichung gesteigert werden. Problematisch ist dabei, daß durch die hohe Korrelation, die Mehrdeutigkeiten nicht eindeutig von den verwendeten zusätzlichen Parameter und den Elementen der äußeren und inneren Orientierung zu trennen sind. Es kann somit der umgekehrte Effekt, d.h. eine Verfälschung der GPS Koordinatenverbesserung durch festgesetzte Mehrdeutigkeiten, eintreten.

## 9. Ergebnisse und Diskussion

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß im wesentlichen zwei Probleme die GPS gestützte Blockausgleichung beeinflussen. Zum einen sind dies konstante und zeitabhängige systematische GPS Koordinatenfehler aufgrund von fehlerhaft festgesetzten Mehrdeutigkeiten, zum anderen Satellitenkonstellationsänderungen, die Unstetigkeiten in den GPS Koordinaten ergeben. Ungünstige geometrischen Bedingungen der GPS Messungen verstärken die verursachten Fehler. Werden alle systematischen Effekte korrekt in der GPS Auswertung modelliert, ergeben sich keine signifikanten Unstetigkeiten. Aufgrund der atmosphärischen Einflüsse auf die Satellitensignale ist dies nur begrenzt erreichbar und insbesondere für Einfrequenzmessungen nicht einzuhalten.

In der Praxis werden in der GPS gestützten Blockausgleichung Näherungsverfahren eingesetzt, um die konstanten und zeitabhängigen GPS Fehler zu erfassen. Dies ist durch die direkte Bestimmung der Projektionszentren mit GPS in einer gemeinsamen Blockausgleichung möglich. Diese, als Shift- und Drift-Ansätze bezeichneten Verfahren, werden bereits operationell eingesetzt und haben in umfangreichen Untersuchungen ihre Funktionalität bewiesen. Shift- und Drift-Ansätze berücksichtigen zunächst keine Unstetigkeiten aufgrund von Satellitenkonstellationsänderungen, die insbesondere bei der Interpolation der GPS Koordinaten auf den Aufnahmezeitpunkt zu Fehlern führen können. Fehler durch Unstetigkeiten lassen sich in der GPS Auswertung vermeiden oder in der GPS gestützten Blockausgleichung berücksichtigen, sind jedoch mit zusätzlichen Analysen der GPS Daten verbunden.

Die systematischen GPS Fehler können jedoch auch durch einen strengen Ansatz in der Blockausgleichung berücksichtigt werden. Dabei wird die redundante Information aus den photogrammetrischen Daten über die Koordinaten der Projektionszentren verwendet, um eine Verbesserung der Streckenmessung zu den jeweiligen Satelliten zu bestimmen. Das entwickelte strenge Verfahren beruht auf dem Beobachtungsmodell des GPS und erfaßt dadurch sowohl systematische Fehler aufgrund von falsch festgesetzten Mehrdeutigkeiten als auch Unstetigkeiten aufgrund von Konstellationsänderungen automatisch. Als Eingangsgrößen sind zusätzlich zu den GPS Koordinaten der Antenne, Satellitenazimut und -elevation sowie unzuverlässig bestimmte Mehrdeutigkeiten notwendig, die jedoch im allgemeinen einfach aus einer GPS Auswertung bereitgestellt werden können.

Es zeigt sich, daß die strenge GPS Parametrisierung für eine gemeinsame GPS/Block-Ausgleichung geeignet ist. Sämtliche systematischen Fehler werden für den gesamten photogrammetrischen Block bestimmt, und die nachbarschaftlichen Beziehungen der in einem einheitlichen Koordinatensystem definierten GPS Koordinaten bleiben erhalten. Dadurch ergibt sich eine bessere geometrische Verknüpfung der Befliegungstreifen in der Blockausgleichung, auch wenn eine Verringerung der Querüberdeckung vorliegt. Die GPS Koordinaten ersetzen die fehlenden photogrammetrischen Verknüpfungen zwischen den Streifen.

Die strenge GPS Parametrisierung setzt voraus, daß keine weiteren systematischen Fehler, insbesondere streifeninvariante Fehler, vorhanden sind. Veränderte und unbekannte Abtriftwinkel während der Befliegung sowie unbekannt oder fehlerhafte Antennenexzentrizitäten sind mögliche Ursachen für solche systematischen Verfälschungen. Beim Datensatz Vechtel konnte eine systematische Verfälschung der inneren Orientierung nachgewiesen werden, die zu groben Störungen der strengen GPS Parametrisierung führte. Im Vergleich hierzu, zeigen sich die Shift- und Drift-Ansätze als sehr robust gegenüber nicht näher bekannten systematischen

Fehlern. Die Shift- und Drift-Parameter sind allgemeiner formuliert und unabhängig von der strengen Modellbildung, so daß jeglicher systematische Effekt mit entsprechender Wirkung kompensiert wird.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, daß die strenge GPS Parametrisierung grundsätzlich vergleichbare Ergebnisse zu den Shift- und Drift-Ansätzen bei einer Querüberdeckung von 60% erzielt. Aus den Ergebnissen mit simulierten systematischen GPS Koordinatenfehlern ergeben sich bei einer Reduzierung der Querüberdeckung auf 20% Genauigkeitsvorteile für die strenge Parametrisierung. Die Ergebnisse werden durch reale Datensätze bestätigt, wenn die strenge GPS Parametrisierung und blockinvariante Shift- und Drift-Ansätze verglichen werden. Streifeninvariante Shift- und Drift-Parameter werden durch die bereits angesprochene generelle Kompensation von systematischen Fehlern aus GPS und Photogrammetrie am wenigsten beeinflusst und liefern auch bei Unkenntnis der genauen Fehlerursache zuverlässige Ergebnisse.

Grundsätzlich entspricht die Streckenkorrektur in der strengen GPS Parametrisierung einer Mehrdeutigkeitsverbesserung, so daß in der gemeinsamen Blockausgleichung die Schätzung der GPS Mehrdeutigkeiten möglich ist. Künstlich eingeführte Mehrdeutigkeiten konnten durch einfaches Runden auf den nächsten ganzzahligen Wert richtig bestimmt werden. Die Untersuchung zeigt jedoch nur die generelle Möglichkeit auf. Für eine strenge Mehrdeutigkeitsbestimmung in der GPS/Block-Ausgleichung müssen die stochastischen Informationen der Mehrdeutigkeiten aus der GPS Ausgleichung und statistische Testverfahren bzw. Suchalgorithmen verwendet werden. Eine von der GPS Auswertung getrennte Bestimmung von Mehrdeutigkeiten ist jedoch aufwendig und bei den Fortschritten in der Zuverlässigkeit der heutigen Mehrdeutigkeitslösungen hinfällig.

Die Funktionalität der Shift- und Drift-Ansätze hat dazu geführt, daß systematische Fehler durch ungenaue Antennenexzentrizität oder veränderte Abtriftwinkel in Kauf genommen werden, da die streifenweise lineare Approximation der GPS Koordinaten diese Effekte ebenfalls absorbiert. Für strenge Verfahren führt dies jedoch zu nicht erfaßbaren systematischen Fehlern in den Daten, die die Ergebnisse dieses Verfahrens negativ beeinflusst. In der Praxis sind zusätzliche Anforderungen an die Durchführung der Aerotriangulation schwer durchzusetzen, so daß bei vergleichbarer Genauigkeit eine geringe Akzeptanz bestehen wird. Die wirtschaftlichen Vorteile durch eine Reduzierung der Querüberdeckung sind jedoch ein wichtiger Aspekt der strengen GPS Parametrisierung, so daß Bedarf für weitere Untersuchungen des Ansatzes besteht.

Ein operationeller Einsatz der strengen GPS Parametrisierung macht deshalb eine strenge Formulierung sämtlicher systematischer Fehler in der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung notwendig. Dies betrifft sowohl die photogrammetrischen Ausgangsdaten (Änderungen des Abtriftwinkels, etc.) als auch die GPS Modellierung in der gemeinsamen Blockausgleichung. Die strenge GPS Parametrisierung kann um die Berücksichtigung der GPS Stochastik, insbesondere der Mehrdeutigkeitssterme, erweitert werden. Zudem kann die Modellierung von zusätzlichen atmosphärischen und entfernungsabhängigen Fehlern bei großen Abständen der GPS Referenzstation zum Befliegungsgebiet sinnvoll sein.

Aus der Sicht der Photogrammetrie ist die Gültigkeit der Selbstkalibrierung und die Korrelation mit den photogrammetrischen zusätzlichen Parametern im Detail zu untersuchen.

