



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DISSERTATION

# Ein allgemeiner Ansatz zur Georeferenzierung von multispektralen Flugzeugscanneraufnahmen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der  
technischen Wissenschaften unter der Leitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl Kraus  
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (E122)  
Technische Universität Wien

eingereicht an der Technische Universität Wien  
Fakultät für Naturwissenschaften und Informatik

von

Dipl.-Ing. Christine Ries  
Matr.Nr.: 8926934  
Flurschützstraße 1/21  
A-1120 Wien

Wien, im Oktober 2004

.....



## **Danksagung**

Diese Arbeit wurde vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) unter der Projektnummer P13432-MAT unterstützt.

Das Österreichische Bundesinstitut für Gesundheitswesen (ÖBIG) stellte freundlicherweise die Flugzeugscanneraufnahmen der Messflüge Wien 1997 und Wien 2000 zur Verfügung.

Die Magistratsabteilung MA41 der Stadt Wien hat freundlicherweise die notwendigen Passunterlagen bereitgestellt.



## **Persönliche Danksagung**

Mein besonderer Dank gilt Prof. Karl Kraus für die Betreuung dieser Dissertation und seine Unterstützung insbesondere auch nach meinem Berufswechsel. Ich danke Prof. Georg Gartner für die Übernahme des Koreferats. Meinen ehemaligen Kollegen des Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien danke ich für ihre Unterstützung sowie die angenehme und gute Zusammenarbeit. Dr. Helmut Kager und Dr. Gerald Forkert haben mit ihren theoretischen Arbeiten und deren Implementierung in ORIENT das Fundament für diese Arbeit geschaffen. DI Philipp Stadler hat weiterführende Implementierungen durchgeführt. Dr. Kager gebührt außerdem großer Dank für zahlreiche ausführliche Diskussionen und Anregungen. Bei meinen Kollegen des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen möchte ich mich für ihre Unterstützung und Hilfsbereitschaft bedanken. Und schließlich danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die mich immer wieder ermutigt und meine Motivation gestärkt haben.



## Kurzfassung

Das Bedürfnis nach möglichst aktuellen, rasch verfügbaren und detaillierten Informationen über die Erdoberfläche, z. B. in Form von Orthophotos, hat in den letzten Jahren rapide zugenommen. Zur Erfüllung dieses Bedürfnisses sind flugzeuggetragene digitale Aufnahmesysteme aufgrund ihrer flexiblen Einsatzmöglichkeit und aufgrund des durchgehenden digitalen Datenflusses von der Aufnahme bis zum Endprodukt besonders geeignet. Digitale multispektrale Aufnahmesysteme unterscheiden sich gemäß ihrem Aufnahmeprinzip in digitale Flächenkameras und in zeilenweise aufnehmende Systeme (Scannersysteme); letztere werden weiter unterteilt in Ein- und Mehr-Zeilenkameras sowie Rotationsscanner. Je nach Aufgabenstellung kommen unterschiedliche, zum Teil sehr spezialisierte Systeme zum Einsatz; so bieten beispielsweise Rotationsscanner die Möglichkeit der Aufzeichnung von Thermalstrahlung. Eine wesentliche Voraussetzung für die weitere Nutzung multispektraler Aufnahmen - z. B. in einem geographischen Informationssystem - ist deren Georeferenzierung.

Die Georeferenzierung multispektraler Aufnahmen beinhaltet die Sensororientierung und die nachfolgende Orthophotoherstellung. Für multispektrale Flugzeugscanneraufnahmen werden dabei aufgrund des hoch-dynamischen Aufnahmeverfahrens und der damit verbundenen stetigen Änderung der äußeren Orientierung entlang der Flugbahn erhöhte Ansprüche an das mathematische Modell gestellt. Weiters sind zur Sensororientierung genügend Informationen in Form von Passinformationen am Boden und/oder direkte Beobachtungen der äußeren Orientierungsparameter entlang der Flugbahn notwendig. Letztere werden heutzutage durch den kombinierten Einsatz von Scannersystemen mit integrierten GPS/INS-Systemen (Global Positioning System / Inertial Navigation System) ermöglicht, was dem Einsatz von flugzeuggetragenen Scannersystemen zu einem regelrechten Durchbruch verholfen hat. Dagegen konnten bei älteren multispektrale Scanneraufnahmen die Parameter der äußeren Orientierung noch nicht oder nur zum Teil während des Fluges registriert werden. Die Georeferenzierung solcher Aufnahmen setzt die Verfügbarkeit von genügend Passinformationen am Boden voraus und stellt einen erheblichen Aufwand dar. Dieser Aufwand ist jedoch in Einzelfällen, z. B. wenn die Daten für Zeitreihen von Interesse sind, gerechtfertigt.

Die qualitativ hochwertige Georeferenzierung von multispektralen Scanneraufnahmen mit oder ohne GPS/INS-Unterstützung bedarf eines allgemeinen anwendbaren Ansatzes zur Sensororientierung. In dieser Arbeit wird ein solcher allgemeiner Ansatz präsentiert und seine Praxistauglichkeit an realen Datensätzen erprobt. Der Ansatz wurde am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien entwickelt und im hybriden Ausgleichsprogramm ORIENT implementiert. Zur Modellierung der zeitlichen Variation der äußeren Orientierung entlang der Flugbahn werden zusammengesetzte kubische Polynome verwendet, die in den sogenannten Knotenpunkten mit zumindest erster stetiger Ableitung zusammenstoßen. Die Bestimmung der Orientierungsfunktion kann einerseits indirekt über Passinformationen am Boden (Punkte und Linienelemente) oder/und direkt bzw. integriert mittels GPS/INS-Beobachtungen erfolgen. Zur Erprobung des Ansatzes wurden vom Österreichischen Bundesinstitut für Gesundheitswesen Daten zweier Messflüge von Wien aus den Jahren 1997 und 2000 zur Verfügung gestellt. Bei beiden Flügen kam als Aufnahmesystem der multispektrale Rotationsscanner Daedalus AADS 1268 Airborne Thematic Mapper (ATM) zum Einsatz. Der Messflug 1997 erfolgte noch ohne GPS/INS-Unterstützung, dagegen war für den Messflug 2000 schon GPS/INS-Unterstützung verfügbar. Die erzielte hohe Qualität der Georeferenzierung dieser praktischen Anwendungen bestätigt die Leistungsfähigkeit der präsentierten Methode und ihrer EDV-mäßigen Implementierung.



## Abstract

In recent years the demand for up-to-date, quickly available and detailed information about the Earth's surface, e.g. for orthophotos, is increasing. Airborne digital data acquisition systems help to fulfill this demand as they are flexible in operation and provide the possibility of a fully digital processing chain starting with data acquisition and ending with the final product. Concentrating on digital multi-spectral systems, we can divide them into digital frame cameras and scanning systems (scanners). The latter are subdivided into one- and more-line cameras (push broom scanners) and rotation scanner (whisk broom scanner). Digital systems can be designed to fulfill the requirements of very specialized applications, e.g. rotation scanner enable the acquisition of thermal radiation. For further use, for example in a geographic information system, multi-spectral images have to be geo-referenced.

Geo-referencing consists of the determination of the sensor orientation and the successive orthophoto production. The mathematic model for geo-referencing of multi-spectral scanner images has to provide algorithms for modeling the continuous variation of the exterior orientation along the flight path due to the high dynamic data acquisition. Furthermore for the sensor orientation enough ground control and/or direct observations of the exterior orientation parameters along the flight path are required. Nowadays GPS/INS-systems (Global Positioning System / Inertial Navigation System) enable the direct observation of the exterior orientation parameters; this led to a break through of scanner systems in airborne applications. For older scanner images direct observations of the exterior orientation parameters are not or only partly available. Thus geo-referencing of such older scanner images requires a great amount of ground control information. The large effort of geo-referencing such older scanner images is worth while in special cases, for example for historic interest or if the data are necessary for a time series.

High quality geo-referencing of multi-spectral scanner images with or without GPS/INS-support requires a general approach. In this thesis a general algorithm for sensor orientation is presented and tested with real data sets. The algorithm was developed at the Institute of Photogrammetry and Remote Sensing of the Vienna University of Technology and implemented in the hybrid adjustment program ORIENT. For modeling the variation of the exterior orientation parameters along the flight path piecewise cubic polynomials are used, which are joined together at the so-called nodes with at least the first derivative being continuous. This orientation function can be determined with the help of ground control information (points as well as linear features) and/or GPS/INS-observations. Practical tests of the algorithm were performed with the help of two real data sets of Vienna taken in the years 1997 and 2000 and provided by the Austrian Health Institute (ÖBIG). Both data sets were recorded with the multi-spectral rotation scanner Daedalus AADS 1268 Airborne Thematic Mapper (ATM). For the flight 1997 no GPS/INS-support was available, whereas the flight 2000 was already supported by a GPS/INS-system. The high quality of the practical results proved the high potential of the presented general algorithm and its EDV-implementation.



# Inhaltsverzeichnis

1	EINLEITUNG .....	1
1.1	Anmerkungen zum Begriff „Georeferenzierung“ .....	3
1.2	Übersicht über die Ausarbeitung .....	5
2	DIGITALE MULTISPEKTRALE AUFNAHMESYSTEME .....	6
2.1	Digitale Flächenkameras .....	8
2.2	Ein-Zeilenkameras .....	9
2.3	Drei- und Mehr-Zeilenkameras .....	10
2.4	Rotationsscanner .....	11
3	BEZUGSSYSTEME UND TRANSFORMATIONEN .....	13
3.1	Raumfeste Bezugssysteme .....	14
3.2	Erdfeste Bezugssysteme .....	14
3.2.1	<i>Globale erdfeste Bezugssysteme</i> .....	14
3.2.2	<i>Regionale erdfeste Bezugssysteme</i> .....	16
3.3	Tangentialsystem, lokales Horizontsystem und Koordinatensysteme des Fahrzeugs und der beteiligten Aufnahmesensoren .....	16
3.4	Transformationen .....	17
3.4.1	<i>Zusammenhang Inertialsystem und erdfestes geozentrisches System</i> .....	18
3.4.2	<i>Transformation zwischen geozentrischen Koordinaten und geographische Koordinaten</i> .....	19
3.4.3	<i>Zusammenhang erdfestes geozentrisches System und lokales Tangentialsystem bzw. lokales Horizontsystem</i> .....	20
3.4.4	<i>Zusammenhang lokales Horizontsystem und Körpersystem</i> .....	21
4	GRUNDLAGEN DES GLOBAL POSITIONING SYSTEMS (GPS), INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS (INS) UND DER GPS/INS- INTEGRATION .....	23
4.1	Grundlagen des Global Positioning Systems (GPS) .....	23
4.1.1	<i>GPS-Messgrößen und Beobachtungsgleichungen</i> .....	24
4.2	Grundlagen der Inertialnavigation .....	27
4.2.1	<i>Navigationsgleichungen</i> .....	30
4.3	GPS/INS-Integration .....	32
5	KONZEPTE ZUR GEOREFERENZIERUNG .....	34
5.1	Sensororientierung .....	34
5.1.1	<i>Indirekte Sensororientierung</i> .....	34
5.1.2	<i>Direkte Sensororientierung</i> .....	35
5.1.3	<i>Integrierte Sensororientierung</i> .....	38
5.2	Orthophotoherstellung .....	38

<b>6</b>	<b>MATHEMATISCHES MODELL UND DATENSTRUKTUR IN ORIENT ...</b>	<b>40</b>
6.1	Grundsätzliches zum mathematischen Modell in ORIENT .....	41
6.2	Beobachtete Bildkoordinaten in Aufnahmen von Flächenkameras.....	43
6.3	Beobachtete Passpunkte und beobachtete Parameter .....	45
6.4	Dreidimensionale Modellkoordinaten .....	45
6.5	Fiktive Beobachtungen auf Flächen und Kurven.....	46
6.6	Fiktive Beobachtungen auf dreidimensionalen Raumkurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen .....	48
6.6.1	<i>Grundlagen zur Modellierung von Kurven mittels zusammengesetzter kubischer Polynome .....</i>	<i>49</i>
6.6.1.1	Spline-Interpolation .....	51
6.6.1.2	Schmiege-Interpolation.....	51
6.6.1.3	Akima-Interpolation.....	52
6.6.1.4	Vergleich der Interpolationsmethoden.....	52
6.6.2	<i>Aufstellen der Verbesserungsgleichungen für Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen .....</i>	<i>53</i>
6.6.3	<i>Beispiele für die Anwendung von 3D-Kurven.....</i>	<i>55</i>
6.6.3.1	3D-Kurvenanpassung an gegebene Stützpunkte.....	55
6.6.3.2	3D-Kurvenrekonstruktion (photogrammetrischer Vorwärtsschnitt)..	56
6.6.3.3	3D-Passkurven zur Bestimmung der äußeren Orientierung (photogrammetrischer Rückwärtsschnitt) .....	57
6.6.3.4	Bündelblockausgleichung mit 3D-Kurven.....	57
6.7	Beobachtete Bildkoordinaten in Aufnahmen von Scannersystemen.....	58
6.7.1	<i>Polynom-Orientierung .....</i>	<i>59</i>
6.7.2	<i>Orientierungsfunktion aus zusammengesetzten kubischen Polynomen ..</i>	<i>60</i>
6.7.2.1	Praktische Aspekte zur Bestimmung von Orientierungsfunktionen aus zusammengesetzten kubischen Polynomen.....	62
6.8	Datenstruktur in ORIENT .....	65
<b>7</b>	<b>WIRKUNGSFIGUREN DER EINZELNEN FEHLEREINFLÜSSE.....</b>	<b>68</b>
7.1	Fehler in Roll .....	69
7.2	Fehler in Pitch .....	70
7.3	Fehler in Yaw.....	71
7.4	Fehler in den Positionskomponenten $X_0, Y_0, Z_0$ .....	72
7.5	Zusammenwirken von Fehlern in mehreren Orientierungselementen.....	73
7.6	Wirkungsfiguren der zusätzlichen Polynomkoeffizienten.....	76
7.7	Fehler im Geländemodell.....	77
<b>8</b>	<b>ANWENDUNGSBEISPIELE .....</b>	<b>80</b>
8.1	Datenbeschreibung der Messflüge 1997 und 2000 .....	81
8.1.1	<i>ATM-Daten der Messflüge 1997 und 2000.....</i>	<i>81</i>
8.1.2	<i>GPS/INS-Beobachtungen für den Messflug 2000.....</i>	<i>84</i>
8.1.3	<i>Digitale Mehrzweckkarte von Wien.....</i>	<i>85</i>