Die verwendete Modellbildung im Bildraum geht von Vereinfachungen und Näherungen aus, die durch eine strenge Modellierung im Objektraum zu überprüfen ist.

Die zügig fortschreitende Entwicklung in den Bereichen GPS und Digitale Photogrammetrie verlangen in Zukunft eine ständige Überprüfung und Anpassung der gemeinsamen GPS/Block-Ausgleichung. Dies ist insbesondere notwendig, um in der Wirtschaftlichkeit mit anderen Verfahren zur flächenhaften Datenbestimmung (Airborne Laser Scanning, Airborne Synthetic Aperture Radar (SAR)) konkurrieren zu können.

Der Aufbau von permanenten GPS Referenzstationen und die Vernetzung dieser Stationen eröffnet auch für die Photogrammetrie neue Perspektiven hinsichtlich der Flexibilität einer Befliegung. Der Einsatz von GPS wird vermehrt in Echtzeit durchgeführt werden, was zum einen die bisherige GPS Auswertung ersetzt und zum anderen eine Kontrolle der Datenerfassung erlaubt. Dadurch ist eine sofortige Anpassung der Befliegung an Systemausfälle oder unerwartete Störungen möglich. Die Eingangsdaten für die strenge GPS Parametrisierung können grundsätzlich auch von einem Echtzeit PDGPS System bereitgestellt werden, jedoch sind hierfür modulare Systeme oder Erweiterungen der Hersteller nötig. Heutige GPS Empfänger erlauben Datenraten von 10 Hz, so daß eine Synchronisation von GPS und Auslösezeitpunkte durch die Kamera-Peripherie gefordert werden muß, um Interpolationen zu vermeiden.

Die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der GPS Positionierung wird durch die Verknüpfung mit dem russischen Satellitennavigationssystem GLONASS (Global Navigation Satellite System) verbessert. Unter der Abkürzung GNSS (Global Navigation Satellite System) werden Satellitennavigationssystem allgemein zusammengefaßt. Erste kombinierte GPS/GLONASS Empfänger sind auf dem Markt und erreichen eine Navigationsgenauigkeit von unter 10 m. Für die photogrammetrische Anwendung erlaubt dies eine Verbesserung der Bildflughavigation, unabhängig von der Verfügbarkeit von DGPS Verfahren. Die gemeinsame GPS/GLONASS Trägerphasenauswertung sowohl im Post-Prozessing als auch in Echtzeit-Anwendungen macht jedoch durch die erhöhte Anzahl von sichtbaren Satelliten die Mehrdeutigkeitslösung zuverlässiger, so daß eine Verringerung der systematische Koordinatenfehler durch die Kombination zu einem Präzisen Differentiellen Global Navigation Satellite System (PDGNSS) erwartet werden kann. Gleichzeitig verursachen Abschattungen während eines Kurvenfluges keinen vollständigen Verlust aller Satellitensignale mehr.

Die Digitale Photogrammetrie wird im wesentlichen die zeitaufwendige Bestimmung von Verknüpfungspunkten automatisieren. Die automatische Identifizierung und Messung von Paßpunkten bereitet dagegen Schwierigkeiten, so daß eine direkte Bestimmung der äußeren Orientierung durch GNSS vorteilhaft bleibt.



## 10. Literaturverzeichnis

- Abousalem, M.A. (1997). Performance Overview of Two WADGPS Algorithms. *GPS World*, **8**, May, 48-58.
- Ackermann, F. (1984). Utilization of Navigation Data for Aerial Triangulation. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS Commission III, Vol. **25**, Part A3a, Rio de Janeiro, 1-9.
- Ackermann, F. (1986). The Use of Camera Orientation Data in Photogrammetry - A Review. Progress in Imaging Sensors, *Proceedings ISPRS Symposium*, Stuttgart, 1-5 September 1986 (ESA SP-252, November 1986), 93-99.
- Ackermann, F. (1988). Combined Adjustment of Airborne Navigation Data and Photogrammetric Blocks. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS Commission III, Vol. **27**, Part B8, Kyoto, 11-23.
- Ackermann, F. (1990). Kinematic GPS Camera Positioning for Aerial Triangulation. *Proceedings of the Second International Symposium on Precise Positioning with GPS*, GPS '90, Ottawa, Canada, 1155-1168.
- Ackermann, F. (1992). Operational Rules and Accuracy Models for GPS-Aerotriangulation. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS Commission III, Vol. **29**, Part B3, Washington D.C., 691-700.
- Ackermann, F., H. Schade (1993). Application of GPS for Aerial Triangulation. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *PE&ER*, Vol. **59**, No. 11, November, 1625-1632.
- Andersen, O. (1989). Experience with Kinematic GPS During Aerial Photography in Norway. *Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie*, Universität Stuttgart, Heft 13, 299-312.
- Augath, W., M. Fröhlich, H.-H. Kropp, W. Seifert, M. Strerath (1993). Aufbau von Permanentstationen in Niedersachsen. *Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung*, **43**, Heft 3, 143-154.
- Beutler, G., I.I. Mueller, R.E. Neilan, R. Weber (1994). IGS - Der Internationale GPS-Dienst für Geodynamik. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, *ZfV*, **119**, Heft 5, 221-232.
- Bichtemann, G., P. Hankemeier (1993). DGPS-Dienste in Norddeutschland. *SPN, Journal for Satellite-Based Positioning, Navigation and Communication*, **2**, Heft 1, 27-31.
- Burman, H., K. Torlegard (1994). Empirical Results of GPS-Supported Block Triangulation. *European Organization for Experimental Photogrammetric Research*, *OEEPE*, Official Publication, No. 29.
- Cannon, M.E. (1991). Airborne GPS/INS with an Application to Aerotriangulation. *UCSE Reports*, No. 20040, Department of Surveying Engineering, University of Calgary, Canada.
- Collins, J.P., R.B. Langley (1996). Mitigating Tropospheric Propagation Delay Errors in Precise Airborne GPS Navigation. Presented at the IEEE Position, Location and Navigation Symposium (PLANS 96), Atlanta, Georgia, USA.
- Colomina, I. (1989). Combined Adjustment of Photogrammetric and GPS Data. *Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie*, Universität Stuttgart, Heft 13, 313-342.
- Colomina, I. (1993). A Note on the Analytics of Aerial Triangulation with GPS Aerial Control. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, *PE&ER*, Vol. **59**, No. 11, November, 1619-1624.

- Corbett, S.J., T.M. Short (1994). Positions and Orientations of Airborne Sensors from Kinematic GPS Data. Proceedings of the *International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, KIS94*, Banff, Canada, 349-357.
- Corbett, S.J., T.M. Short (1995). Development of an Airborne Positioning System. *Photogrammetric Record*, **15**, 85, April, 3-15.
- Cramer, M. (1995). An Accuracy Investigation of Airborne Kinematic Attitude Determination with GPS for Sensor Orientation. Proceedings of the *3rd International Workshop on High Precision Navigation*, Stuttgart, 117-125.
- Denker, H. (1989). A New Gravimetric Quasigeoid for the Federal Republic of Germany. *DGK, Deutsche Geodätische Kommission*, Reihe B, Heft 291.
- Denker, H. (1995). Großräumige Höhenbestimmung mit GPS- und Schwerefelddaten. *Schriftenreihe des DVW*, Band 18, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 233-258.
- Denker, H., D. Behrend, W. Torge (1996). The European Gravimetric Quasigeoid EGG96. Presented at the *International Symposium on Gravity, Geoid, and Marine Geodesy (GRAGEOMAR 1996)*, Tokyo.
- Dorrer, E. (1988). GPS-gestützte Aerophotogrammetrie. Grundlegendes und Experimente. *Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik*, **11**, 595-604.
- DoD, DoT (1997). *1996 Federal Radionavigation Plan*. Department of Defence and Department of Transportation, DOT-VNTSC-RSPA-97-2/DOD-4655.5, National Technical Information Service, Springfield, V.A..
- Elsässer, L. (1995). Bündelblockausgleichung unter Nutzung von GPS-Positionen. *Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung*, **45**, Nr. 3, 204-213.
- Euler, H.-J. (1995). Statische/Kinematische Echtzeitvermessung mit GPS. *Schriftenreihe des DVW*, Band 18, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 271-286.
- Faig, W. (1984). *Workshop on Aerial Triangulation and Adjustment*. University of New Brunswick, Fredericton, Canada and School of Surveying, University of New South Wales, Kensington, N.S.W.
- Frieß, P. (1986). The Effect of Camera Position and Attitude Data in Aerial Triangulation - A Simulation Study. Progress in Imaging Sensors, Proceedings ISPRS Symposium, Stuttgart, 1-5 September 1986 (ESA SP-252, November 1986), 101-111.
- Frieß, P. (1988). Empirical Accuracy of Positions Computed from Airborne GPS Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS Commission III, Vol. **27**, Part B3, Kyoto, 215-224.
- Frieß, P. (1990a). Kinematische Positionsbestimmung für die Aerotriangulation mit dem NAVSTAR Global Positioning System. *DGK, Deutsche Geodätische Kommission*, Reihe C, Heft Nr. 359, München.
- Frieß, P. (1990b). Kinematische Kamera-Positionierung mit GPS für die Aerotriangulation. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, ZPF*, **58**, Heft 5, 136-143.
- Frieß, P. (1990c). Kinematic GPS Positioning for Aerial Photogrammetry -Empirical Results-. *Proceedings of the Second International Symposium on Precise Positioning with GPS, GPS '90*, Ottawa, Canada, 1169-1184.
- Frieß, P., T. Heuchel (1992). Experience with GPS-Supported Aerial Triangulation. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS Commission I, Vol. **29**, B1, Washington, D.C., 299-305.
- Fritsch, D., V. Tsingas, W. Schneider (1994). Von der Blockausgleichung zur automatischen Aerotriangulation. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, ZPF*, Heft 6, 214-223.