8.1.4	<i>Digitales Geländemodell von Wien</i> .....	86
8.2	Arbeitsablauf.....	86
8.2.1	<i>Datenaufbereitung</i> .....	86
8.2.2	<i>Messung der Pass- und Verknüpfungsinformationen</i> .....	87
8.2.3	<i>Bestimmung der Orientierungsfunktionen der ATM-Aufnahmen</i> .....	92
8.2.4	<i>Orthophotoherstellung und Kontrolle</i> .....	92
8.3	Georeferenzierung des Messfluges 1997 – indirekte Sensororientierung ..	93
8.3.1	<i>Bearbeitung des Messfluges 1997 ohne Zusatzinformationen</i> .....	94
8.3.1.1	Bestimmung der Orientierungsfunktion unter Verwendung von Passpunkten.....	96
8.3.1.2	Bestimmung der Orientierungsfunktion unter Verwendung von wenigen Passpunkten mit Unterstützung von Passlinien .....	102
8.3.1.3	Bestimmung der Orientierungsfunktion im Detailbereich ausschließlich mit Hilfe der vorhandenen Passlinien .....	108
8.3.1.4	Bestimmung der Orientierungsfunktion unter Verwendung aller verfügbaren Passinformationen.....	110
8.3.2	<i>Bearbeitung des Messfluges 1997 unter der Verwendung der verfügbaren Zusatzinformationen</i> .....	113
8.3.3	<i>Zusammenfassung der Bearbeitung des Messfluges 1997</i> .....	116
8.4	Georeferenzierung des Messfluges 2000 – integrierte Sensororientierung .....	119
8.4.1	<i>Ergebnisse des Teilblocks aus Streifen 11, 12, 13</i> .....	121
8.4.2	<i>Ergebnisse des Teilblocks aus Streifen 16, 17, 18</i> .....	130
8.4.3	<i>Zusammenfassung der Bearbeitung von Messflug 2000</i> .....	137
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....	139
10	LITERATURVERZEICHNIS.....	141
11	ANHANG .....	147
11.1	Beobachtungskategorien und zugehörige Parameter in ORIENT .....	147



# 1 Einleitung

Das Bedürfnis nach möglichst aktuellen, rasch verfügbaren und detaillierten Informationen über die Erdoberfläche in Form von Orthophotos, Oberflächen- bzw. Geländemodellen, etc. hat in den letzten Jahren rapide zugenommen, sei es im öffentlichen Sektor, bei Umweltorganisationen und Firmen oder bei den einzelnen Bürgern und Grundeigentümern. Die Entwicklung digitaler Aufnahmesysteme für den Flugzeugeinsatz ist ein wesentlicher Schritt zur Erfüllung dieses Bedürfnisses: (i) Verschiedene, zum Teil sehr spezialisierte digitale Systeme ermöglichen die Erfüllung vielfältiger Aufgabenstellungen, (ii) digitale Aufnahmesysteme ermöglichen einen vollständigen digitalen Datenfluss von der Aufnahme bis zum Endprodukt und (iii) bietet der Flugzeugeinsatz gegenüber satellitengetragenen Sensoren die in vielen Anwendungsbereichen erforderliche flexible Einsatzmöglichkeit hinsichtlich Flugzeitpunkt, aufzunehmende Fläche und Wahl der Flughöhe, wodurch verschiedene Maßstabsbereiche abgedeckt werden können.

Die wichtigsten in Photogrammetrie und Fernerkundung eingesetzten Systeme kann man in multispektrale Aufnahmesysteme (passive Systeme), Laserscanner und RADAR-Systeme (aktive Systeme) einteilen. Beschränken wir uns in der Folge auf multispektrale Aufnahmesysteme, so unterscheiden sich diese gemäß ihrem Aufnahmeprinzip in digitale Flächenkameras und in zeilenweise aufnehmende Systeme (Scanner bzw. Scannersysteme). Letztere werden weiter unterteilt in Ein- und Mehr-Zeilenkameras und Rotationsscanner (vgl. Kapitel 2). Je nach Aufgabenstellung kommen unterschiedliche Systeme zum Einsatz: Steht z. B. die spektrale Differenzierbarkeit von Objekten im Vordergrund, werden sogenannte multi- und hyperspektrale Scannersysteme verwendet, Rotationsscanner bieten die Möglichkeit der Aufzeichnung von Thermalstrahlung, und schließlich kann die geometrische Rekonstruktion von Objekten (etwa in Form von Oberflächenmodellen) mit Hilfe von Stereoaufnahmen digitaler Flächenkameras oder Mehr-Zeilenkameras erfolgen.

Eine wesentliche Voraussetzung für die weitere Nutzung multispektraler Scanneraufnahmen z. B. in einem GIS (Geographischen Informationssystem) ist ihre geometrische Rektifizierung in Bezug zum übergeordneten Koordinatensystem (meist das Landessystem). Dieser Prozessierungsschritt wird als Georeferenzierung bezeichnet und beinhaltet die Bestimmung der Sensororientierung und die nachfolgende Orthophotoherstellung (vgl. die Ausführungen zur Terminologie in Abschnitt 1.1).

Während die Georeferenzierung von digitalen Flächenaufnahmen keinen wesentlichen methodischen Unterschied zur Georeferenzierung von herkömmlichen analogen und anschließend digitalisierten Flächenaufnahmen aufweist und somit ein Standardverfahren der Photogrammetrie darstellt, stellt die Georeferenzierung von Scanneraufnahmen erhöhte Ansprüche an das mathematische Modell, welches die aufgrund des hoch-dynamischen Aufnahmeverfahrens stetige Änderung der äußeren Orientierung berücksichtigen muss. Weiters ist der Einsatz von modernen Scannersystemen eng verknüpft mit dem kombinierten Einsatz von integrierten GPS/INS-Systemen (Global Positioning System / Inertial Navigation System), welche die kontinuierliche und direkte Beobachtung der äußeren Orientierungsparameter während der Aufnahme ermöglichen. Erst die Entwicklung von GPS/INS-Systemen hat Scannersystemen im flugzeugbasierten Einsatz zu einem regelrechten

Durchbruch verholten, weil durch die direkten Beobachtungen der äußeren Orientierungsparameter die Georeferenzierung in vielen Fällen überhaupt erst ermöglicht wird bzw. mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand durchgeführt werden kann.

Ältere multispektrale Scanneraufnahmen dagegen sind noch ohne Unterstützung von GPS/INS-Systemen aufgezeichnet worden. Zum Teil wurden zumindest Teilmengen der Orientierungsparameter (z. B. Beobachtungen der Stellungsparameter mit Hilfe von Flugzeugkreisel oder einer kreiselstabilisierten Plattform) registriert. Die Georeferenzierung solcher Scanneraufnahmen setzt die Verfügbarkeit von genügend Passinformationen voraus und stellt einen erheblichen Aufwand dar, der jedoch in Einzelfällen, z. B. wenn die Daten für Zeitreihen von Interesse sind, gerechtfertigt ist.

Die qualitativ hochwertige Georeferenzierung sowohl moderner Scanneraufnahmen (mit GPS/INS-Unterstützung) als auch älterer, historisch interessanter Aufnahmen (ohne GPS/INS-Unterstützung), bedarf eines allgemeinen anwendbaren Ansatzes zur Sensororientierung. Ein solcher allgemeiner Ansatz wurde am I.P.F. (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung) der technischen Universität Wien entwickelt und im hybriden Ausgleichsprogramm ORIENT des I.P.F. implementiert ([Forkert, 1994], [Kager, 1995]). Dieser Ansatz basiert auf zusammengesetzten kubischen Polynomen, welche zur Modellierung der zeitlichen Variation der äußeren Orientierung herangezogen werden. Die einzelnen Segmente dieser sechsdimensionalen Orientierungsfunktion stoßen in den sogenannten Knotenpunkten mit zumindest erster stetiger Ableitung zusammen. Sind die Knotenpunkte bestimmt, so ist die gesamte Orientierungsfunktion definiert. Die notwendige Anzahl der Knoten und deren Verteilung entlang der Orientierungsfunktion hängt von der Dynamik der Flugbewegung ab, je turbulenter die Flugbewegung, desto mehr Knotenpunkte sind notwendig. Die Bestimmung der Orientierungsfunktion kann nun einerseits indirekt über Bodenpassinformationen oder/und direkt mittels GPS/INS-Beobachtungen erfolgen.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgte eine umfangreiche Erprobung des Ansatzes anhand zweier realer Datensätze. Dazu wurden vom Österreichischen Bundesinstitut für Gesundheitswesen (ÖBIG) zwei Messflüge von Wien, aufgenommen mit dem multispektralen Rotationsscanner Daedalus AADS 1268 Airborne Thematic Mapper (ATM), aus den Jahren 1997 und 2000 zur Verfügung gestellt.

Der Messflug 1997 wurde noch ohne GPS/INS-System durchgeführt, womit die Orientierungsfunktionen der Flugstreifen mit Hilfe von entsprechend viel Bodenpassinformationen bestimmt werden mussten. Die Beschaffung von ausreichend vielen und gut verteilten Passpunkten kann selbst im städtischen Gebiet Probleme bereiten. In ORIENT können neben Pass- und Verknüpfungspunkten auch linienförmigen Elemente, die sich als Gerade, Polynome oder als dreidimensionale Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen mathematisch modellieren lassen, verwendet werden. Mit Hilfe des allgemeinen Ansatzes zur Modellierung der Orientierungsfunktion von Flugzeugscanneraufnahmen und unter Verwendung sowohl von Punkten als auch von linienförmigen Elementen als Passinformationen ist es gelungen, diesen Datensatz mit hoher Genauigkeit zu georeferenzieren.

Beim Messflug 2000 kam schon ein GPS/INS-System zum Einsatz, was für die Aufgabe der Georeferenzierung eine erhebliche Erleichterung darstellt. Im einfachsten Fall können GPS/INS-Beobachtungen der äußeren Orientierung direkt für die Orthophotoherstellung übernommen werden. Sind in den GPS/INS-Beobachtungen Datumsdefekte oder Drift-

phänomene enthalten, so können diese im Rahmen einer Ausgleichung mit Hilfe von Passpunkten bestimmt und korrigiert werden. In ORIENT werden dazu die GPS/INS-Beobachtungen als „Beobachtungsmodelle“ für die Orientierungsfunktionen der Flugstreifen eingeführt und mit Hilfe der Passpunkte werden diese GPS/INS-Beobachtungsmodelle bestmöglich eingepasst. Beim Messflug 2000 waren erhebliche Driftphänomene in den GPS/INS-Beobachtungen enthalten, welche jedoch mit Hilfe des in ORIENT verwirklichten allgemeinen Ansatzes korrigiert werden konnten.

Anhand der Bearbeitung der beiden Messflüge aus 1997 und 2000 konnte im Rahmen dieser Arbeit die Praxistauglichkeit des am I.P.F. entwickelten allgemeinen Ansatzes zur Georeferenzierung von Flugzeugscanneraufnahmen gezeigt werden.

## 1.1 Anmerkungen zum Begriff „Georeferenzierung“

Da in der gängigen Literatur verschiedene Begriffe, wie *Georeferenzierung*, *Geokodierung* oder *Sensororientierung*, in zum Teil ähnlicher Bedeutung verwendet werden, erscheint eine kurze Zusammenfassung hinsichtlich der Bedeutung und Verwendung der Begriffe in der Literatur und in dieser Arbeit angebracht.

Gemäß [Ackermann, 1997] entspricht die Herstellung der Georeferenz bzw. die Geokodierung weitgehend dem bekannten Begriff der äußeren oder absoluten Orientierung in der Photogrammetrie. Traditionell erfolgt in der Photogrammetrie die Herstellung der Georeferenz für einen Block von Luftbildern mittels Aerotriangulation, die sowohl zur Bestimmung der dreidimensionalen Objektkoordinaten von Verknüpfungspunkten und sonstiger Objektpunkte als auch zur Bestimmung der äußeren Orientierung der Luftbilder dient. Je nachdem, welche dieser zwei Aufgaben im Vordergrund war, sprach man von *photogrammetrischer Punktbestimmung* oder von *Bildorientierung*. Mit der Entwicklung neuer Sensoren (multispektrale abbildende Sensoren wie digitale Flächen- und Zeilenkameras, Laserscanner, etc.) ist es angebracht, den auf analoge Luftbilder hindeutenden Begriff *Bildorientierung* durch die allgemeinere Form *Sensororientierung* zu ersetzen.

Eine weitere grundlegende Veränderung brachte die in den letzten Jahren entwickelte Möglichkeit, mittels GPS/INS-Systemen die Parameter der äußeren Orientierung eines Aufnahmesensors direkt zu bestimmen. Daher ist der Begriff *Sensororientierung* gemäß [Heipke et al., 2002] weiter zu präzisieren, und man spricht nun von einer *indirekten*, *direkten* oder *integrierten Sensororientierung*, wobei neben der Bestimmung der äußeren Orientierung im Begriff *Sensororientierung* grundsätzlich auch die Bestimmung der zugehörigen Kalibrierungsparameter des Systems (innere Orientierung des Aufnahmesensors und alle Parameter, welche die Beobachtungen der einzelnen beteiligten Sensoren miteinander in Bezug setzen) inkludiert ist.

Die *indirekte Sensororientierung* basiert auf der Verwendung von Pass- und Verknüpfungsinformationen am Boden. Die Parameter der äußeren Orientierung werden nicht direkt beobachtet, sondern indirekt bestimmt. Die *direkte Sensororientierung* basiert allein auf den direkten Beobachtungen der äußeren Orientierung durch das GPS/INS-System. Jedoch muss in diesem Falle die Sensorkalibrierung bekannt und in einem separaten Schritt vorab bestimmt werden. Bei der *integrierten Sensororientierung* werden alle verfügbaren

Informationen, also Pass- und Verknüpfungsinformationen sowie GPS/INS-Beobachtungen, in einer simultanen Ausgleichung genutzt, um die Parameter der äußeren Orientierung und alle relevanten Kalibrierungsparameter „in einem Guss“ zu bestimmen.

In der Fernerkundung werden die Begriffe *Georeferenzierung* und *Geokodierung* häufig für die Herstellung des Bezugs zwischen Bilddaten und Objektkoordinatensystem verwendet. Diese beiden Begriffe betonen die Tatsache, dass die Sensororientierungsparameter im allgemeinen nur ein Nebenprodukt sind, und dass das eigentliche Ergebnis des Prozesses z. B. eine entzerrte Aufnahme im übergeordneten Objektkoordinatensystem ist. Als Ergebnis der Georeferenzierung eines Bildes erhält man demnach ein georeferenziertes Bild, was oft als Synonym für ein Orthophoto verwendet wird. Dabei gibt die Bezeichnung aber noch keine Auskunft darüber, welches mathematische Modell dem Herstellungsprozess des georeferenzierten Bildes zugrunde liegt; z. B. könnte ein zweidimensionaler Interpolationsansatz über einige identische Punkte verwendet worden sein (Voraussetzung ist dabei, dass die Aufnahme nicht sehr stark verzerrt ist und keine großen Inhomogenitäten aufweist [Jansa, 1983]), oder es könnte die Rückprojektion der Aufnahme in das Objektkoordinatensystem unter Verwendung der Sensororientierung und eines digitalen Geländemodells erfolgt sein.

In dieser Arbeit wird der Begriff *Georeferenzierung* in Anlehnung an die Bedeutung in der Fernerkundung verwendet, womit das Ergebnis der Georeferenzierung von multispektralen Flugzeugscanneraufnahmen georeferenzierte Aufnahmen sind. Die georeferenzierten Flugzeugscanneraufnahmen werden aber in Anlehnung an die Photogrammetrie und den Ausführungen in [Kraus, 2002] als Orthophotos bezeichnet. Das ist insofern passend, als dadurch einerseits der Bezug zur Phototextur und zum photoelektrischen Effekt der Entstehung der digitalen Aufnahmen bestehen bleibt und andererseits auch der zugrundeliegende orthogonale Abbildungsvorgang ausgedrückt werden soll. Das heißt, in dieser Arbeit wird unter der Georeferenzierung von multispektralen Flugzeugscanneraufnahmen ein zweistufiges Verfahren verstanden:

1. Sensororientierung mittels indirekten, direkten oder integrierten Ansatz: In dieser Stufe wird der physikalische Abbildungsprozess modelliert und rekonstruiert.
2. In der zweiten Stufe erfolgt die Orthophotoherstellung unter Verwendung der im ersten Schritt bestimmten Sensororientierung und eines digitalen Geländemodells. Dabei wird - anschaulich gesprochen - der Aufnahmeprozess umgekehrt und die Aufnahmen auf die Geländeoberfläche rückprojiziert.