- Fritzensmeier, K., W. Niemeier, N. Korittke u.a. (1990). Zur Bestimmung photogrammetrischer Paßpunkte mit GPS. *AVN, Allgemeine Vermessungsnachrichten*, **97**, Heft 4, 125-132.
- Fritzensmeier, K. (1992). GPS - Voraussetzungen, Leistungsfähigkeit und Einsatzmöglichkeiten im Vermessungswesen. *Der Vermessungsingenieur*, Heft 1, 21-24.
- Gelb, A. (Hrsg.) (1974). *Applied Optimal Estimation*. The M.I.T. Press, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts.
- Goad, C.C. (1988). Investigation of an Alternate Method of Processing Global Positioning Survey Data Collected in Kinematic Mode. In: *Lecture Notes in Earth Sciences*, **19**, GPS-Techniques Applied to Geodesy and Surveying, E. Groten, R. Strauß (Hrsg.), Springer Verlag.
- Goldfarb, J.M. (1987). Aerotriangulation Using an INS-Differential-GPS. *UCSE Reports*, No. 20022, Department of Surveying Engineering, University of Calgary, Canada.
- Grant, D.B., C.C. Mazur, B. Merminod, C. Rizos, A. Stolz (1990). Contributions to GPS Studies. *UNISURV S-38*, School of Surveying, University of New South Wales, Kensington, Australia.
- Griffioen, P., T. Allison, S. Dreier (1993). Real Time Kinematic: The Next Surveying Tool. Presented at the *ION Technical Meeting*, January, San Francisco.
- Grün, A., A. Runge (1988). The Accuracy Potential of Self-Calibrating Aerial Triangulation without Control. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS Commission III, Kyoto, Vol. **27**, Part B3, 245-253.
- Hake, G. (1982). *Kartographie I*. De Gruyter, Berlin, New York.
- Han, S., C. Rizos (1996). Centimeter GPS Kinematic or Rapid Static Surveys Without Ambiguity Resolution. *Surveying and Land Information Systems*, Vol. **56**, No. 3, 143-148.
- Hankemeier, P. (1997). Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung - SAPOS -. *Schriftenreihe des DVW*, Band 28, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 193-203.
- Hartl, P., A. Wehr (1986). Coordinate Transformation Procedures for GPS-Attitude Control. Progress in Imaging Sensors, Proceedings ISPRS Symposium, Stuttgart, 1-5 September 1986 (ESA SP-252, November 1986), 215-226.
- Hatch R.R. (1982). The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements. Proceedings of the *Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, Las Cruces*, 1213-1232.
- Hatch R.R. (1986). Dynamic Differential GPS at the Centimeter Level. Proceedings of the *Fourth International Geodetic Symposium*, Austin, 1287-1298.
- Hatch, R.R., H.-J. Euler (1994). Comparison of Several AROF Kinematic Techniques. Proceedings of the *International Technical Meeting, ION GPS-95*, Salt Lake City, Utah, 363-370.
- Heck, B. (1995). *Rechenverfahren und Auswertemodelle der Landesvermessung*. Zweite Auflage, Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- Heimberg, F. (1994). Untersuchungen zum operationellen Einsatz des Differential GPS. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover*, Nr. 202, Hannover.
- Heipke, C. (1996a). Digitale Photogrammetrie - Grundlagen und Anwendungsbeispiele. Teil 1. *Mitteilungsblatt DVW-Bayern*, **48**, Heft 2, 271-299.
- Heipke, C. (1996b). Digitale Photogrammetrie - Grundlagen und Anwendungsbeispiele. Teil 2. *Mitteilungsblatt DVW-Bayern*, **48**, Heft 3, 423-452.

- Hofmann-Wellenhof, B., B.W. Remondi (1988). The Antenna Exchange: One Aspect of High-Precision GPS Kinematic Survey In: *Lecture Notes in Earth Sciences*, **19**, GPS-Techniques Applied to Geodesy and Surveying, E. Groten, R. Strauß (Hrsg.), Springer Verlag, 261-277.
- Hogholen, A. (1993). Kinematic GPS in Aerotriangulation in Finland. *Reports of the Finnish Geodetic Institute*, 93:5, Helsinki, 3-13.
- Jacobsen, K. (1980). Vorschläge zur Konzeption und zur Bearbeitung von Bündelblockausgleichung. *Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover*, Nr. 102, Hannover.
- Jacobsen, K. (1993). Experiences in GPS Photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, PE&ER*, Vol. **59**, No. 11, November, 1651-1658.
- Jacobsen, K. (1994a). *Program System BLUH*. Bundle Block Adjustment, University of Hannover. User Manual, August 1994, Institute for Photogrammetry and Engineering Surveys, University of Hannover.
- Jacobsen, K. (1994b). Combined Block Adjustment with Precise Differential GPS-Data. Preprint submitted to *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS Commission III, Working Group 1, Munich.
- Jacobsen, K. (1994c). Influence of Ambiguity Problems to Combined Block Adjustment with GPS-Data. Paper presented at ASPRS/ACSM Annual Convention and Auto-Carto Twelve, 1.-2. March, 1995, Charlotte, NC.
- Jacobsen, K. (1996). Operational Use of Combined Bundle Block Adjustment with GPS-Data of the Projection Centers Combined. ASPRS/ACSM Annual Convention, Baltimore.
- Jacobsen, K., K. Li (1990). Bündelblockausgleichung mit kinematischer GPS-Positionierung. *ZfV, Zeitschrift für Vermessungswesen*, **115**, Heft 5, 182-186.
- Jacobsen, K., K. Li (1992). Recent Experiences in Combined Block Adjustment with Kinematic GPS Data. IUSM, Washington.
- Jacobsen, K., M. Schmitz (1996). A New Approach of Combined Block Adjustment Using GPS-Satellite Constellation. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS Commission III, Vol. **31**, Part B3, Vienna, 355-359.
- Jahn, C.-H. (1996). Der Hochpräzise Permanente Positionierungs-Service (HPPS). *Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung*, **46**, Nr. 4, 195-205.
- Kaplan, E.D. (1996). *Understanding GPS Principles and Applications*. Artech House, Boston, London.
- Kenefick, J.F., M.S. Gyer, B.F. Harp (1972). Analytical Self-Calibration. *Photogrammetric Engineering*, Vol. **38**, No. 11, November, 1117-1126.
- Kleusberg, A., P.J.G. Teunissen (Hrsg.) (1996). *GPS for Geodesy*. Lecture Notes in Earth Science, **60**, Springer Verlag.
- Konecny, G., G. Lehmann (1984). *Photogrammetrie*. De Gruyter, Berlin, New York.
- Kraus, K. (1995). *Photogrammetrie*. Grundlagen und Standardverfahren. Band 1, 5. Auflage, Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn.
- Kraus, K. (1996). *Photogrammetrie*. Verfeinerte Methoden und Anwendungen. Band 2, 3. Auflage, Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn.
- Kruck, E. (1983). Lösung großer Gleichungssysteme für photogrammetrische Blockausgleichungen mit erweitertem funktionalen Modell. *Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover*, Nr. 128, Hannover.
- Kruck, E., G. Wübbena, A. Bagge (1996). Advanced Combined Bundle Block Adjustment with Kinematic GPS Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS Commission III, Vol. **31**, Part B3, Vienna, 394-398.

- Lapine, L.A. (1991). Analytical Calibration of the Airborne Photogrammetric System Using A Priori Knowledge of the Exposure Station Obtained from Kinematic Global Positioning System Techniques. *Department of Geodetic Science and Surveying*, Report No. 411, Ohio State University.
- Lechner, W., P. Lohmann (1995). Airborne Photogrammetry Based on Integrated DGPS/INS Navigation. Proceedings of the *3rd International Workshop on High Precision Navigation*, Stuttgart, 293-302.
- Lee, J.O. (1996). Untersuchung von Verfahren zur kombinierten Aerotriangulation mittels integriertem GPS/INS. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover*, Nr. 220, Hannover.
- Lemoine, F.G., D.E. Smith, L. Kunz, R. Smith, E.C. Pavlis, N.K. Pavlis, S.M. Klosko, D.S. Chinn, M.H. Torrence, R.G. Williamson, C.M. Cox, K.E. Rachlin, Y.M. Wang, S.C. Kenyon, R. Salman, R. Trimmer, R.H. Rapp, R.S. Nerem (1996). The Development of the NASA GSFC and NIMA Joint Geopotential Model. Presented at the *International Symposium on Gravity, Geoid, and Marine Geodesy (GRAGEOMAR 1996)*, Tokyo.
- Li, K. (1992). Empirische Untersuchungen zur GPS-gestützten kombinierten Blockausgleichung. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover*, Nr. 175, Hannover.
- Ligterink, G.H. (1988). A Study on the Improvement of Photogrammetric Block Adjustment Procedures by Auxiliary Data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS Commission III, Kyoto, Vol. **27**, Part B3, 476-483.
- Lindstrot, W., E. Rausch, W. Schlüter, W. Seifert (1992). GPS-Meßkampagne DREF 91. *SPN, Journal for Satellite-Based Positioning, Navigation and Communication*, Heft 1, 17-21.
- Lorch, W. (1991). RMK TOP Aerial Survey Camera System. 43rd Photogrammetric Week, *Schriftenreihe des Institut für Photogrammetrie*, Heft 15, Stuttgart, 25-30.
- Lucas, J.R. (1987). Aerotriangulation without Ground Control. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, PE&RS*, **53**, No. 3, March, 311-314.
- Lundberg, O. (1994). Way Points for Radio Navigation in the 21th Century. Proceedings of the *7th International Technical Meeting, ION GPS-94*, Salt Lake City, Utah.
- Mader, G.L. (1986). Dynamic Positioning Using GPS Carrier Phase Measurements. *manuscripta geodetica*, Vol. **11/4**, 272-277.
- Mader, G.L., J.R. Lucas (1989). Verification of Airborne Positioning Using Global Positioning System Carrier Phase Measurements. *Journal of Geophysical Research*, Vol. **94**, No. B8, 10175-10181.
- Mader, G.L., W.E. Carter, B.C. Douglas, W.B. Krabill (1986). Decimeter Precision Aircraft Positioning Using GPS Carrier Phase Measurements. *Navigation, Journal of The Institute of Navigation*, Vol. **33**.
- Malys, S., J.A. Slater, R.W. Smith, L.E. Kunz, S.C. Kenyon (1997). Status of the World Geodetic System 1984. Proceedings of the *International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, KIS97*, Banff, Canada, 25-33.
- Mark, R.-P. (1993). The Performance Capabilities of Modern Aerial Camera Systems. In: Fritsch, D., D. Hobbie (Eds.), *Photogrammetric Week '93*, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 45-50.
- Mueller, T. (1994). Wide Area Differential GPS. *GPS World*, **5**, June, 36-44.
- Müller, J. (1971). Blocktriangulation mit Verbesserung der inneren Orientierung. *Bildmessung und Luftbildwesen*, BuL, **39**, Heft 3, 107-112.

- Niemeier, W. (1995). Nutzung datumsfreier Informationen zur Kombination von terrestrischen und GPS-Messungen. *Schriftenreihe des DVW*, Band 18, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 335-347.
- Pelzer, H. (1985). Grundlagen der mathematischen Statistik und der Ausgleichsrechnung. In: *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II*, H. Pelzer (Hrsg.), Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 121-152.
- Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling, B.P. Flannery (1992). *Numerical Recipes in C. The Art of Scientific Computing*. Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne.
- Remondi, B.W. (1985). Performing Centimeter Accuracy Relative Surveys in Seconds Using GPS Carrier Phase. *Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with GPS*, Rockville, Md., 789-797.
- Schade, H. (1994). Neigungsbestimmung photogrammetrischer Sensoren mit dem NAVSTAR/Global Positioning System. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, ZPF, Heft 6, 199-207.
- Schade, H., M. Cramer (1994). Airborne Kinematic Attitude Determination with GPS for Photogrammetry and Remote Sensing. *Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, KIS94*, Banff, Canada, 315-322.
- Schade, H., D. Fritsch (1995). Anwendungen von GPS in der Photogrammetrie. *Schriftenreihe des DVW*, Band 18, Verlag Konrad Wittwer, 288-300.
- Schenk, T. (1995). Zur automatischen Aerotriangulation. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, ZPF, Nummer 3, 137-144.
- Schmid, H.H. (1958). Eine Allgemeine analytische Lösung für die Aufgabe der Photogrammetrie. *Bildmessung und Luftbildwesen*, BuL, **26**, Heft 3, 103-113.
- Schmid, H.H. (1959). Eine Allgemeine analytische Lösung für die Aufgabe der Photogrammetrie. *Bildmessung und Luftbildwesen*, BuL, **27**, Heft 1, 1-12.
- Schmitz, M. (1995). Integrated GPS-Aerial Triangulation Orientation. Presented at the Workshop *Integrated Sensor Orientation*, September 4-8, 1995, Barcelona, Spain.
- Schwarz, K.P. (1995). Integrated Airborne Navigation Systems for Photogrammetry. In: Fritsch, D., D. Hobbie (Eds.), *Photogrammetric Week '95*, Herbert Wichmann Verlag, Karlsruhe, 139-153.
- Schwarz, K.P., C.S. Fraser, P.C. Gustafson (1984). Aerotriangulation Without Ground Control. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, ISPRS Commission I, Vol. **25**, Part A1, Rio de Janeiro, 237-250.
- Schwidefsky, K., F. Ackermann (1976). *Photogrammetrie. Grundlagen, Verfahren, Anwendungen*. B.G. Teubner, Stuttgart.
- Schwartz, C. (1994). Experimente zur GPS-gestützten Aerotriangulation unter Berücksichtigung systematischer Einflüsse. *Schriftenreihe des Studiengang Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München*, Heft 48, Neubiberg.
- Schwartz, C., E. Dorrer (1991). Bestimmung der Exzentrizität Kamera-Antenne in der GPS-gestützten Aerophotogrammetrie. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*, ZPF, **59**, Heft 3, 99-103.
- Seeber, G. (1993). *Satellite Geodesy. Foundations, Methods, and Applications*. Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Seeber, G. (1996). Grundprinzipien zur Vermessung mit GPS. *Der Vermessungsingenieur*, **47**, April, Heft 2, 53-64.
- Seeber, G., M. Schmitz (1995). GPS Status und aktuelle hydrographische Anwendungen. *Schriftenreihe des DVW*, Band 11, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 16-31.