Zur schnelleren Kennzeichnung, welche Art der Sensororientierung (direkt/indirekt oder integriert) bei der Georeferenzierung zur Anwendung gekommen ist, wird im folgenden auch kurz von direkter, indirekter oder integrierter Georeferenzierung gesprochen.

## 1.2 Übersicht über die Ausarbeitung

Zu Beginn dieser Arbeit werden zunächst in Kapitel 2 Vorteile der digitalen Datenaufnahme zusammengefasst und ein Überblick über digitale multispektrale Aufnahmesysteme gegeben. Kapitel 3 beschreibt die für die Bearbeitung von Scanneraufnahmen wichtigsten Bezugssysteme und die Transformationen zwischen diesen Systemen. In Kapitel 4 folgt schließlich aufgrund der großen Bedeutung von GPS/INS-Systemen für die Aufnahme und Bearbeitung von Scanneraufnahmen eine Einführung zu GPS, INS und der GPS/INS-Integration, deren grundsätzliche Funktionsweise und Problempunkte.

In Kapitel 5 erfolgt eine nähere Diskussion der verschiedenen Konzepte der Georeferenzierung (direkt/indirekt/integriert). Kapitel 6 geht ausführlich auf das am I.P.F. entwickelte und in ORIENT implementierte mathematische Modell zur Sensororientierung ein, und den Abschluss dieses Kapitels bildet eine Einführung in die Datenstruktur in ORIENT. Der Theorieteil wird schließlich mit Kapitel 7 abgerundet, in dem Wirkungsfiguren zur Visualisierung verschiedener Fehlereinflüsse gezeigt werden.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse der Anwendung des allgemeinen Ansatzes auf die beiden Messflüge von Wien aus 1997 und 2000 werden schließlich in Kapitel 8 detailliert dargestellt. Den Abschluss der Arbeit bildet Kapitel 9 mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

## 2 Digitale multispektrale Aufnahmesysteme

Waren digitale multispektrale Aufnahmesysteme bis vor wenigen Jahren nur in der Satellitenfernerkundung standardmäßig in Einsatz, so haben flugzeuggetragene digitale Systeme inzwischen einen regelrechten Durchbruch erfahren. Auch die Domäne der analogen Luftbildkamera in der Luftbildphotogrammetrie wird seit kurzem mit kommerziellen digitalen Systemen durchbrochen. Das Systemdesign der digitalen Aufnahmesysteme ist zum Teil sehr unterschiedlich und an spezifische Anforderungen angepasst, wie auch Abb. 2-1 veranschaulicht.

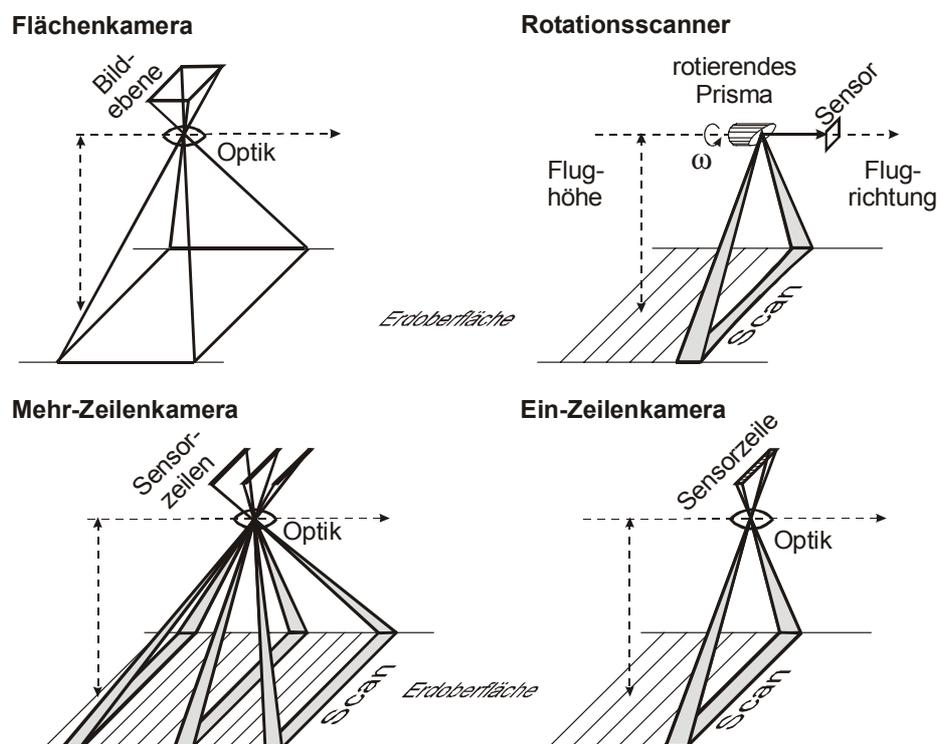


Abb. 2-1: Prinzip verschiedener digitaler multispektraler Aufnahmesysteme: Flächenkamera und Scannersysteme (Rotationsscanner sowie Ein- und Mehr-Zeilenkamera)

Neben dem individuellen Systemdesign sprechen auch folgende Aspekte (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) für digitale Aufnahmesysteme:

- **Zeitlicher Aspekt:** Durch die direkte digitale Datenaufzeichnung sind keine zeitaufwendige Filmentwicklung und anschließende Digitalisierung notwendig. Es besteht von der Bildaufnahme bis zum Endprodukt (z. B. Orthophoto) ein durchgängig digitaler Datenfluss, welcher im Idealfall innerhalb weniger Stunden durchlaufen werden kann. Dieser Aspekt kann z. B. für Aufgaben im Rahmen des Krisenmanagements entscheidend sein.

- Material: Es entfallen Filmmaterial und Entwicklungskemikalien, dafür sind digitale Speichermedien notwendig, welche aber auch zur Sicherung von digitalisierten analogen Luftbildern notwendig sind.
- Archivierung: Über Jahrzehnte wurden zum Teil recht umfangreiche analoge Luftbildarchive aufgebaut. Häufig aus Gründen des raschen und automatisierten Datenzugriffs gibt es auch bei analogen Luftbildarchiven Bestrebungen, zusätzlich digitale Archive aufzubauen. Das heißt, unabhängig von der Art des Aufnahmesensors ist die Langzeitarchivierung großer digitaler Datenmengen zu lösen, was zur Zeit noch eine gewisse Herausforderung darstellt.  
Vergleicht man die Varianten „digitales Archiv von digitalen Aufnahmen“ und „analoges Luftbildarchiv plus digitales Archiv digitalisierter Luftbilder“, so beinhaltet die erste Variante den Nachteil, dass die „Rückversicherung“ des analogen Luftbildarchivs entfällt. Vergleicht man jedoch die erste Variante mit einem rein analogen Luftbildarchiv ohne zusätzliches digitales Archiv der digitalisierten Luftbilder, so ist die „Krisensicherheit“ bei der ersten Variante durch die für ein professionelles digitales Archiv übliche Existenz mehrerer Kopien, welche an verschiedenen Archiv-Standorten gelagert werden, besser gewährleistet als beim rein analogen Luftbildarchiv. Bei letzteren werden nämlich an einem zentralen Archiv-Standort die originalen Luftbilder gelagert, und es existiert in der Regel keine weitere Kopie an diesem oder einem anderen Ort.
- Filmverzug: Der bei photographischen Aufnahmen auftretende Filmverzug aufgrund mechanischer Beanspruchung der Filmfolie oder aufgrund von Temperatureinflüssen während der Entwicklung und Lagerung entfällt bei digitalen Aufnahmen.
- Die Herstellung von Kopien digitaler Aufnahmen kann ohne Qualitätsverlust erfolgen, während die Kopie analoger Aufnahmen praktisch immer mit Qualitätsverlusten behaftet ist.
- Spektrale Auflösung:
  - Das photographische Luftbild ist auf maximal 3 spektrale „Kanäle“ (Filmschichten) beschränkt, während bei der digitalen Aufnahme theoretisch keine Beschränkung der Anzahl der Kanäle besteht.
  - Digitale Sensoren ermöglichen die Aufzeichnung enger, streng abgegrenzter spektraler Bandbreiten, während im photographischen Luftbild keine strenge Trennung zwischen den einzelnen Kanälen möglich ist.
  - Mit digitalen Sensoren ist die Aufnahme eines größeren Bereichs des elektromagnetischen Spektrums möglich. Z. B. kann mit Rotations-scannern auch Thermalstrahlung aufgezeichnet werden.
- Digitale Sensoren ermöglichen eine radiometrische Auflösung von über 12 bit, während analoger Film eine radiometrische Auflösung von ungefähr 8 bit pro Farbkanal unterstützt. ([McGlone, 2004] S. 400)
- Digitale Aufnahmen weisen durch Wegfall der Körnigkeit der Filmschicht deutlich geringeres Rauschen auf, was sich auf automatische Analyseverfahren positiv auswirkt. ([Gruber et al., 2003])

## 2.1 Digitale Flächenkameras

Das Aufnahmeprinzip einer digitalen Flächenkamera entspricht dem der analogen Luftbildkamera: Der analoge lichtempfindliche Film wird durch eine entsprechende Matrix von elektronischen lichtempfindlichen Sensorelementen, einem CCD-array (CCD: charged-coupled device; deutsch: ladungsgekoppeltes Gerät) ersetzt. Die Herausforderung besteht hier darin, CCD-arrays in einer dem analogen Filmformat von 23 cm x 23 cm entsprechenden oder zumindest heranreichenden Größe zu realisieren.

Große CCD-arrays sind noch immer schwierig herzustellen und entsprechend kostenintensiv, daher werden zur Realisierung eines großen Bildformates mehrere CCD-arrays miteinander gekoppelt. Das seit kurzem auf dem Markt erhältliche digitale Kamerasystem DMC (Digital Mapping Camera System) der Firma Z/I Imaging (siehe Abb. 2-2) beinhaltet vier panchromatische Kameras mit je einem CCD-array von 4000 x 7000 Pixel. Aus diesen vier synchron aufgenommenen Einzelbildern wird rechnerisch ein flächenhaftes Bild von 7680 x 13824 Pixel erzeugt. Weitere Kameramodule mit CCD-arrays von 3000 x 2000 Pixel sind zur Aufnahme der multispektralen Kanäle rot, grün, blau und nahes Infrarot vorhanden, womit die Farbaufnahmen im Vergleich zur panchromatischen Aufnahme eine reduzierte räumliche Auflösung aufweisen.

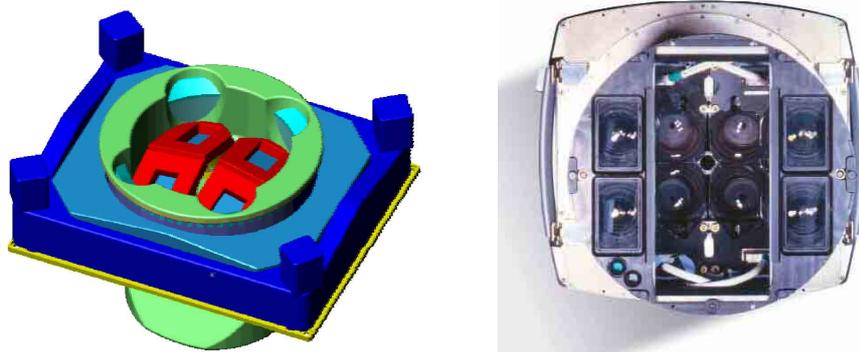


Abb. 2-2: Prinzipskizze der vier panchromatischen Kameramodule der DMC und Ansicht des Sensors mit den vier panchromatischen Modulen in der Mitte und den vier außen angeordneten Farbmodulen (aus [Hinz et al., 2001] bzw. [Z/I Imaging, 2003] © Z/I Imaging).

Eine zweite großformatige digitale Flächenkamera, die UltraCam-D, wird von der Fa. Vexcel Imaging Austria entwickelt. Die UltraCam-D basiert ebenfalls auf mehreren Kameramodulen, jedoch wird hier das große Bildformat nicht durch gleichzeitige Aufnahme von Teilbildern erzeugt, sondern durch kurz hintereinander folgende Aufnahme von Teilbildern, sodass die Teilbilder (theoretisch) am gleichen Aufnahmeort entstehen. Nach der Datenaufzeichnung werden die Teilbilder rechnerisch zu einem Gesamtbild von 11500 x 7500 Pixel zusammengefügt. Auch hier ist die Aufnahme von Farbkanälen in rot, grün, blau und nahes Infrarot mit zusätzlichen Kameramodulen vorgesehen, und die Farbaufnahmen weisen mit 4008 x 2672 Pixel eine reduzierte räumliche Auflösung gegenüber den panchromatischen Bildern auf.



Abb. 2-3: Ansicht der UltraCam-D mit acht Objektiven: vier für die panchromatische Aufnahme (in der Mitte in einer Reihe angeordnet) und vier für die Aufnahme der Farbkanäle (aus [Vexcel Imaging Austria, 2003] © Vexcel Imaging Austria)

Ein Vorteil der digitalen Flächenkameras in Vergleich zu den nachfolgend beschriebenen Scannersystemen ist, dass das bekannte mathematische Modell der Zentralperspektive sowohl für analoge als auch für digitale Flächenaufnahmen angewendet werden kann, und dass daher vielfach bereits bestehende Software für die Prozessierung von digitalisierten analogen Luftbildern hinsichtlich der Bearbeitung der digitalen Flächenaufnahmen nicht adaptiert werden muss.

## 2.2 Ein-Zeilenkameras

Ein-Zeilenkameras (engl. push broom scanner; Abb. 2-1) gehören zur Gruppe der Scannersysteme und tasten die Erdoberfläche zeilenweise ab. In der Bildebene des Aufnahmesystems befindet sich eine CCD-Zeile; die flächenhafte Bildaufnahme erfolgt durch die Vorwärtsbewegung des Flugzeuges. Damit ergibt sich quer zur Flugrichtung eine Zentralprojektion, in Flugrichtung dagegen eine Parallelprojektion.

Damit bei der Datenaufnahme keine Lücken in den Bilddaten entstehen, muss die folgende Bedingung erfüllt sein:

$$v = \frac{d}{dt} \cdot \frac{h}{c} \quad (2-1)$$

mit	$v$	Geschwindigkeit der Plattform
	$d$	Größe des Detektorelements
	$dt$	Integrationsrate
	$h$	Flughöhe
	$c$	Kamerakonstante

Als Beispiele seien die multispektralen bzw. hyperspektralen Scannersysteme DAIS (Digital Airborne Imaging Spectrometer) vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit 79 Spektralkanälen und HyMap von Integrated Spectronics mit mehreren hundert Spektralkanälen genannt ([Heipke, 2003]). Die Anwendungen dieser Systeme liegen beispielsweise in der geologischen Lagerstättenforschung und im Umweltmonitoring.