- Seeber, G., M. Schmitz (1996). Methodik der GPS- und DGPS-Messung. *Geoinformatik Online*, Ausgabe 1/97, WorldWideWeb, On-line Magazine des Instituts für Geoinformatik, Universität Münster, Juli 1996.
- Seeber, G., G. Wübbena (1989). Kinematic Positioning with Carrier Phases and "On the Way" Ambiguity Resolution. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Satellite Positioning*, Las Cruces, New Mexico, 600-609.
- Seeber, G., V. Böder, H.-J. Goldan, M. Schmitz, G. Wübbena (1995). Precise DGPS Positioning in Marine and Airborne Applications. *GPS Trends in Precise Terrestrial, Airborne, and Spaceborn Applications, IAG Symposium*, No. 113, Springer Verlag.
- Shi, J, M.E. Cannon (1995). Critical Error Effects and Analysis in Carrier Phase-Based Airborne GPS Positioning Over Large Areas. *Bulletin Geodesique*, **69**, 261-273.
- Strang, G., K. Borre (1997). *Linear Algebra, Geodesy, and GPS*. Wellesley-Cambridge Press, Wellesley, Maine.
- Skaloud, J., D. Cosandier, K.P. Schwarz, M.A. Chapman (1994). GPS/INS Orientation Accuracy Derived from a Medium Scale Photogrammetry Test. *Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, KIS94*, Banff, Canada, 341-348.
- Tiberius, C., P.J.G. Teunissen, P. de Jonge (1997). Kinematic GPS: Performance and Quality Control. *Proceedings of the International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, KIS94*, Banff, Canada, 289-299.
- Torge, W. (1980). *Geodesy*. De Gruyter, Berlin, New York.
- Van der Vegt, H.J.W. (1989). GPS Test Flight Flevoland. *Schriftenreihe des Instituts für Photogrammetrie*, Universität Stuttgart, Heft 13, 285-298.
- Vanicek, P., E. Krakiwsky (1986). *Geodesy: The Concepts*. 2. Auflage, North-Holland, Amsterdam.
- Wanninger, L. (1994). Der Einfluß der Ionosphäre auf die Positionierung mit GPS. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover*, Nr. 201, Hannover.
- Wanninger, L. (1995). Einfluß ionosphärischer Störungen auf präzise GPS-Messungen in Mitteleuropa. *Schriftenreihe des DVW*, Band 18, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 218-232.
- Wells, D.E. (Hrsg.) (1986). *Guide to GPS Positioning*. Fredericton, Canada.
- Wieser, A., C. Ressel (1995). *Solutions to the Exercises of Karl Kraus Photogrammetry*. Volume 1, with contributions by P. Waldhäusl, Institute for Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology.
- Winter, R. (1995). GPS-Einsatz in der Photogrammetrie. *Nachrichten der Niedersächsischen Vermessungs- und Katasterverwaltung*, **45**, Nr. 3, 187-203.
- Wübbena, G. (1988). GPS Carrier Phases and Clock Modeling. In: *Lecture Notes in Earth Sciences*, **19**, GPS-Techniques Applied to Geodesy and Surveying, E. Groten, R. Strauß (Hrsg.), Springer Verlag, 381-392.
- Wübbena, G. (1989). The GPS Adjustment Software Package -GEONAP- Concepts and Models. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Satellite Positioning*, Las Cruces, New Mexico, 452-461.
- Wübbena, G. (1991). Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung. *Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover*, Nr. 168, Hannover.
- Wübbena, G., A. Bagge (1995). Präzises DGPS in Echtzeit für Vermessung und GIS-Anwendungen. Beitrag zum DVW-Praxisseminar DGPS-Anwendungen, 19.-20. September 1995, Hamburg.

- Wübbena, G., F. Menge, M. Schmitz, G. Seeber, C. Völksen (1996a). A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. Proceedings of the *International Technical Meeting, ION GPS-96*, Kansas City, Missouri, 1205-1214.
- Wübbena, G., A. Bagge, G. Seeber, V. Böder, P. Hankemeier (1996b). Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. Proceedings of the *International Technical Meeting, ION GPS-96*, Kansas City, Missouri, 1845-1852.
- Wübbena, G., M. Schmitz, F. Menge, G. Seeber, C. Völksen (1997). A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations. *Navigation*, Journal of The Institute of Navigation, Vol. **44**, No. 2, 247-256.

## 11. Anhang

### 11.1 Rotationsmatrix und strenge partielle Ableitungen der Kollinearitätsgleichungen

Die Richtungskoeffizienten der photogrammetrischen Drehmatrix  $\mathbf{R}$  mit Primärdrehung  $\varphi$ , Sekundärdrehung  $\omega$  und Tertiärdrehung  $\kappa$  als Neigungsdefinition lauten:

$$\mathbf{R}(\varphi\omega\kappa) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (11.1)$$

$$r_{11} = +\cos\varphi\cos\kappa + \sin\varphi\sin\omega\sin\kappa \quad (11.2)$$

$$r_{21} = +\cos\omega\sin\kappa \quad (11.3)$$

$$r_{31} = -\sin\varphi\cos\kappa + \cos\varphi\sin\omega\sin\kappa \quad (11.4)$$

$$r_{12} = -\cos\varphi\sin\kappa + \sin\varphi\sin\omega\cos\kappa \quad (11.5)$$

$$r_{22} = +\cos\omega\cos\kappa \quad (11.6)$$

$$r_{32} = +\sin\varphi\sin\kappa + \cos\varphi\sin\omega\cos\kappa \quad (11.7)$$

$$r_{13} = +\sin\varphi\cos\omega \quad (11.8)$$

$$r_{23} = -\sin\omega \quad (11.9)$$

$$r_{33} = +\cos\varphi\cos\omega \quad (11.10)$$

Die strengen partiellen Ableitungen der Kollinearitätsgleichung lauten (Wieser, Ressler 1995):

$$\frac{\partial x}{\partial X_p} = -\frac{c}{N^2}(r_{13}Z_x - r_{11}N) \quad \frac{\partial y}{\partial X_p} = -\frac{c}{N^2}(r_{13}Z_y - r_{12}N) \quad (11.11)$$

$$\frac{\partial x}{\partial Y_p} = -\frac{c}{N^2}(r_{23}Z_x - r_{21}N) \quad \frac{\partial y}{\partial Y_p} = -\frac{c}{N^2}(r_{23}Z_y - r_{22}N) \quad (11.12)$$

$$\frac{\partial x}{\partial Z_p} = -\frac{c}{N^2}(r_{33}Z_x - r_{31}N) \quad \frac{\partial y}{\partial Z_p} = -\frac{c}{N^2}(r_{33}Z_y - r_{32}N) \quad (11.13)$$

$$\frac{\partial x}{\partial X} = -\frac{c}{N^2}(Nr_{11} - Z_x r_{13}) \quad \frac{\partial y}{\partial X} = -\frac{c}{N^2}(Nr_{12} - Z_y r_{13}) \quad (11.14)$$

$$\frac{\partial x}{\partial Y} = -\frac{c}{N^2}(Nr_{21} - Z_x r_{23}) \qquad \frac{\partial y}{\partial Y} = -\frac{c}{N^2}(Nr_{22} - Z_y r_{23}) \qquad (11.15)$$

$$\frac{\partial x}{\partial Z} = -\frac{c}{N^2}(Nr_{31} - Z_x r_{33}) \qquad \frac{\partial y}{\partial Z} = -\frac{c}{N^2}(Nr_{32} - Z_y r_{33}) \qquad (11.16)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \varphi} = -\frac{c}{N^2} \left[ N \cdot (r_{31}(X - X_P) - r_{11}(Z - Z_P)) - Z_x \cdot (r_{33}(X - X_P) - r_{13}(Z - Z_P)) \right] \qquad (11.17)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \varphi} = -\frac{c}{N^2} \left[ N \cdot (r_{32}(X - X_P) - r_{12}(Z - Z_P)) - Z_y \cdot (r_{33}(X - X_P) - r_{13}(Z - Z_P)) \right] \qquad (11.18)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \omega} = -\frac{c}{N} \left[ \frac{Z_x}{N} \cdot (Z_x \sin \kappa + Z_y \cos \kappa) + N \cdot \sin \kappa \right] \qquad (11.19)$$

$$\frac{\partial y}{\partial \omega} = -\frac{c}{N} \left[ \frac{Z_y}{N} \cdot (Z_x \sin \kappa + Z_y \cos \kappa) + N \cdot \cos \kappa \right] \qquad (11.20)$$

$$\frac{\partial x}{\partial \kappa} = -\frac{c}{N} Z_y \qquad \frac{\partial y}{\partial \kappa} = \frac{c}{N} Z_x \qquad (11.21)$$

## 11.2 Übersicht der verwendeten Bildflugdatensätze

Drei Datensätze der Niedersächsischen Landesvermessung wurden verwendet:

Datensatz	: Warberg, 11.03.1995
Auftraggeber	: Niedersächsisches Landesverwaltungsamt, Landesvermessung
Flug	: Hansa Luftbild GmbH
Blockgröße	: 3*6 Kartenblätter 1:5000, ca. 8*10 km
Bildmaterial	: Color (Kodak SO359)
Aufnahmekammer	: Zeiss RMK TOP 15/23
Brennweite	: $f = 154.006$ mm
Längsüberdeckung	: $p \approx 60\%$
Querüberdeckung	: $q \approx 60\%$
Flughöhe	: $h \approx 1650$ m über Grund
Bildmaßstab	: $m = 1:9000$
Längsstreifen	: 9 zu je 11-13 Bildern (109 Bilder)
Querstreifen	: keine
Paßpunkte	: 23 signalisierte PP, $\pm 0.03$ m Lage und Höhe
GPS Empfänger	: Trimble 4000 SSE
Aufzeichnung	: 2 Hz bewegte Station, ansonsten 1 Hz
Referenzstationen	: Halberstadt (ca. 65 km) Trimble 4000 SSE Hannover (ca. 40 km) Trimble 4000 SSE
Exzentrizität	: $dx = -0.026$ m $dy = -0.006$ m $dz = +1.054$ m

Datensatz	: Groß-Ösingen, 24. April 1994
Auftraggeber	: Niedersächsisches Landesverwaltungsamt, Landesvermessung
Flug	: Hansa Luftbild GmbH, Cessna 404
Blockgröße	: 12 Kartenblätter 1:5000, ca. 8*10 km
Bildmaterial	:
Aufnahmekammer	: Zeiss RMK TOP 15/23
Brennweite	: $f = 153.882$ mm
Längsüberdeckung	: $p \approx 60\%$
Querüberdeckung	: $q \approx 60\%$
Flughöhe	: $h \approx 1300$ m über Grund
Bildmaßstab	: $m = 1:8000$
Längsstreifen	: 10 zu je 14 Bildern (140 Bilder)
Querstreifen	: keine
Paßpunkte	: 43 signalisierte PP, $\pm 0.03-0.04$ m Lage und Höhe
GPS Empfänger	: Trimble 4000 SSE (nur L1)
Aufzeichnung	: 2 Hz
Referenzstationen	: Bildfluggebiet Trimble 4000 SSE Gifhorn (ca. 17 km) Trimble 4000 SSE
Exzentrizität	: $dx = -0.96$ m $dy = +0.60$ m $dz = -1.40$ m (x, y in Blockausgleichung geschätzt, z empirischer Wert)



### 11.3 Übersicht der Blockkonfigurationen

	unabhängige Vergleichspunkte	Paßpunkte
Lage- und Höhekomponente	⊕	⊕⊕
Höhekomponente	○	○
Lagekomponente	□	□

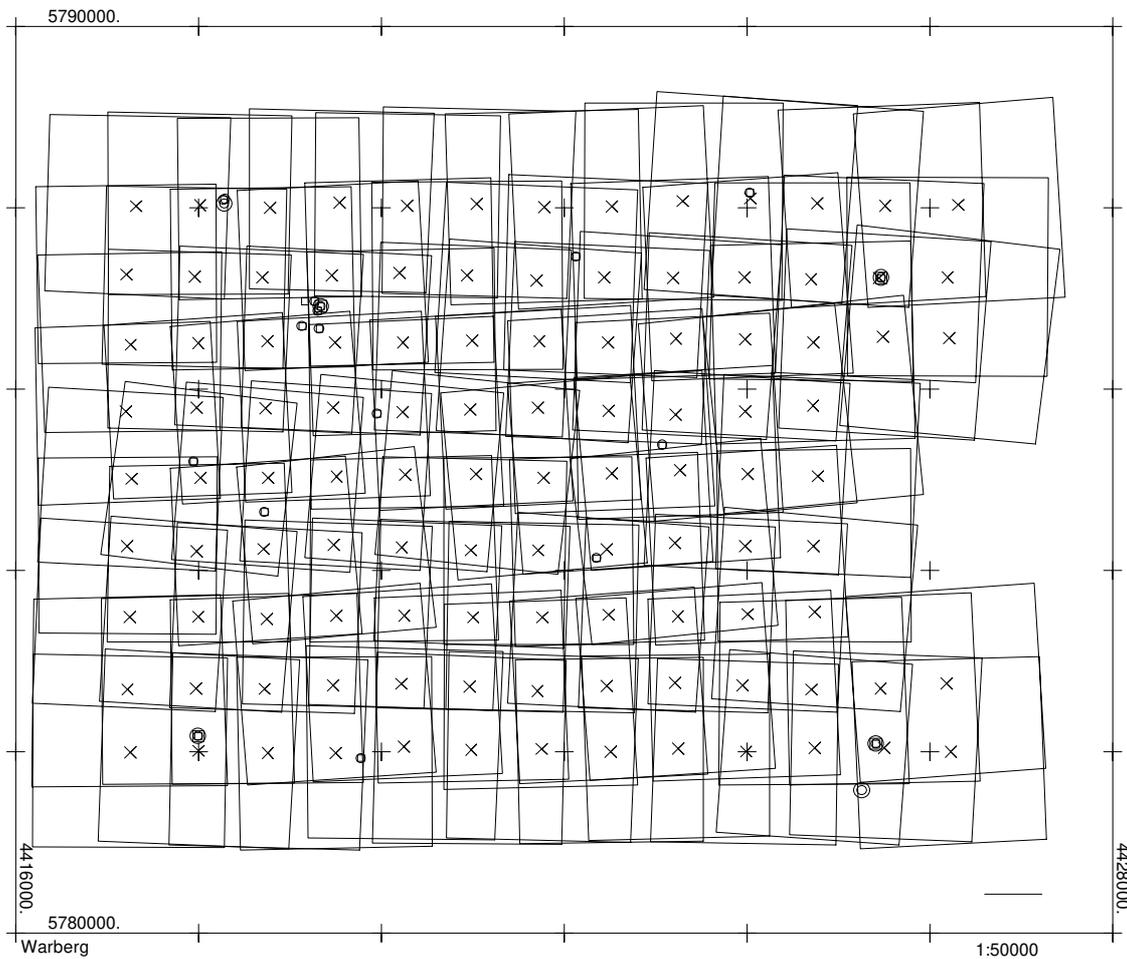


Abb. 11.1: Anordnung der Bilder, Paßpunkte (4 Voll- und 2 Höhenpaßpunkte) und Vergleichspunkte der Befliegung Warberg (alternierende Ost-West Flugrichtung)