## 2.3 Drei- und Mehr-Zeilenkameras

Drei- und Mehr-Zeilenkameras sind Scannersysteme, die aufgrund ihrer im Vergleich zu Ein-Zeilenkameras stabileren Geometrie und Stereofähigkeit in Flugrichtung auch für photogrammetrische Anwendungen interessant sind. Das Prinzip beruht auf mehreren CCD-Zeilen, die in der Bildebene des Scanners quer zur Flugrichtung angeordnet sind. Je nach Positionierung der CCD-Zeile in der Bildebene ergibt sich eine vorwärts-, nadir- oder rückwärtsblickende Zeile (siehe Abb. 2-4). Durch die Flugbewegung wird jeder Geländepunkt in allen CCD-Zeilen und damit aus verschiedenen Blickrichtungen abgebildet. Ebenso wie bei den einzeiligen Aufnahmesystemen muss bei Mehr-Zeilenkameras Gleichung (2-1) erfüllt sein.

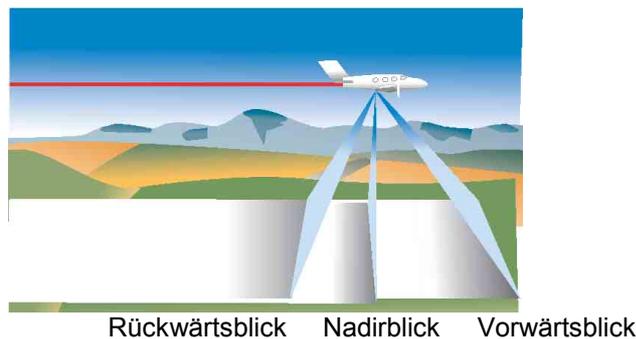


Abb. 2-4: Prinzip einer Drei-Zeilenkamera  
(aus [leica-geosystems, 2003] © leica-geosystems)

Als Vertreter der Mehr-ZeilenKameras seien die HRSC (High Resolution Stereo Camera) des DRL (z. B. [Wewel et al., 1998]) und der ADS40 (Airborne Digital Sensor) der Firma leica-geosystems (z. B. [Fricker, 2001]) erwähnt. Letzterer verfügt über drei panchromatische Zeilen im Rückwärts-, Nadir- und Vorwärtsblick, eine Zeile im nahen Infrarot neben der Nadirzeile und drei Farbzeilen rot, grün und blau im mittleren Vorwärtsblick (siehe Abb. 2-5 a). Ein interessantes optisches Bauelement im ADS40 ist der sogenannte Trichroid Filter (siehe Abb. 2-5 b), der zur exakten spektralen Trennung zwischen den Farbkanälen rot, grün und blau dient.

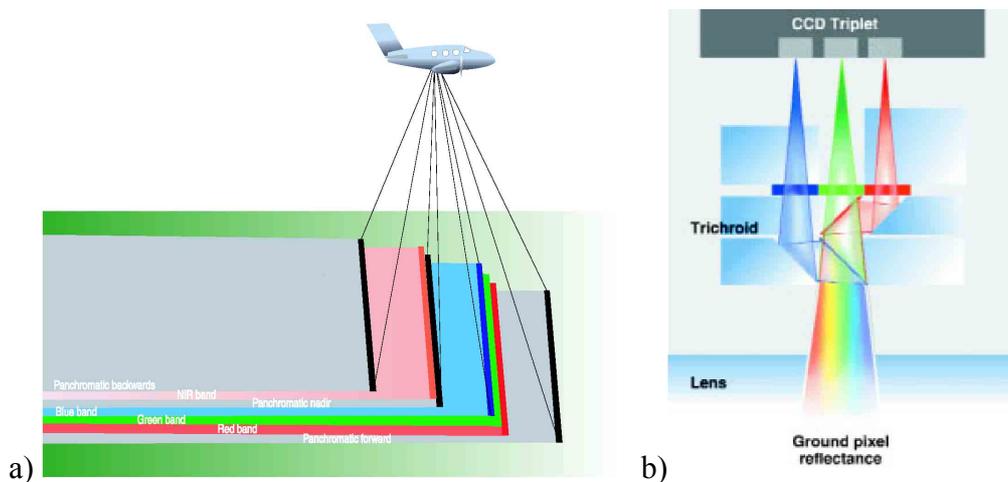


Abb. 2-5: a) ADS40 panchromatische und multispektrale Zeilenanordnung  
b) Prinzip des Trichroidfilters zur exakten Farbtrennung zwischen rot, grün und blau  
(aus [leica-geosystems, 2003] © leica-geosystems)

## 2.4 Rotationsscanner

Rotationsscanner (engl. whisk broom scanner; Abb. 2-1) sind Scannersysteme, die die Aufnahme einer Bildzeile mit Hilfe eines schnell rotierenden Prismas realisieren. Durch die fortschreitende Flugbewegung wird in der Folge die zeilenweise Abtastung der Erdoberfläche erreicht. Im Gegensatz zu den bisher angeführten Systemen ermöglichen Rotationsscanner auch die Registrierung von Thermalstrahlung, welche z. B. für umweltrelevante Fragestellungen interessant sein kann.

Eine mit einem Rotationsscanner aufgezeichnete Zeile (auch Scan genannt) stellt zunächst keine Zentralperspektive wie bei den Zeilenkameras dar, sondern jedes Bildelement ist gemäß der Optik des Sensors gesondert auf die Erdoberfläche zu projizieren, wodurch die Pixelgröße zum Streifenrand hin mit zunehmenden Beobachtungswinkel zunimmt (siehe Abb. 2-6):

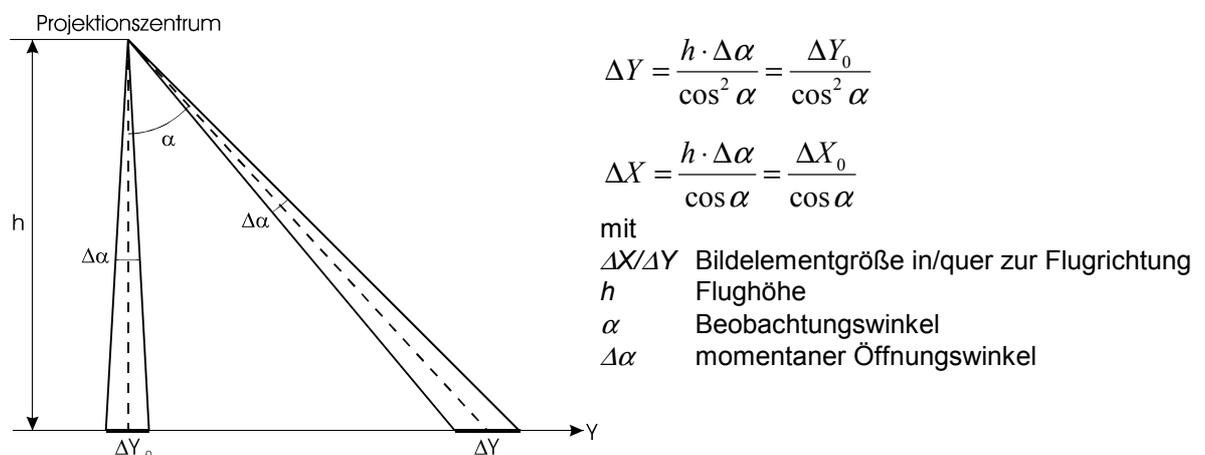


Abb. 2-6: Vergrößerung der Bildelemente zum Streifenrand  
(aus [Kraus und Schneider, 1988])

Bei der Visualisierung der aufgenommenen Bildelemente erhalten jedoch alle Pixel die gleiche Größe, wodurch sich von der Bildmitte zum Bildrand hin eine zunehmende Stauchung ergibt, die sogenannte Panoramaverzerrung. Durch Anbringen der Panoramakorrektur Gleichung (2-2) kann diese Verzerrung beseitigt werden, und danach entspricht jede mit einem Rotationsscanner aufgenommene Bildzeile einer exakten Zentralperspektive [Kraus, 1990].

$$\bar{y} = c \cdot \hat{\alpha} = c \cdot \arctan \frac{y}{c} \Leftrightarrow y = c \cdot \tan \hat{\alpha} = c \cdot \tan \frac{\bar{y}}{c} \quad (2-2)$$

mit

- $\bar{y}$  panoramaverzerrte  $y$ -Koordinate
- $y$  panoramaentzerrte  $y$ -Koordinate
- $c$  Kamerakonstante
- $\hat{\alpha}$  Beobachtungswinkel

Damit die abgetasteten Zeilen in der Streifenmitte lückenlos zusammenschließen, muss folgende Beziehung gelten ([Kraus und Schneider, 1988] S.123):

$$\frac{v}{h} = \Delta\alpha \cdot f \quad (2-3)$$

mit  $v$  Plattformgeschwindigkeit  
 $h$  Flughöhe  
 $f$  Abtastfrequenz  
 $\Delta\alpha$  momentaner Öffnungswinkel

Als Beispiel für einen Rotationsscanner sei der Scanner AADS1268 Airborne Thematic Mapper (ATM) der Fa. Daedalus genannt. Dieser Scanner kann elektromagnetische Strahlung in elf spektralen Kanälen vom sichtbaren Licht bis hin zum thermischen Infrarot aufzeichnen. Weitere Details zu diesem Aufnahmesystem sind in Abschnitt 8.1.1 zu finden.

### 3 Bezugssysteme und Transformationen

Beim Zusammenwirken verschiedener Aufnahme- und Messsensoren, z. B. Scanner mit GPS und INS, werden Messdaten in verschiedenen Koordinaten- und Bezugssystemen erfasst. Eine der Hauptaufgaben besteht darin, diese Systeme zueinander in Bezug zu setzen, sodass die Messdaten von einem System in ein anderes transformiert oder in einem anderen System dargestellt werden können, um die in den Messdaten enthaltenen Informationen bestmöglich nutzen zu können. Es folgt daher eine Betrachtung der wichtigsten Koordinaten- und Bezugssysteme und der Transformationen zwischen diesen Systemen.

Zunächst ein Hinweis zur Terminologie: In der englischen Literatur werden die Bezeichnungen „Coordinate System“ bzw. „Reference System“ und „Coordinate Frame“ bzw. „Reference Frame“ verwendet ([Jekeli, 2001]). Das „System“ beinhaltet das theoretische Modell des Systems mit Konventionen hinsichtlich Ursprung des Systems, die Orientierung seiner Achsen im Raum, aber auch physikalische Gesetze und Konventionen über die Verwendung bestimmter Approximationen und Modellbildungen inklusive zum Beispiel der Festlegung eines bestimmten Zeitsystems. Ein „Frame“ ist schließlich die Materialisierung und konkrete Realisierung eines Referenzsystems mittels einer Anzahl von Punkten und deren Koordinaten, welche unter Einhaltung der für das jeweilige Referenzsystem geltenden Konventionen bestimmt wurden. In diesen „Frame“ können dann beliebige andere Objekte eingebunden werden. Im Deutschen ist die Bezeichnung „Koordinatenrahmen“ oder „Referenzrahmen“ eher unüblich, es wird vielmehr die Bezeichnung „Koordinatensystem“ bzw. „Referenzsystem“ sowohl für das System selbst als auch dessen Realisierung verwendet.

Allgemein wird ein dreidimensionales, kartesisches Koordinatensystem durch einen Ursprung  $O$  und drei aufeinander senkrecht stehende (orthogonale) Einheitsvektoren  $\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{e}_y$  und  $\mathbf{e}_z$  festgelegt, also durch das Dreibein  $(O, \mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z)$ . Ein Punkt in diesem System ist gegeben durch seinen Ortsvektor in Vektorschreibweise

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (3-1)$$

bzw. unter Verwendung der Einheitsvektoren

$$\mathbf{x} = x \cdot \mathbf{e}_x + y \cdot \mathbf{e}_y + z \cdot \mathbf{e}_z . \quad (3-2)$$

$x$ ,  $y$ ,  $z$  sind die Koordinaten (Komponenten) des Punktes. Die Einheitsvektoren  $\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{e}_y$ ,  $\mathbf{e}_z$  werden auch Basisvektoren genannt. Gilt  $\mathbf{e}_z = \mathbf{e}_x \times \mathbf{e}_y$ , dann handelt es sich um ein Rechtssystem, für ein Linkssystem wäre  $\mathbf{e}_z = -\mathbf{e}_x \times \mathbf{e}_y$ .

## 3.1 Raumfeste Bezugssysteme

Raumfeste Bezugssysteme definieren einen Referenzrahmen zur Beschreibung von Objekten am Himmel und der Bewegung eines terrestrischen, mit dem Erdkörper fest verbundenen Referenzsystems. Weiters sind sie für Geodäsie und Navigation von besonderer Bedeutung, weil sie Approximationen von Inertialsystemen (inertia [lat.]: Trägheit) sind, in denen die physikalischen Gesetze eine besonders einfache Form aufweisen. Ein Inertialsystem ist definiert als ein System, in dem die Newtonschen Gesetze gelten; dies impliziert, dass Koordinaten in diesem System die euklidische Geometrie erfüllen. Die Newtonschen Gesetze bilden neben der Basis für die Definition eines Inertialsystems auch die Grundlage für Inertialmesssysteme. Aufgrund des allgegenwärtigen Gravitationsfeldes von Sonne, Planeten, Mond und Erde sind raumfeste Bezugssysteme lediglich Approximationen von Inertialsystemen. Für die Inertialnavigation müssen die Newtonschen Gesetze immer hinsichtlich des umgebenden Gravitationsfeldes modifiziert werden.

Für Anwendungen auf oder in der Nähe der Erdoberfläche wird in der Regel ein im Massenschwerpunkt der Erde gelagertes System verwendet. Die Fundamentalebene bildet der Äquator (Äquatorsystem), die Tertiärachse weist in Richtung der mittleren Erdrotationsachse einer vereinbarten Epoche (Standardepoche), die Primärachse weist in Richtung des zugehörigen mittleren Frühlingspunktes und die Sekundärachse vervollständigt das Rechtssystem (z. B. [Rothacher, 2000]). Die Achsen dieses raumfesten, geozentrischen, äquatorialen Systems bleiben bei der Bewegung der Erde um die Sonne parallel im Raum, d.h. die Rotation der Erde um die Erdrotationsachse wird nicht beschrieben. In Anlehnung daran, dass es sich bei diesem System um die Approximation eines Inertialsystems handelt, wird dieses System auch als „Quasi-Inertialsystem“ bezeichnet.

Die Bestimmung, Überwachung und Bereitstellung eines internationalen raumfesten äquatorialen Systems, des International Celestial Reference System (ICRS), wird vom International Earth Rotation Service (IERS; <http://www.iers.org/iers/>) durchgeführt. Das ICRS steht mit dem erdfesten System, dem International Terrestrial Reference System (ITRS; Abschnitt 3.2), durch die sogenannten Earth Orientation Parameters (EOP) in Verbindung. Unter der Annahme, dass es sich beim raumfesten und beim erdfesten Referenzsystem je um ein geozentrisches System handelt, entfällt die Translation; die Transformation erfolgt durch eine räumliche Drehung bzw. durch eine Serie von hintereinander ausgeführten Drehungen. Die EOP stellen diese Rotation des ITRS bezüglich des ICRS als eine Funktion der Zeit unter Verwendung adaptierter Theorien und Konventionen für Präzession und Nutation der Erdrotationsachse, der Erdbahn im Raum und für die Polbewegung bezüglich der Erdoberfläche dar ([Jekeli, 2001], [McCarthy, 1996]).

## 3.2 Erdfeste Bezugssysteme

### 3.2.1 Globale erdfeste Bezugssysteme

Zur Beschreibung von Positionen und Bewegungen von Objekten oder Punkten, die auf oder in der Nähe der Erdoberfläche lokalisiert sind und die Rotation der Erde mitmachen, werden

gewöhnlich erdfeste Bezugssysteme verwendet. Der Ursprung eines globalen erdfesten Bezugssystems liegt im Massenzentrum der Erde (geozentrisches System), als Fundamentalebene wird die Äquatorebene (äquatoriales System) verwendet, und die Tertiärachse soll möglichst gut mit der Rotationsachse der Erde zusammenfallen.

Das wichtigste globale erdfeste Referenzsystem ist das International Terrestrial Reference System (ITRS), welches ebenfalls vom IERS bestimmt und bereit gestellt wird. Das ITRS wird wie folgt definiert: Der Ursprung liegt im Massenzentrum der Erde inklusive Ozeane und Atmosphäre. Die Orientierung der Achsen ist durch Konvention definiert, sodass die Tertiärachse durch den konventionellen terrestrischen Pol (Conventional Terrestrial Pol (CTP); wurde bis 1987 als Conventional International Origin (CIO) bezeichnet) geht. Der CTP entspricht der mittleren Lage der momentanen Erdrotationsachse während der Jahre 1900-1905. In der zugehörigen Äquatorebene wird eine Nullrichtung definiert (mittlerer Greenwich Meridian), welche die Primärachse spezifiziert. Da die Erde kein starrer Körper ist, sondern sich ständig deformiert, sind sämtliche zeitlichen Deformationen und Verschiebungen der Referenzpunkte, die zur Realisierung des Systems verwendet werden, so genau wie möglich zu modellieren. Für das ITRS wurde definiert, dass die zeitliche Entwicklung der Orientierung des Systems so gegeben sein soll, dass die Referenzstationen gegenüber der Erdkruste im Mittel keine Rotationen aufweisen. Die Berechnung der Bewegung der Stationskoordinaten muss per Konvention gemäß den in den IERS Conventions 1996 ([McCarthy, 1996]) beschriebenen Modellen erfolgen. ([Rothacher, 2000])

Die Realisierung des ITRS heißt International Terrestrial Reference Frame (ITRF) und basiert auf einer Anzahl von weltweit verteilten Stationen. Für verschiedene Jahrgänge wurde vom IERS mit Hilfe der neuesten Resultate der geodätischen Raumverfahren ein neuer ITRF realisiert und mit der Bezeichnung ITRF<sub>xx</sub> publiziert, wobei xx für das letzte Jahr steht, aus dem Beobachtungen für die Realisierung verwendet wurden, z. B. ITRF97. Die bislang letzte publizierte Realisierung ist der ITRF2000 (siehe <http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/>). Eine Realisierung besteht aus einem Satz von rechtwinkligen Koordinaten  $\mathbf{x}(t_0)$  sowie der Geschwindigkeiten  $\mathbf{v}$ , die die zeitliche Entwicklung der Lage der Punkte festlegen;  $t_0$  gibt die zugehörige Referenzepoche an, auf die sich die Koordinaten beziehen. Die Koordinaten  $\mathbf{x}(t)$  der Station zu irgendeinem Zeitpunkt  $t$  können ausgehend von den Koordinaten  $\mathbf{x}(t_0)$  einer Station zur Epoche  $t_0$  mit Hilfe der Geschwindigkeiten wie folgt berechnet werden ([Rothacher, 2000]):

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}(t_0) + \mathbf{v} \cdot (t - t_0)$$

Ein anderes wichtiges globales erdfestes Referenzsystem ist das World Geodetic System 1984 (WGS-84), welches das Bezugssystem für die Broadcast-Ephemeriden (Bahninformationen) des GPS darstellt. Das WGS-84 wird mit etwa 10 global verteilten GPS-Permanentstationen realisiert. Ähnlich wie beim ITRF gibt es auch vom WGS-84 sukzessiv verbesserte Realisierungen, welche durch die GPS-Woche der Implementierung des Systems in der Form (G#) gekennzeichnet werden. Das WGS-84 (G873) und das ITRF97 zeigen nicht signifikante systematische Differenzen von weniger als 2 cm und sind damit praktisch ident. ([Hofmann-Wellenhof et al., 2001] S.29)

### 3.2.2 Regionale erdfeste Bezugssysteme

Für regionale Anwendungen hat ein globales Referenzsystem den entscheidenden Nachteil, dass sich die Koordinaten der Punkte aufgrund der globalen Plattentektonik fortwährend ändern. Daher werden regionale Referenzsysteme festgelegt, welche sich mit den tektonischen Platten mitbewegen. Für Europa wurde ein regionales System definiert, welches hinsichtlich des stabilen Teils der eurasischen Platte fixiert ist. Dieses System stimmt mit dem ITRS zur Epoche 1989.0 überein und heißt European Terrestrial Reference System 89 (ETRS89). Über diesen Zusammenhang ist es möglich, zu jeder Realisierung des ITRS (z. B. ITRFxx) eine zugehörige Realisierung des ETRS89 (z. B. ETRFxx) abzuleiten, wobei sich diese Realisierungen lediglich in der Genauigkeit der Koordinaten der Punkte unterscheiden, aber nicht in der Definition des Systems ETRS89 ([Rothacher, 2000]). Für die Umrechnung von Koordinaten, die im System ITRFxx zu einer Epoche  $t$  gegeben sind, ins ETRS89 bzw. für die Überführung der verschiedenen Realisierungen ITRFxx des ITRS ins ETRS89 gibt es Transformationsvorschriften und entsprechende Sätze von Transformationsparametern, die in [Boucher und Altamimi, 2001] beschrieben und im Internet publiziert sind (siehe <http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/>).

Die klassischen Landesvermessungssysteme (z. B. das österreichische Gauss-Krüger-System) sind ebenfalls in der Gruppe der regionalen erdfesten Referenzsysteme einzuordnen. Durch Definition des geodätischen Datums (Wahl des Bezugsellipsoides und dessen Lagerung und der Abbildungsvorschriften) wird das System definiert, und die Realisierung erfolgt über die Festpunkte der Landesvermessung.

### 3.3 Tangentialsystem, lokales Horizontsystem und Koordinatensysteme des Fahrzeugs und der beteiligten Aufnahmesensoren

Neben den erdfesten Koordinatensystemen benötigt man häufig noch ein lokales kartesisches Koordinatensystem. Je nach Anwendung kann es sich dabei um ein lokales Tangentialsystem oder lokales Horizontsystem handeln. Der Ursprung eines Tangentialsystems liegt in der Regel in der Mitte des Interessensgebietes, und die  $xy$ -Ebene bildet eine Tangentialebene an das Bezugsellipsoid. Gemäß der in der Photogrammetrie üblichen Definition des Systems weist die Primärachse nach Osten, die Sekundärachse nach Norden, und die Tertiärachse vervollständigt das Rechtssystem und weist entlang der Ellipsoidnormalen nach außen; diese Achsdefinition kann kurz als „East-North-Up“ (ENU) bezeichnet werden.

Für Navigationsaufgaben wird zur Beschreibung des Kurses eines Fahrzeugs üblicherweise ein lokales Horizontsystem verwendet, welches sich mit einem bewegten Sensor mitbewegt. Der Ursprung des lokalen Horizontsystems liegt entweder auf dem Ellipsoid oder an der Position des Navigationsinstrumentes. Eine in der Photogrammetrie naheliegende Achsdefinition ist ähnlich wie beim Tangentialsystem „East-North-Up“. Im Bereich der Inertialvermessung wird jedoch üblicherweise die Achsdefinition gemäß „North-East-Down“ (NED) verwendet, womit die Tertiärachse in der Ellipsoidnormalen liegt und in Nadirrichtung („down-direction“) zeigt, die Primärachse läuft parallel der Tangente an den Meridian und zeigt nach Norden, die Sekundärachse zeigt nach Osten und ergänzt zu einem

rechtsdrehenden System. Dieses System wird im Englischen auch als „Navigation Frame“ (*n*-frame) bezeichnet. Das lokale Horizontsystem wird – außer in einem formalen Sinn – nicht zur koordinatenmäßigen Darstellung der Position des Fahrzeuges benutzt, sondern es dient vorwiegend zur Bereitstellung der lokalen Richtungen Nord, Ost und Nadir, entlang derer Geschwindigkeiten von Messgeräten registriert werden.

Auch dem Flugzeug und den beteiligten Aufnahmesensoren sind Koordinatensysteme zugeordnet. Im Falle eines GPS/INS-unterstützten Scannerfluges sind als Aufnahmesensoren zum einen der Scanner und zum anderen das GPS/INS beteiligt. Das Koordinatensystem des Flugzeuges wird üblicherweise als „Körpersystem“ oder im Englischen als „Body Frame“ (*b*-frame) bezeichnet. Die Achsen sind in der Inertialvermessung per Konvention entlang der Vorwärts-, Rechts-Richtung und die Richtung durch den Flugzeugboden definiert, während in der Photogrammetrie eine Definition entlang der Vorwärts-, Links-Richtung und die Richtung durch die Oberseite des Flugzeugs näher liegt.

Das Koordinatensystem des INS wird verwendet, um Instrumentenfehler für analytische Zwecke wie Filterung in einem einheitlichen System zu modellieren und zu identifizieren. Der Ursprung des INS-Systems liegt im Schnittpunkt der Sensorachsen der im INS enthaltenen Beschleunigungsmesser und Kreisel. Im Falle eines trägerstabilisierten Systems (engl.: Strapdown System, Abschnitt 4.2) ist das INS-System ident mit dem Körpersystem, und im Falle eines geographisch stabilisierten Systems (engl.: Local-Level Gimbaled System, Abschnitt 4.2) korrespondiert das INS-System gewöhnlich mit dem lokalen Horizontsystem.

### 3.4 Transformationen

Die Transformation zwischen orthogonalen kartesischen Koordinatensystemen beruht auf der bekannten räumlichen Ähnlichkeitstransformation, wobei vor allem die relative Orientierung der beteiligten Systeme von Belang ist. Unter Vernachlässigung einer etwaigen Verschiebung der beteiligten Koordinatensysteme und eines Maßstabsunterschiedes, welche im Bedarfsfall ergänzt werden können (vgl. Abschnitt 6.1), lässt sich die Transformation eines Vektors  $\mathbf{x}^s$  im Ausgangssystem („source system“) in den Vektor  $\mathbf{x}^t$  des Zielsystems („target system“) in folgender Form darstellen:

$$\mathbf{x}^t = \mathbf{R}_s^t \cdot \mathbf{x}^s \quad (3-3)$$

Dabei beschreibt  $\mathbf{R}_s^t$  die (3×3) Drehmatrix, welche das Ausgangssystem in das Zielsystem überführt. Da es sich bei den beteiligten Koordinatensystemen um orthogonale Systeme handelt, sind drei Drehwinkel zur Beschreibung der relativen Orientierung der beiden Systeme ausreichend. Die Gesamtdrehmatrix  $\mathbf{R}_s^t$  kann auch als drei hintereinander ausgeführten Einzeldrehungen um die Koordinatenachsen dargestellt werden. Die Einzeldrehungen erfolgen jeweils gegen den Uhrzeigersinn, wenn man von der jeweiligen Koordinatenachsenspitze zum Ursprung des Koordinatensystems schaut.

Die Parametrisierung einer Drehmatrix ist nicht eindeutig, und in unterschiedlichen Disziplinen haben sich oft auch unterschiedliche Festlegungen hinsichtlich der „Richtung“ der Drehwinkel (d. h. ob die Winkel das Ausgangssystem ins Zielsystem überführen oder umgekehrt) und der Hierarchie der Drehungen um die Koordinatenachsen eingebürgert.

Gemäß [Kraus, 1997] bewirkt die Drehmatrix  $\mathbf{R}_s^t$  den Übergang vom Ausgangssystem in das Zielsystem, die Drehwinkel sind aber jene Winkel, um die man das Zielsystem drehen muss, um in das Ausgangssystem zu kommen. Legt man die Hierarchie der Drehungen so fest, dass als erstes die Drehung des Zielsystems um die  $x$ -Achse um den Winkel  $\omega$  erfolgt, als zweites die Drehung um die (neue)  $y$ -Achse um den Winkel  $\varphi$  und als drittes die Drehung um die (noch neuere)  $z$ -Achse um den Winkel  $\kappa$  erfolgt, so gilt:

$$\mathbf{R}_s^t = \mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa} = \mathbf{R}_x(\omega)\mathbf{R}_y(\varphi)\mathbf{R}_z(\kappa) \quad (3-4)$$

Wird die Hierarchie der Drehungen anders festgelegt, ist die Reihenfolge der Einzeldrehungen entsprechend auszutauschen. Die Drehmatrizen der Einzeldrehungen um die Koordinatenachsen lauten:

$$\mathbf{R}_x(\omega) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_y(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_z(\kappa) = \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Durch Multiplikation der Matrizen der Einzeldrehungen ergibt sich schließlich:

$$\mathbf{R}_s^t = \mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & -\cos \varphi \sin \kappa & \sin \varphi \\ \cos \omega \sin \kappa + \sin \omega \sin \varphi \cos \kappa & \cos \omega \cos \kappa - \sin \omega \sin \varphi \sin \kappa & -\sin \omega \cos \varphi \\ \sin \omega \sin \kappa - \cos \omega \sin \varphi \cos \kappa & \sin \omega \cos \kappa - \cos \omega \sin \varphi \sin \kappa & \cos \omega \cos \varphi \end{pmatrix} \quad (3-5)$$

### 3.4.1 Zusammenhang Inertialsystem und erdfestes geozentrisches System

Abb. 3-1 zeigt den Zusammenhang zwischen dem (Quasi-)Inertialsystem ( $i$ -System) und einem erdfesten geozentrischen System ( $e$ -System). Beide Systeme haben ihren Ursprung im Geozentrum. Es wird hier der Einfachheit halber angenommen, dass das Inertialsystem und das erdfeste System sich nur um eine Rotation um die Tertiärachse unterscheiden, damit werden die Polbewegung sowie Präzession und Nutation der Erdrotationsachse ignoriert. Wenn  $\omega_e$  die Erdrotationsgeschwindigkeit und  $t$  die Zeit bezeichnen, dann beschreibt  $\omega_e t$  den Rotationswinkel. Die Drehmatrix vom Inertialsystem in das erdfeste System lautet somit:

$$\mathbf{R}_i^e = \begin{pmatrix} \cos \omega_e t & \sin \omega_e t & 0 \\ -\sin \omega_e t & \cos \omega_e t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3-6)$$

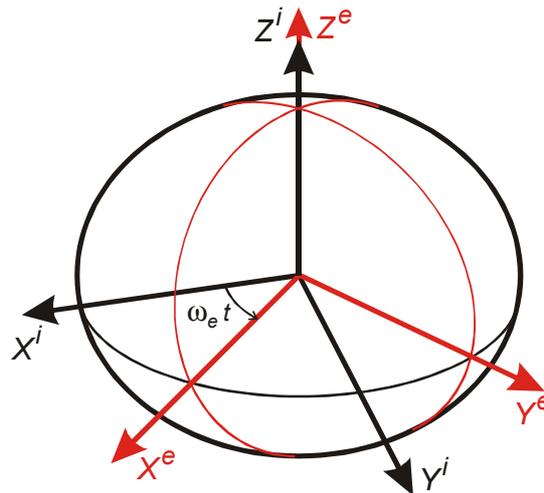


Abb. 3-1: Zusammenhang zwischen Inertialsystem ( $i$ -System) und erdfestes geozentrisches System ( $e$ -System).