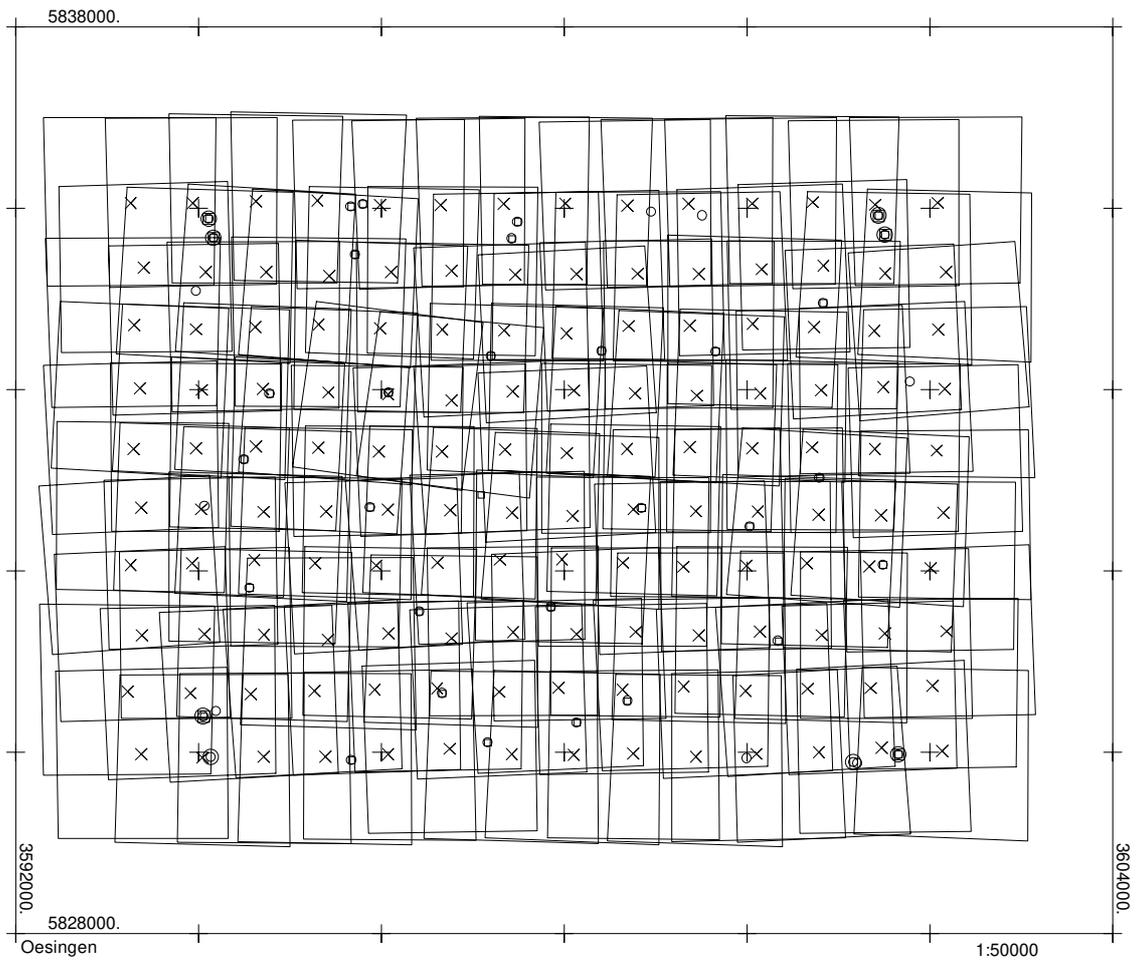


Abb. 11.2: Anordnung der Bilder, Paßpunkte (6 Voll- und 2 Höhenpaßpunkte) und Vergleichspunkte der Befliegung Groß Ösingen (alternierende Ost-West Flugrichtung)

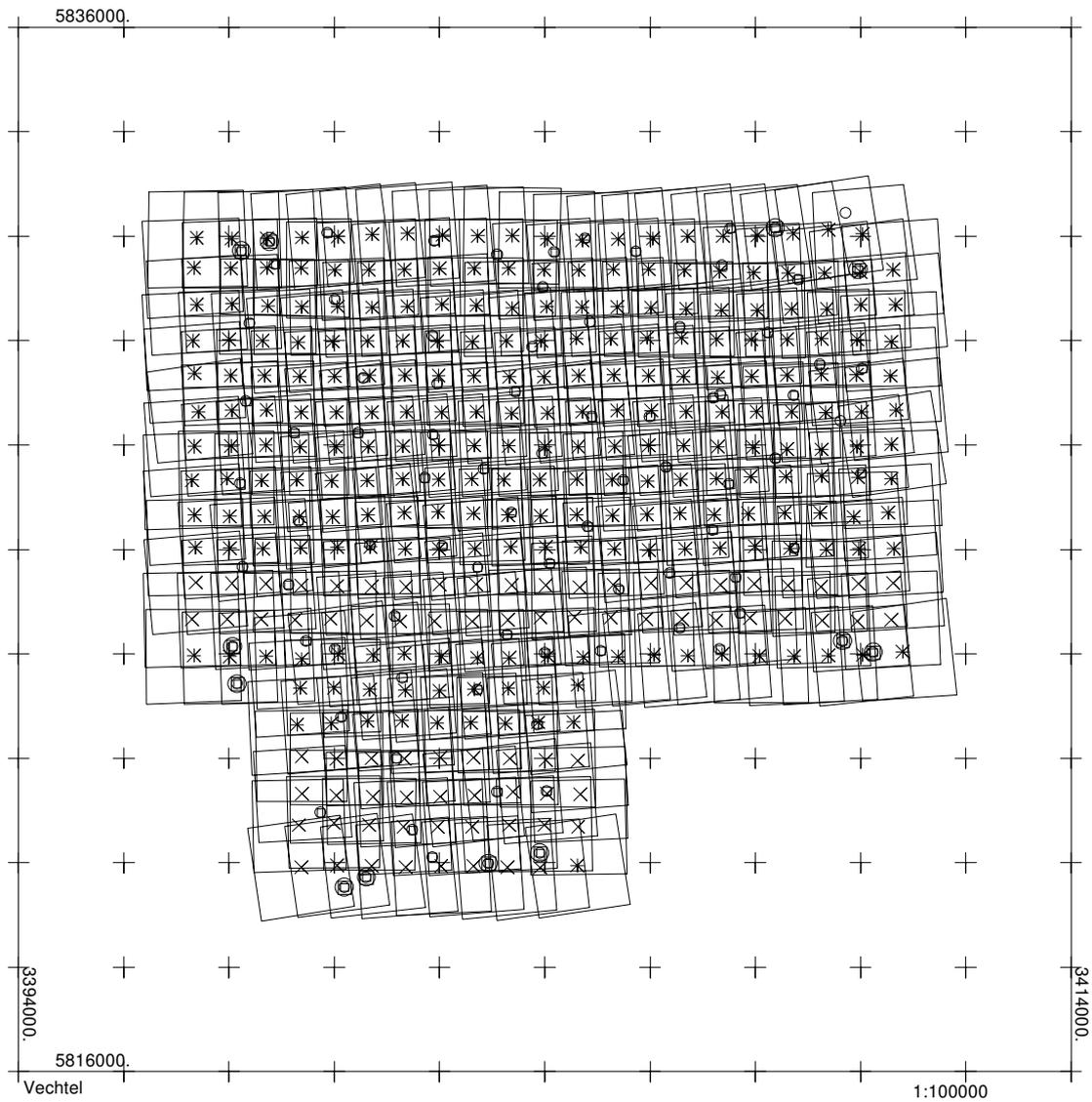


Abb. 11.3: Anordnung der Bilder, Paßpunkte (12 Vollpaßpunkte) und Vergleichspunkte der Befliegung Vechtel (alternierende Ost-West Flugrichtung)

### 11.4 Übersicht der GPS Datenqualität der Bildflugdatensätze

In den Abbildungen 11.4 bis 11.6 sind die Datenqualität der im Vermessungsflugzeug aufgezeichneten GPS Beobachtungsdaten dargestellt. Mehrdeutigkeiten sind für die einzelnen Satelliten durch eine vertikale Markierung nach oben und unten, Signalunterbrechungen nur durch eine Markierung nach unten gekennzeichnet.

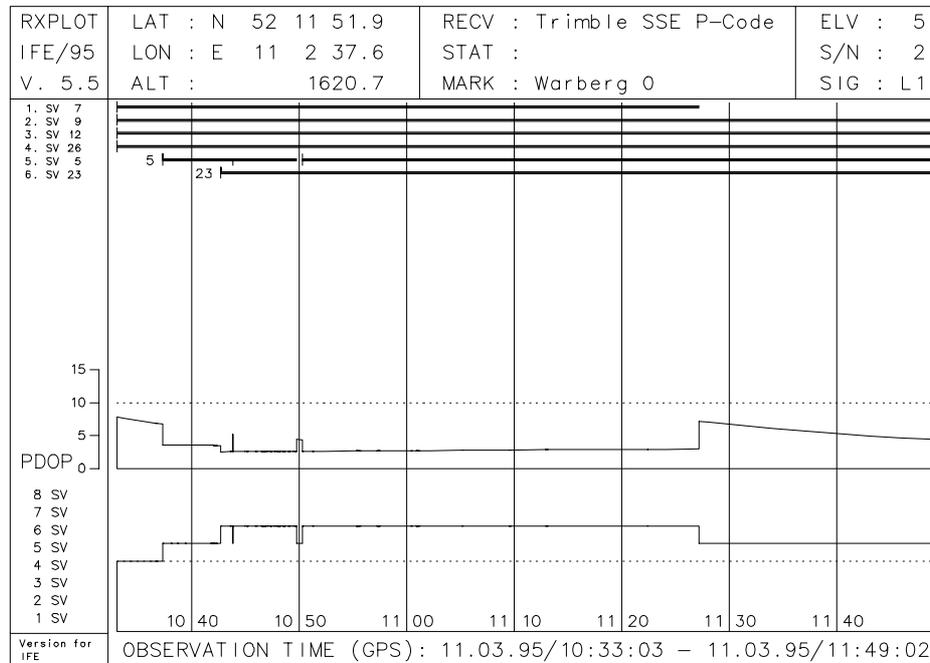


Abb. 11.4: Beobachtete GPS Satelliten mit gekennzeichneten Signalunterbrechungen, Satellitenanzahl und PDOP-Werte der Befliegung Warberg (kinematischer Empfänger im Flugzeug)