### 3.4.2 Transformation zwischen geozentrischen Koordinaten und geographische Koordinaten

Zur Umrechnung zwischen geozentrischen und geographischen Koordinaten ist die Vorgabe eines Referenzellipsoides mit bekannter großer Halbachse ( $a$ ) und der Abplattung ( $f$ ), mit  $f = (a - b) / a$  und  $b$  als kleiner Halbachse, notwendig. Der Zusammenhang zwischen den geozentrischen Koordinaten eines Punktes  $P = (x^e, y^e, z^e)$  und seinen geographischen Koordinaten ( $\lambda, \varphi, h$ ) ist gegeben durch (vgl. Abb. 3-2):

$$\begin{pmatrix} x^e \\ y^e \\ z^e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \\ (N + h) \cos \varphi \sin \lambda \\ (N(1 - e^2) + h) \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (3-7)$$

mit

$\lambda$  ..... geographische Länge

$\varphi$  ..... geographische Breite

$h$  ..... ellipsoidische Höhe

$e^2 = 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2$  ..... Quadrat der 1. numerischen Exzentrizität

$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$  ... Querkrümmungshalbmesser in der geographischen Breite  $\varphi$

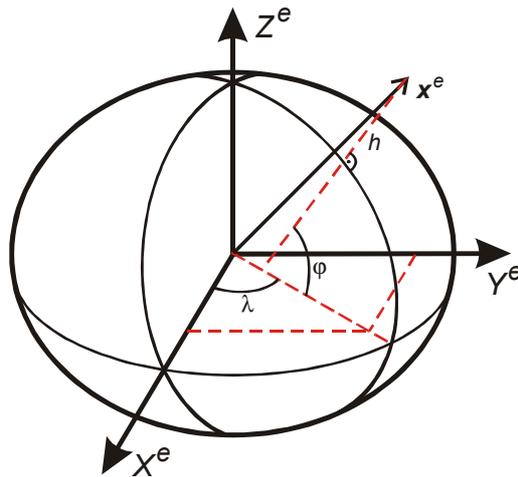


Abb. 3-2: geozentrische und geographische Koordinaten

### 3.4.3 Zusammenhang erdfestes geozentrisches System und lokales Tangentialsystem bzw. lokales Horizontsystem

Bezeichnen  $(\lambda, \varphi)$  die geographischen Koordinaten des Bezugspunktes des Tangentialsystems bzw. des lokalen Horizontsystems (vgl. Abb. 3-3), dann ergibt sich die Transformationsmatrix

$R_l^e$  zu:

$$R_l^e = \begin{pmatrix} -\sin \lambda & -\cos \lambda \sin \varphi & \cos \lambda \cos \varphi \\ \cos \lambda & -\sin \lambda \sin \varphi & \sin \lambda \cos \varphi \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \end{pmatrix} \quad (3-8)$$

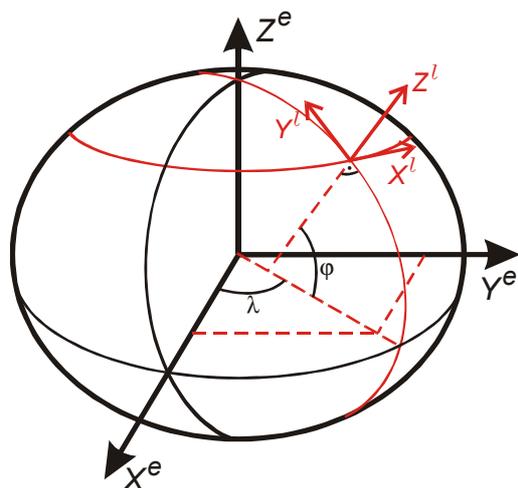


Abb. 3-3: Zusammenhang erdfestes geozentrisches System und lokales Tangentialsystem bzw. lokales Horizontsystem.

### 3.4.4 Zusammenhang lokales Horizontsystem und Körpersystem

Der Zusammenhang zwischen Körpersystem ( $b$ -frame) und lokalem Horizontsystem ist in der Navigation von speziellem Interesse. Die Winkel, die hier die Drehmatrix aufbauen, sind die Navigationswinkel Roll  $ro$ , Pitch  $pi$  und Yaw  $ya$ <sup>1</sup>. Abb. 3-4 zeigt die Definition dieser Winkel gemäß der Luftfahrtnorm ARINC 705, wobei zu beachten ist, dass das lokale Horizontsystem auf einer North-East-Down-Definition (also  $X$  nach Nord,  $Y$  nach Ost und  $Z$  in Nadirrichtung) der Koordinatenachsen aufbaut, und der  $b$ -frame ebenfalls mit  $Z$  durch den Flugzeugboden nach unten definiert ist.

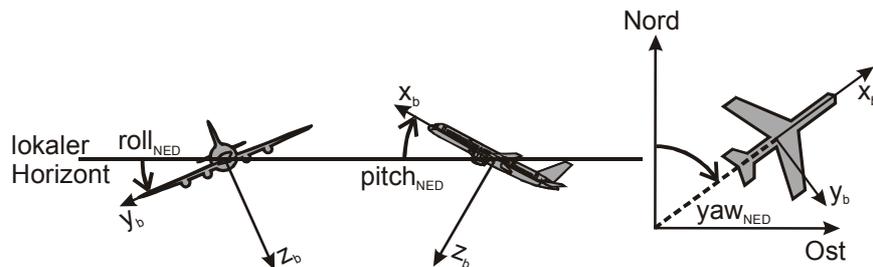


Abb. 3-4: Definition der Drehwinkel Roll, Pitch und Yaw gemäß der Definition in ARINC 705 in einem North-East-Down-Koordinatensystem (nach [Wegmann, 2002]). (Die jeweils projizierende dritte Achse des  $b$ -frames zeigt in der linken Skizze von der Zeichenebene zum Betrachter heraus, in der mittleren und rechten Skizze jedoch vom Betrachter weg.)

In der Photogrammetrie sind in der Regel das lokale Horizontsystem in der Form „East-North-Up“ (ENU), also  $X$  nach Ost,  $Y$  nach Nord und  $Z$  nach oben, und auch der  $b$ -frame mit  $Z$  nach oben definiert. Damit erhalten die Winkel Roll, Pitch und Yaw eine entsprechend andere Definition, welche in folgender Abbildung dargestellt ist:

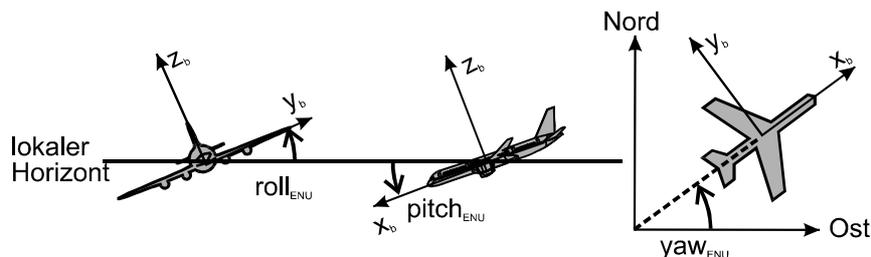


Abb. 3-5: Definition der Drehwinkel Roll, Pitch und Yaw in einem East-North-Up-Koordinatensystem. (die jeweils projizierende dritte Achse des  $b$ -frames zeigt von der Zeichenebene zum Betrachter heraus.)

Beschreiben  $(ro_{NED}, pi_{NED}, ya_{NED})$  gemäß der ARINC 705-Definition eine bestimmte Stellung des Flugzeuges im Raum, so kann über folgende Umrechnung die selbe Stellung des Flugzeuges im Raum im East-North-Up-System mit  $(ro_{ENU}, pi_{ENU}, ya_{ENU})$  beschrieben werden ([Ressl, 2001]):

$$\begin{aligned} ro_{ENU} &= ro_{NED} \\ pi_{ENU} &= -pi_{NED} \\ ya_{ENU} &= 100\text{gon} - ya_{NED} \end{aligned} \quad (3-9)$$

<sup>1</sup> In dieser Arbeit werden für die Navigationswinkel auch im weiteren nur die englischen Bezeichnungen Roll (dt.: Rollwinkel), Pitch (dt.: Nickwinkel) und Yaw (dt.: Kurswinkel) verwendet.

Die Parametrisierung der Drehmatrix für den Übergang vom Körpersystem in das lokale Horizontsystem ergibt sich zu:

$$\mathbf{R}_b^l = \mathbf{R}_{ropiya} = \mathbf{R}_z(ya) \cdot \mathbf{R}_y(pi) \cdot \mathbf{R}_x(ro)$$

$$\mathbf{R}_{ropiya} = \begin{pmatrix} \cos ya & -\sin ya & 0 \\ \sin ya & \cos ya & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos pi & 0 & \sin pi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin pi & 0 & \cos pi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos ro & -\sin ro \\ 0 & \sin ro & \cos ro \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{ropiya} = \begin{pmatrix} \cos pi \cdot \cos ya & -\cos ro \cdot \sin ya + \sin ro \cdot \sin pi \cdot \cos ya & \sin ro \cdot \sin ya + \cos ro \cdot \sin pi \cdot \cos ya \\ \cos pi \cdot \sin ya & \cos ro \cdot \cos ya + \sin ro \cdot \sin pi \cdot \sin ya & -\sin ro \cdot \cos ya + \cos ro \cdot \sin pi \cdot \sin ya \\ -\sin pi & \sin ro \cdot \cos pi & \cos ro \cdot \cos pi \end{pmatrix} \quad (3-10)$$

## 4 Grundlagen des Global Positioning Systems (GPS), Inertial Navigation Systems (INS) und der GPS/INS-Integration

In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen von GPS und INS als Einzelsysteme betrachtet und danach die Integration der beiden Systeme behandelt.

### 4.1 Grundlagen des Global Positioning Systems (GPS)

Das "NAVigation System with Time And Ranging – Global Positioning System", kurz NAVSTAR-GPS oder GPS, wurde ursprünglich für den militärischen Einsatzbereich entwickelt, um weltweit die Navigation (d.h. die Bestimmung der Position und Geschwindigkeit) beliebiger Objekte auf der Erde oder in der Luft mit hoher absoluter und konsistenter Genauigkeit zu ermöglichen. Weitere Zielsetzung des GPS war, die Navigation in Echtzeit, zu jeder Tageszeit und praktisch bei jedem Wetter zu ermöglichen und darüber hinaus, eine genaue Zeitinformation zur Verfügung zu stellen. Neben dem militärischen Nutzen wurde sehr rasch auch die Anwendungsmöglichkeit im zivilen Bereich erkannt.

GPS lässt sich in drei Segmente unterteilen:

- Raumsegment
- Kontrollsegment
- Nutzersegment

Das **Raumsegment** besteht im Allgemeinen aus 24 Satelliten, die in sechs Bahnebenen mit jeweils vier Satelliten die Erde in einer Höhe von rund 20200 km umkreisen. Die Inklination der Satellitenbahnebenen beträgt  $55^\circ$ , und die Umlaufzeit beträgt 12 Stunden (Sternzeit). Damit können von jedem Punkt der Erde und zu jeder Zeit zwischen vier und acht Satelliten mit einem Höhenwinkel von zumindest  $15^\circ$  beobachtet werden.

Die Aufgabe der Satelliten ist das Senden von Signalen, die mit geeigneten Empfängern registriert werden können. Dazu sind in jedem Satelliten eine Uhr (Oszillator), ein Mikroprozessor, ein Sender und ein Empfänger eingebaut. Der Oszillator erzeugt eine fundamentale Frequenz von 10.23 MHz; durch ganzzahlige Multiplikation mit 154 bzw. 120 entstehen zwei Trägerwellen im L-Band, die mit L1 (1575.42 MHz) bzw. L2 (1227.60 MHz) bezeichnet werden. Die Trägerwelle L1 hat eine Wellenlänge von etwa 19 cm und L2 etwa 24 cm. Auf diese Trägerwellen werden zwei Codes, der weniger genaue C/A-Code (Coarse/Acquisition-Code) und der genauere P-Code (Precision-Code), aufmoduliert. Der C/A-Code hat eine Wellenlänge von ungefähr 300 m und ist nur auf die Trägerwelle L1 aufmoduliert, der P-Code hat eine Wellenlänge von 30 m und ist sowohl auf die Trägerwelle

L1 als auch L2 aufmoduliert. Diese Codes stellen Zeitmarken dar und erlauben die Bestimmung des Zeitpunkts der Aussendung des Signals. Schließlich ist beiden Trägerwellen noch die sogenannte Navigationsnachricht aufmoduliert, woraus der Nutzer Bahn- und Systemdaten ableiten kann. (z. B. [Hofman-Wellenhof et al., 2001])

Unter Berücksichtigung der militärischen Zielsetzung des GPS wurden seitens des amerikanischen Verteidigungsministeriums Verfahren zur bewussten Einschränkung der Echtzeitnavigationsgenauigkeit eingesetzt. Einerseits wird durch das sogenannte Anti-Spoofing (A-S) der P-Code zum Y-Code verschlüsselt, der nur noch autorisierten Nutzern zur Verfügung steht, andererseits können durch die sogenannte Selective Availability (SA) die GPS-Grundfrequenz manipuliert und die Bahn- und Satellitenuhrkorrekturdaten in der Ephemeridennachricht künstlich verfälscht werden. SA wurde im Jahr 2000 bis auf weiteres außer Kraft gesetzt.

Das **Kontrollsegment** führt die Gesamtkontrolle des Systems durch. Es besteht aus mehreren Monitorstationen, wobei man zwischen der Hauptkontrollstation, den Monitorstationen und den Bodenkontrollstationen unterscheidet. Die Hauptkontrollstation wertet alle Daten der Monitorstationen aus, führt alle Vorausberechnungen der Satellitenbahnen durch, bestimmt das Verhalten der Satellitenuhren und gibt diese Informationen an die Bodenstationen weiter und ist für die Bahnkorrektur der Satelliten zuständig. Die Monitorstationen registrieren permanent die Daten aller sichtbaren Satelliten und erfassen zusätzlich meteorologische Daten. Sie führen eine Vorverarbeitung der Daten aus und liefern das Ergebnis an die Hauptkontrollstation zur weiteren Verarbeitung. Die Bodenkontrollstationen bestehen im wesentlichen aus einer Bodenantenne, mit der ein- bis dreimal pro Tag die aktuellen Daten der Navigationsnachricht an die Satelliten gesendet wird.

Das **Nutzersegment** wird schließlich von allen Nutzern des Systems gebildet, die mittels entsprechender Empfangsanlagen, den GPS-Empfängern, die GPS-Satelliten beobachten und zur eigenen Positionierung nutzen.