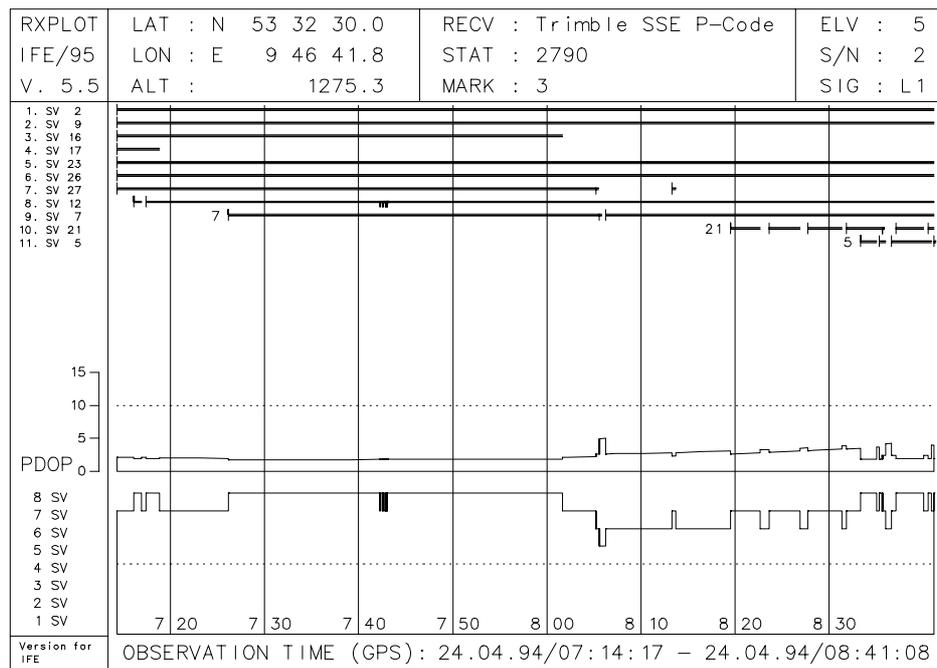


Abb. 11.5: Beobachtete GPS Satelliten mit gekennzeichneten Signalunterbrechungen, Satellitenanzahl und PDOP-Werte der Befliegung Groß Ösingen (kinematischer Empfänger im Flugzeug)

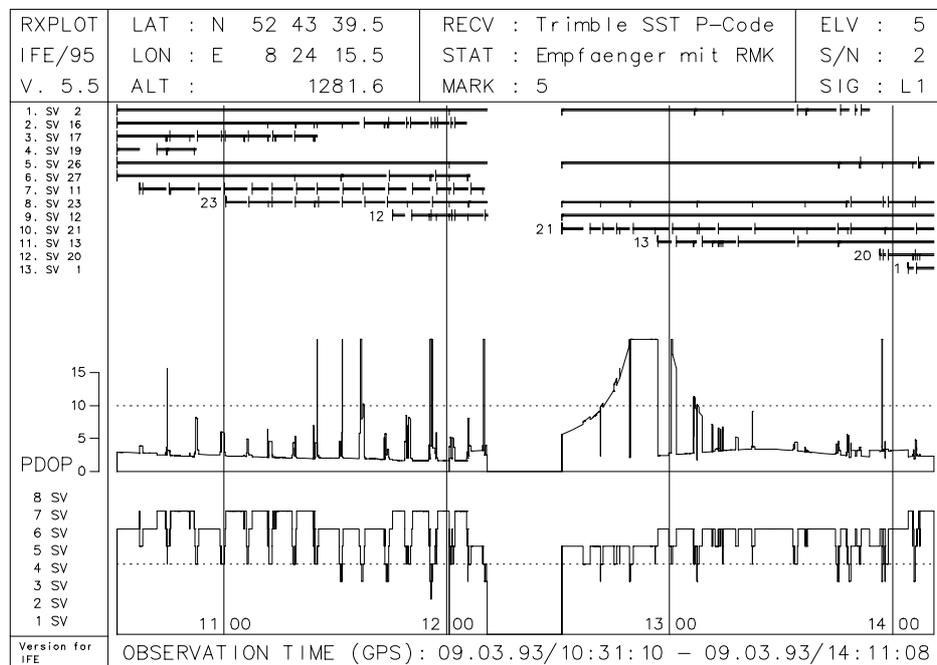


Abb. 11.6: Beobachtete GPS Satelliten mit gekennzeichneten Signalunterbrechungen, Satellitenanzahl und PDOP-Werte der Befliegung Vechtel (kinematischer Empfänger im Flugzeug)

---

---

## Dank

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit in der Arbeitsgruppe Satellitengeodäsie am Institut für Erdmessung (IfE) der Universität Hannover. Meine Tätigkeit am IfE konzentrierte sich zunächst im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Vorhabens “Präzise GPS-gestützte Höhenzuordnung für kontinuierliche Lotungsmessungen auf Gewässern” (MTK 0551) auf Möglichkeiten der hochgenauen kinematischen GPS Anwendungen in der Hydrographie. Die sich anschließenden Arbeiten und Untersuchungen zur strengen GPS Parametrisierung in der Blockausgleichung wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) durch das Forschungsvorhaben “Untersuchungen zur Optimierung der gemeinsamen Ausgleichung von kinematischem GPS und Aerotriangulation” (Se 313/15-1) ermöglicht. Die verwendeten GPS Daten und photogrammetrischen Daten im “GPS-Bildflug”-Forschungsvorhaben wurden freundlicherweise durch das Niedersächsische Landesverwaltungsamt, Abteilung Landesvermessung, Dezernat Photogrammetrie, bereitgestellt.

Das Interesse für das Thema der Dissertation wurde bereits früh durch Gespräche und Diskussionen mit Dr.-Ing. Gerhard Wübbena und Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber während meiner Tätigkeit bei der Prakla Seismos GmbH geweckt. Mein besonderer Dank gilt deshalb Prof. Dr.-Ing. Günter Seeber, der meine Rückkehr und meine Tätigkeit am IfE ermöglichte und das Hauptreferat dieser Arbeit übernommen hat. Besonderen Dank auch Dr.-Ing. Gerhard Wübbena, der den Fortgang der Untersuchungen interessiert verfolgte und mit zahlreichen Anregungen unterstützte.

Das Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessung der Universität Hannover hat das übergreifende und gemeinschaftliche Thema der Arbeit von Beginn an unterstützt. Mein Dank gilt deshalb Prof. Dr.-Ing. Gottfried Konecny, insbesondere für die Übernahme des Korreferat, und Dr.-Ing. Karsten Jacobsen für die gute Zusammenarbeit und anregende Diskussionen.

Hervorheben möchte ich auch die gute Zusammenarbeit mit den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Institut für Erdmessung, die immer für Gespräche und Diskussionen offen waren. Falko Menge, Susanne Schmitz, Christof Völksen und Dr.-Ing. Karsten Jacobsen danke ich für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

Mein herzlicher Dank gilt meiner Familie, besonders meiner Frau und meinen Töchtern Anne und Leni für die Zeit, die sie opfern mußten, damit ich diese Arbeit beenden konnte.

---

---

## Lebenslauf

Martin Schmitz

geboren am 10. November 1962 in Sendenhorst bei Münster

verheiratet, zwei Kinder

- 1969-1973    Kardinal von Galen Grundschule, Sendenhorst
- 1973-1982    Städt. Gymnasium Wolbeck, Münster
- 1982-1983    Aushilfstätigkeiten in Sendenhorst und Ahlen/Westf.
- 03/83-06/83    Praktikum für das Vermessungsstudium in Ahlen/Westf.
- 10/83-03/91    Studium der Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover
- 06/87-06/88    Wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Erdmessung,  
                  Universität Hannover und dem Institut für Vermessungskunde, Technische  
                  Universität Braunschweig
- 08/88-06/89    Auslandsstudium an der University of New Brunswick,  
                  Kanada
- 04/91-09/91    Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Erdmessung, Universität  
                  Hannover, Arbeitsgruppe Satellitengeodäsie
- 10/91-01/94    Geodät bei Prakla Seismos, Hannover, Internationale Grenzvermessung  
                  Oman/Saudi Arabien
- 02/94-12/96    Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Erdmessung, Universität  
                  Hannover, Arbeitsgruppe Satellitengeodäsie
- seit 03/97    Geodät bei Geo++, Garbsen

---

Elektronisch erhältlich unter der folgenden URL Adresse:  
Available electronically at the following URL address:

<http://www.tib.uni-hannover.de>  
<http://www.tib.uni-hannover.de>