#### 4.1.1 GPS-Messgrößen und Beobachtungsgleichungen

Die GPS-Beobachtungen sind im Grunde Entfernungen, die von gemessenen Zeit- oder Phasendifferenzen abgeleitet werden; die Zeit- oder Phasendifferenzen wiederum werden aus Vergleich des ausgesendeten Signals und des im Empfänger erzeugten Signals bestimmt.

Unter der Annahme fehlerfreier Systeme und Messungen kann durch die Laufzeitfestlegung der Codemessung die Entfernung  $\rho_R^S$  zwischen dem Empfänger  $R$  und dem jeweiligen Satelliten  $S$  als Produkt der Lichtgeschwindigkeit  $c$  und der Laufzeit  $(t - T)$  des Signals bestimmt werden, wobei  $t$  die Empfängeruhrlesung bei Signalempfang und  $T$  die Satellitenuhrlesung bei Signalausendung bezeichnen:

$$\rho_R^S = c \cdot (t - T) \quad (4-1)$$

Unter Berücksichtigung des Satellitenuhrfehlers  $dt$ , des Empfängeruhrfehlers  $dT$  und weiters der Fehlereinflüsse von Satellitenpositionsfehler  $d_p$ , der ionosphärischen bzw. troposphärischen Fehlereinflüsse  $d_{ion}$  bzw.  $d_{trop}$  und des Beobachtungsfehlers der

Pseudoentfernung  $\varepsilon_p$  ergibt sich die sogenannte (Code-) Pseudoentfernung  $p_R^S$  (engl.: (code-) pseudorange) aus (z. B. [Wells, 1987]):

$$p_R^S = \rho_R^S + c \cdot (dt - dT) + d_\rho + d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon_p \quad (4-2)$$

Mittels GPS-Pseudoentfernungsmessung ist neben den drei unbekanntem Stationskoordinaten noch zusätzlich der Uhrenoffset zu bestimmen, womit simultane Pseudoentfernungsberechnungen zu mindestens vier verschiedenen Satelliten notwendig sind (vgl. Abb. 4-1). Dies entspricht der sogenannten Navigationslösung, welche hauptsächlich in der Echtzeit-Navigation zur Einzelpunktbestimmung mit eingeschränkter Genauigkeit verwendet wird. Die verbleibenden Modellfehler des Satellitenpositionierungsfehlers, der ionosphärischen und troposphärischen Fehlereinflüsse und der Satelliten- und Empfängeruhrfehler müssen entweder modelliert werden oder durch geeignete Prozessierungsansätze (Differenzbildung) beseitigt bzw. reduziert werden.

Für die Trägerphasenmessung oder auch Phasen-Pseudoentfernung (engl. phase-pseudorange) gilt folgende Beobachtungsgleichung (z. B. [Wells, 1987]):

$$\Phi_R^S = \rho_R^S + c \cdot (dt - dT) + \lambda N + d_\rho - d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon_\Phi \quad (4-3)$$

Durch Vergleich der Phasenlage des im Empfänger generierten Referenzsignals mit dem vom Satelliten empfangenen frequenzverschobenen Signal wird die Trägerphasenmessung durchgeführt. Der Vergleich der Phasenlage ist nur innerhalb einer Wellenlänge möglich, damit kann der Bruchteil einer Wellenlänge sehr genau bestimmt werden, die ganzzahlige Anzahl  $N$  von vollständigen Wellenzügen ist aber zunächst unbekannt.  $N$  wird als Phasenmehrdeutigkeit bzw. Ambiguität (engl.: ambiguity) bezeichnet. Die Phasenmehrdeutigkeit ist für jeden beobachteten Satelliten verschieden, bleibt aber während der Messung konstant, solange keine Signalunterbrechungen oder Phasensprünge (Cycle Slips) auftreten. Auch bei den Trägerphasenmessungen müssen die Fehlerterme modelliert oder durch Differenzbildung eliminiert werden.

Für Navigationsaufgaben ist auch die Ableitung von Geschwindigkeiten in Echtzeit aus GPS-Beobachtungen von Interesse. Dazu werden die Frequenzverschiebungen der Trägerwellen zufolge des Dopplereffekts beobachtet. Aus Änderung der Signalfrequenz bei bewegtem Sender bzw. Empfänger, welche proportional der relativen Geschwindigkeit zwischen Sender und Empfänger ist, lässt sich die Geschwindigkeit ableiten.

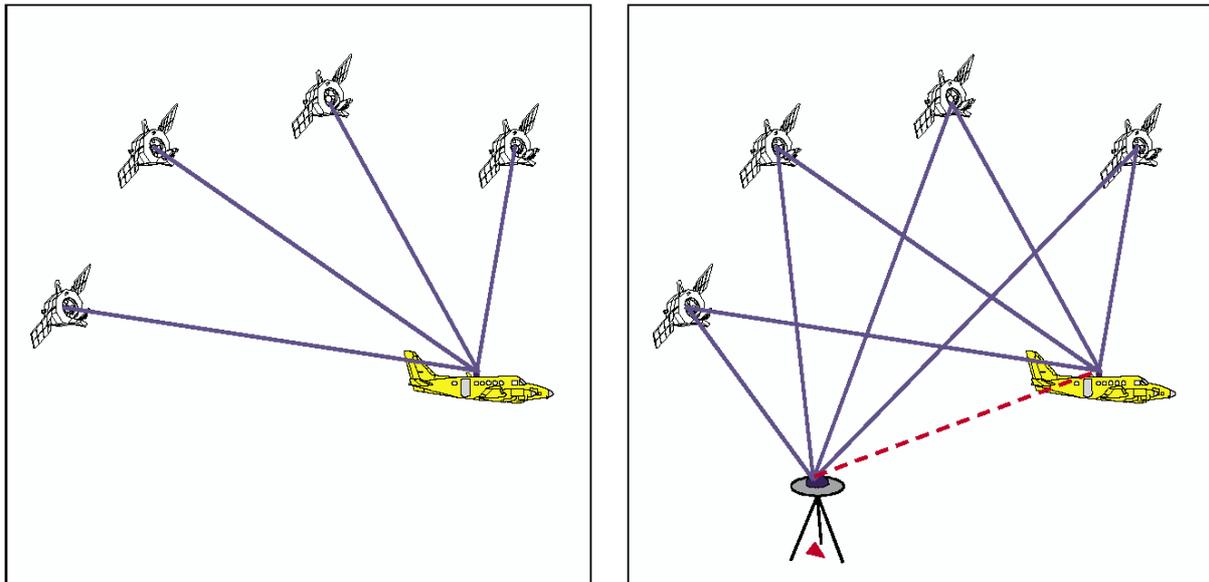


Abb. 4-1: links: Prinzip der absoluten GPS-Positionierung (Navigationslösung);  
rechts: Prinzip der relativen GPS-Positionierung (differenzielle  
Positionierung); (aus [Cramer, 2001])

Der Übergang von der absoluten Positionsbestimmung zu einer relativen Positionsbestimmung (vgl. Abb. 4-1) ermöglicht eine wesentliche Genauigkeitssteigerung. Bei der relativen Punktbestimmung werden simultan von zwei Empfängern dieselben Satelliten beobachtet, dabei ist ein Empfänger an einem bekannten Punkt (Referenzstation) stationiert, und die Position des zweiten Empfängers (Rover) ist zu bestimmen. In der bekannten Referenzstation kann der Einfluss obiger Fehlerterme exakt bestimmt werden, und diese ermittelten Korrekturwerte können an den Beobachtungen des Rover-Empfängers angebracht werden, wodurch sich eine wesentliche Genauigkeitssteigerung ergibt. Voraussetzung dafür ist, dass die beiden Empfänger benachbart sind und sich die Fehlereinflüsse bei beiden Empfängern gleich auswirken; dann können diese Fehlereinflüsse durch Linearkombination der Beobachtungsgleichungen eliminiert werden. Man spricht bei diesem Positionierungsverfahren auch von differenziellem GPS (dGPS).

Die erzielbare Genauigkeit der Positionsbestimmung mit GPS für hochkinematische Anwendungen, wie sie im Flugzeugeinsatz vorkommen, hängt im wesentlichen von der gewählten GPS-Beobachtungsgröße und der Beobachtungs-/Auswertemethode ab und reicht vom Zehnermeterbereich für Code-Navigationslösungen (Echtzeit-Positionierung) bis hin zum cm-Bereich bei differentiellen Verfahren und post processing unter Verwendung von Trägerphasenmessungen (z. B. [Schwarz, 1996], [Skaloud und Schwarz, 1998], [McGlone, 2004] S. 702). Zu beachten ist jedoch auch, dass hochkinematische Anwendungen besonders anfällig für Phasensprünge und Signalabbrisse während der Kurvenflüge möglich sind. Daher können die Genauigkeiten der GPS-Positionierung je nach Testkonfiguration variieren [Cramer, 2001].

## 4.2 Grundlagen der Inertialnavigation

Im folgenden wird ein kurzer Überblick über die Inertialnavigation gegeben, wobei sich diese Ausarbeitung hauptsächlich auf [Jekeli, 2001] stützt.

Inertialnavigation (lat. Inertia: Trägheit) kann definiert werden als die Echtzeit-Bestimmung der Position und Geschwindigkeit eines bewegten Objektes unter Verwendung von Sensoren, die auf der Basis von Newtons Grundgesetze der Dynamik reagieren. Das Bezugssystem, in dem die Newtonschen Gesetze gelten, ist das Inertialsystem. Als Sensoren kommen in einem Inertialnavigationssystem (INS) Beschleunigungsmesser (engl. accelerometer), welche die lineare Beschleunigung messen, und Kreisel (engl. gyroscope oder gyro), welche die Winkelgeschwindigkeit bzw. Drehrate registrieren, zum Einsatz. Es gibt auch Sensoren, welche die Winkelbeschleunigung erfassen können, jedoch werden diese aufgrund ihrer im Vergleich zu Kreiseln geringeren Genauigkeit nicht in der Inertialnavigation verwendet.

Die Sensoren eines Inertialnavigationssystems werden auch als Inertialmesseinheit (engl. inertial measurement unit (IMU)) bezeichnet, wobei manchmal mit IMU der einzelne Inertialsensor, also Beschleunigungsmesser oder Kreisel, bezeichnet wird, oder es ist – wie auch im folgenden – mit IMU der Zusammenschluss mehrerer Beschleunigungsmesser und Kreisel zu einer Einheit gemeint. Ein Inertialnavigationssystem beinhaltet schließlich neben der IMU auch einen Computer, welcher die notwendigen Transformationen und Berechnungen durchführt, um aus den registrierten Sensordaten die gesuchte Position, Geschwindigkeit und Stellung des Fahrzeuges im gewünschten Koordinatensystem ableiten zu können (vgl. Abb. 4-3).

Die Inertialnavigation beruht nun im wesentlichen auf der Integration der von den Beschleunigungsmessern registrierten Beschleunigungen nach der Zeit, um die Geschwindigkeit zu erhalten, und einer zweiten Integration wiederum nach der Zeit, um die Position zu bestimmen. Für eine dreidimensionale Positionierung sind demnach drei orthogonal angeordnete Beschleunigungsmesser notwendig. Da sich die gemessenen Beschleunigungen im allgemeinen aber nicht direkt auf das für die Navigation gewünschte Koordinatensystem beziehen, müssen die gemessenen Beschleunigungen in das gewünschte Koordinatensystem transformiert werden. Dazu sind Richtungsinformationen notwendig, welche von drei, entsprechend den drei Drehachsen orthogonal angeordneten Kreiseln geliefert werden.

Unter dem Begriff Mechanisierung (engl. mechanization) versteht man einerseits die physische Anordnung der Inertialsensoren relativ zum Fahrzeug; die IMU ist entweder fest oder mittels Kardanringe mit dem Fahrzeug verbunden. Durch verschiedene Mechanisierungen kann das System von der Fahrzeugbewegung isoliert und hinsichtlich spezieller Koordinatensysteme für die Navigation optimiert werden. Der Begriff Mechanisierung eines INS kann sich aber auch auf das Koordinatensystem beziehen, in dem die Navigationsgleichungen gelöst werden, unabhängig von der physischen Konstruktion des Systems. In diesem Sinne spiegelt die Mechanisierung die Komplexität der Lösung der Navigationsgleichungen und auch die Eignung eines Koordinatensystems für die Anwendung wider.

Man unterscheidet grundsätzliche zwei Typen der Mechanisierung:

- Plattformstabilisierte Mechanisierung (engl. stabilized platform), wird auch Plattformsystem oder halbanalytisches System genannt (Abb. 4-2)
- Trägerstabilisierte Mechanisierung (engl. strapdown = dt. festschnallen), wird auch trägerorientiertes oder analytisches System genannt (Abb. 4-3)

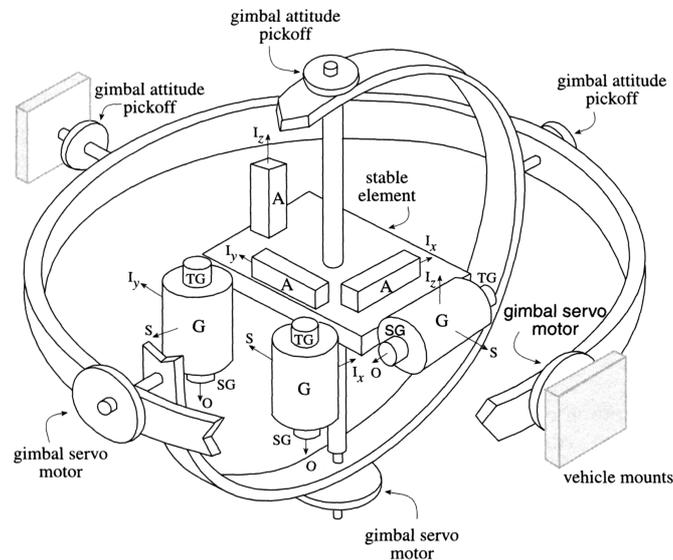


Abb. 4-2: Schematische Darstellung eines INS in plattformstabilisierter Mechanisierung (kardanische Aufhängung) (aus [Jekeli, 2001])

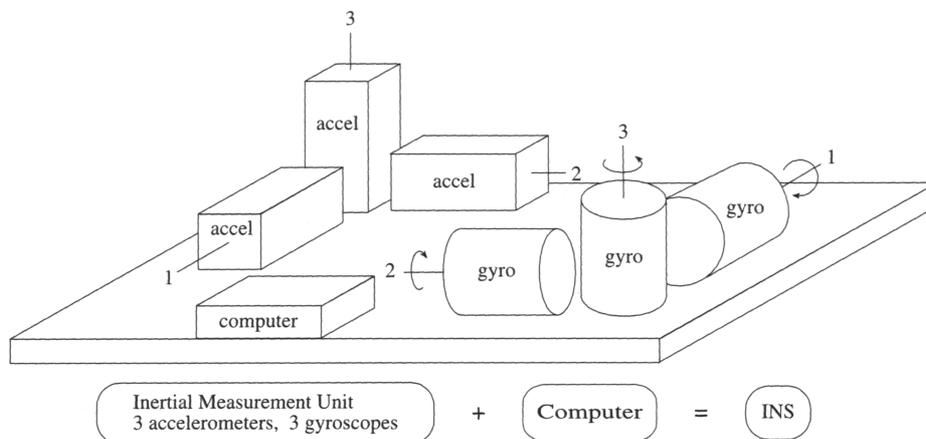


Abb. 4-3: Schematische Darstellung eines INS in trägerstabilisierter Mechanisierung mit Inertialmesseinheit und Computer (aus [Jekeli, 2001])

Bei **plattformstabilisierten Systemen** befindet sich die IMU auf einer kardanisch aufgehängten Plattform, womit die Orientierung der IMU von den Bewegungen des Fahrzeuges weitestgehend entkoppelt ist. Mit Hilfe der Kreismessungen werden die Servomotoren an den kardanischen Achsen gesteuert, welche die Plattform hinsichtlich des gewünschten Koordinatensystems (Inertialraum bzw. lokaler Horizont) stabil halten. Man unterscheidet weiter in raumstabilisierte Systeme (space stabilized mechanization) und geographisch stabilisierte Systeme (local-level mechanization). Raumstabilisierte Systeme

behalten ihre Orientierung in Bezug zum Inertialraum während des gesamten Einsatzes bei, die Orientierung der IMU ist damit im Idealfall völlig entkoppelt von den Rotationsbewegungen des Fahrzeuges. Bei geographisch stabilisierten Systemen werden die Messachsen gemäß der Erdrotation und der Bewegung des Fahrzeugs entsprechend nachgeführt, sodass die Plattform parallel zum lokalen Horizont gehalten wird. Darüber hinaus kann es wünschenswert sein, die Plattform direkt gemäß der Nordrichtung auszurichten (engl. north-slaved), womit die Messungen direkt im North-East-Down-System anfallen. Diese local-level north slaved Stabilisierung kann mit einer geeigneten Anfangsinitialisierung des Systems bewerkstelligt werden.<sup>1</sup>

Der Vorteil plattformstabilisierter Systeme liegt darin, dass die Inertialsensoren hier nur für einen sehr kleinen Messbereich ausgerichtet sein müssen, in dem sie aber sehr genau messen können. Dementsprechend sind die genauesten INS dieser Gruppe zuzuordnen. Weiters fallen die Messungen gleich in einem System an, in dem die Navigationsrechnungen durchgeführt werden können. Allerdings führt der hohe mechanische Aufwand für die kardanische Aufhängung zu hohen Kosten. Außerdem sind die mechanischen Teile sehr empfindlich und verschleißanfällig, was zu einem erhöhten Ausfallrisiko führt.

Bei einem **trägerstabilisierten System** ist die IMU mit dem Fahrzeug fest verbunden, die inertialen Sensoren sind der vollen Bandbreite der Fahrzeugdynamik ausgesetzt, sie müssen also einen größeren Messbereich abdecken und erreichen nicht die hohe Genauigkeit der Sensoren der plattformstabilisierten Systeme. Die Transformation der Messdaten in ein für die Navigationsrechnung geeignetes System erfolgt hier nicht mechanisch, sondern rein rechnerisch. Den Nachteilen, geringere Genauigkeit und höherer Rechenaufwand, stehen aber einige bedeutende Vorteile gegenüber: keine aufwendige Mechanik und auch optische Kreisel können verwendet werden, weniger Verschleiß und geringeres Ausfallrisiko, kleiner, leichter, geringerer Stromverbrauch, viel geringere Kosten. Vor allem aufgrund des Kostenfaktors sind in mittleren und niedrigen Genauigkeitsstufen fast ausschließlich trägerstabilisierte Systeme zu finden.

Eine Einteilung der INS gemäß ihrer Genauigkeit erfolgt in drei Klassen (hohe – mittlere – niedrige Genauigkeit) je nach Positionsfehler (Ablage) nach einer Stunde ungestützter Navigation (Tab. 4-1). Bezüglich ihres (militärischen) Einsatzbereiches werden im Englischen diese INS Genauigkeitsklassen auch „strategic grade“ (hohe Genauigkeit), „navigation grade“ (mittlere Genauigkeit) und „tactical grade“ (niedere Genauigkeit) genannt. Die in der folgenden Tabelle angegebenen Neigungsgenauigkeiten beziehen sich auf Roll und Pitch, für den Kurswinkel Yaw muss eine um den Faktor 3-5 schlechtere Genauigkeit angenommen werden. Da die Absolutgenauigkeit sich mit der Zeit verschlechtert, sind die Genauigkeiten für mehrere Zeitintervalle angegeben. Wie im Abschnitt 4.3 noch genauer ausgeführt wird, kann durch geeignete externe Stützinformation (GPS) die Verschlechterung der Genauigkeit mit der Zeit verhindert werden (gilt für hohe und mittlere Genauigkeitsstufen) ([Cramer, 2001]).

---

<sup>1</sup> In der Nähe des Pols führt die local-level north-slaved Stabilisierung zu numerischen Problemen bei der Integration der Beschleunigungen (Division durch  $(\cos \varphi)$  führt am Pol zu einer Division durch Null). Zur Umgehung des Problems wird die horizontal ausgerichtete Plattform um die Vertikale um das sogenannte „Wander-Azimuth“ gedreht. Die Plattform wird also nicht nach Norden, sondern gemäß einem anderen Azimuth ausgerichtet. Weitere Details dazu siehe [Jekeli, 2001].

Zeitintervall	Systemgenauigkeit		
	hoch	mittel	niedrig
Position [m]			
1 h	300 – 500	500 – 1000	200000 – 300000
1 min	0.3 – 0.5	0.3 – 1	30 – 50
1 s	0.01 – 0.02	0.02 – 0.05	0.3 – 0.5
Neigung [°]			
1 h	0.003 – 0.008	0.003 – 0.008	1 - 3
1 min	0.0003 – 0.0005	0.001 – 0.003	0.2 – 0.3
1 s	< 0.0003	0.0008 – 0.001	0.01 – 0.03

Tab. 4-1: Genauigkeitsklassen für INS (nach [Schwarz,1996] und [Cramer, 2001])

## 4.2.1 Navigationsgleichungen

Wie schon erwähnt, basiert die Inertialnavigation auf den Newtonschen Gesetzen. Gemäß dem ersten Newtonschen Gesetz (Trägheitsgesetz oder Impulserhaltungssatz) bleibt in einem Inertialsystem ein Körper in Ruhe (oder in gleichförmiger Bewegung), wenn keine Kräfte auf ihn wirken. Das zweite Newtonsche Gesetz, das Aktionsgesetz oder Grundgesetz der Dynamik, besagt, dass die Beschleunigung  $\ddot{\mathbf{x}}$  eines Körpers mit der (trägen) Masse  $m_i$  gleich ist der Summe der angreifenden Kräfte  $\mathbf{F}$  (Gleichung (4-4)), und vor allem darauf bauen die Inertialsensoren auf:

$$\mathbf{F} = m_i \cdot \ddot{\mathbf{x}} \quad (4-4)$$

Anmerkung zur Notation: Punkte über einer Variable bezeichnen Ableitungen dieser Variablen nach der Zeit; ein Punkt die erste Ableitung, zwei Punkte die zweite Ableitung.

Unter Berücksichtigung des umgebenden Gravitationsfeldes wird das zweite Newtonsche Gesetz in Gleichung (4-4) modifiziert zu

$$m_i \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{F} + m_g \mathbf{g} ,$$

wobei  $\mathbf{g}$  den Vektor der Gravitationsbeschleunigung und  $m_g$  die Gravitationsmasse bezeichnen.

Und unter der Anwendung des Äquivalenzprinzips  $m_i = m_g = m$  und mit  $\mathbf{a} = \mathbf{F}/m$  folgt:

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{a} + \mathbf{g} . \quad (4-5)$$

$\mathbf{a}$  stellt die Beschleunigung durch eine physikalische angreifende Kraft dar; die Beschleunigung wird auch als spezifische Kraft (specific force; Kraft pro Masseneinheit) bezeichnet.

Alle Größen beziehen sich auf das Inertialkoordinatensystem, was in der Folge durch den hochgestellten Index  $i$  verdeutlicht wird. Die Differentialgleichung 2. Ordnung (4-5) lässt sich in ein System von Differentialgleichungen 1. Ordnung (4-6) überführen.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}^i &= \mathbf{v}^i \\ \dot{\mathbf{v}}^i &= \mathbf{a}^i + \mathbf{g}^i \end{aligned} \quad (4-6)$$

Werden die linearen Beschleunigungen  $\mathbf{a}^i$  nicht im Inertialraum gemessen, sondern wie z. B. beim trägerstabilisierten INS im körperbezogenen  $b$ -System, dann sind die linearen Beschleunigungen mittels einer orthogonalen Transformationsmatrix  $\mathbf{R}_b^i$  vom  $b$ -System in das  $i$ -System zu transformieren:

$$\mathbf{a}^i = \mathbf{R}_b^i \cdot \mathbf{a}^b \quad (4-7)$$

$$\text{mit } \dot{\mathbf{R}}_b^i = \mathbf{R}_b^i \cdot \boldsymbol{\Omega}_{ib}^b$$

$$\text{und } \boldsymbol{\Omega}_{ib}^b = [\boldsymbol{\omega}_{ib}^b \times] = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ -\omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ \omega_2 & -\omega_1 & 0 \end{pmatrix}$$

$\boldsymbol{\Omega}_{ib}^b$  bezeichnet dabei die schiefsymmetrische Matrix der gemessenen Drehraten  $\boldsymbol{\omega}_{ib}^b$  vom  $b$ -System relativ zum  $i$ -System.

Auf ähnliche Weise kann man den Gravitationsvektor  $\mathbf{g}^i$  mittels der Rotationsmatrix  $\mathbf{R}_e^i$  vom erdbezogenen  $e$ -System ins  $i$ -System transformieren:

$$\mathbf{g}^i = \mathbf{R}_e^i \cdot \mathbf{g}^e$$

Zusammengefasst ergeben sich nun die Navigationsgleichungen zur Bestimmung der Position, Geschwindigkeit und Stellung eines Körpers im  $i$ -System:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}^i \\ \dot{\mathbf{v}}^i \\ \dot{\mathbf{R}}_b^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}^i \\ \mathbf{R}_b^i \cdot \mathbf{a}^b + \mathbf{R}_e^i \cdot \mathbf{g}^e \\ \mathbf{R}_b^i \cdot \boldsymbol{\Omega}_{ib}^b \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

Im  $i$ -System weisen die Navigationsgleichungen (4-8) ihre einfachste Form auf. Mit Hilfe entsprechender Transformationen können sie aber auch in ein erdfestes  $e$ -System oder in das lokale Horizontsystem ( $l$ -System) überführt werden, wobei dazu auf weiterführende Literatur verwiesen wird, z. B. [Jekeli, 2001], [Cramer, 2001]. Die Berechnung im  $e$ -System ist von Vorteil für die Kombination von INS-Daten mit GPS-Beobachtungen, weil die Ergebnisse der Navigationsgleichungen dann direkt im Bezugssystem des GPS vorliegen. Die Berechnung im  $l$ -System wird für Navigationsanwendungen üblicherweise bevorzugt.

Die fortgesetzte Integration und Lösung der Navigationsgleichungen basiert auf einer bekannten Anfangsposition und Anfangsausrichtung (engl. initial alignment), welche vor dem eigentlichen Messeinsatz zu bestimmen und vorzugeben sind. Die Anfangsausrichtung wird bei plattformstabilisierten Systemen mechanisch realisiert, während sie bei trägerstabilisierten Systemen rechnerisch durchgeführt wird, wobei die Anfangsdrehmatrix  $\mathbf{R}_b^l$  vom  $b$ -System ins  $l$ -System bestimmt wird.

Die Anfangsausrichtung kann statisch, also bei ruhendem INS, oder dynamisch beim bewegten INS durchgeführt werden. Die statische Anfangsausrichtung erfolgt im allgemeinen in zwei Stufen, in einer Grobausrichtung (coarse alignment) und der nachfolgenden Feinausrichtung (fine alignment). Da das INS in Ruhe ist (d.h. keine relative Bewegung zur Erde ausführt), beruhen die Sensormessungen alleine auf der Erdrotation und der Schwerkraft, woraus eine Näherung für die Anfangsausrichtung bestimmt werden kann. In der nachfolgenden Feinausrichtung wird durch die Messung von Referenzgeschwindigkeiten

(in diesem Fall Nullgeschwindigkeitsmessungen) und über eine Kalman-Filterung die Grobausrichtung verbessert. Die statische Anfangsausrichtung dauert in etwa 10-15 Minuten, was z. B. im Flugbetrieb relativ ungünstig ist. Daher spricht sehr viel für eine dynamische Anfangsausrichtung, welche schnell und während des Fluges durchgeführt werden kann, indem über bestimmte Flugmanöver Beschleunigungen in allen drei Sensorachsen hervorgerufen werden. Voraussetzung ist dabei, dass während der Initialisierungsphase kontinuierliche und hinreichend genaue Referenzmessungen der Position und Geschwindigkeit (z. B. durch GPS) zur Verfügung stehen.

### 4.3 GPS/INS-Integration

Die mathematische Integration von GPS und INS erfolgt vielfach mittels Kalman-Filterung. Filterung, als Teilbereich der generellen Theorie der Schätzung, schätzt in optimaler Weise den Zustand eines Systems zu einer bestimmten Zeitepoche basierend auf allen Beobachtungen und Messungen, die vor dieser Epoche erfolgt sind. Das System ist in diesem Fall das integrierte GPS/INS-System und die Fehler des Systems werden zum sogenannten Zustandsvektor zusammengefasst, der die Abweichung aller Größen von ihren wahren Werten und damit den Zustand des Systems beschreibt. Der Zustandsvektor enthält Fehler der Positions-, Geschwindigkeits- und Neigungsbeobachtungen sowie die Fehler der Sensorik, z. B. Offset und Drift der Inertialsensoren. Vor allem bei Navigationsanwendungen hat sich der Kalman-Filter mit der rekursiven Lösung des Problems durchgesetzt. Dieser setzt voraus, dass die gesamte Information, die für die nächste Zeitepoche notwendig ist, in der aktuellen Epoche verfügbar ist. Der zu einer bestimmten Zeitepoche rekursiv berechnete Schätzer resultiert also aus allen Beobachtungen bis zu dieser Zeitepoche.

Man kann bei der Datenintegration zweier Systeme (GPS und INS) mittels Kalman-Filter zwischen einem zentralen und dezentralen Ansatz unterscheiden ([Cramer, 1999]). Beim zentralen Ansatz wird ein gemeinsamer Zustandsvektor zur Beschreibung des Fehlerverhaltens beider Systeme verwendet. Vorteil ist, dass die unmittelbaren GPS-Beobachtungen (Pseudoentfernung, Trägerphasenmessung, Doppler) in den Filter einfließen und nicht die schon vorprozessierten Größen für Position und Geschwindigkeit. Nachteilig ist aber, dass bei einer eventuellen Erweiterung des Systems um eine weitere Komponente der gesamte Filter neu zu konzipieren ist. Dagegen werden im dezentralen Filteransatz mehrere separate Filter formuliert, die zunächst separat angewendet werden. Beim integrierten GPS/INS-System werden die GPS-Daten zunächst mit einem eigenen lokalen Filter prozessiert, d.h. Positionen und Geschwindigkeiten werden optimal bestimmt. Diese vorprozessierten Daten fließen anschließend sozusagen als „Pseudo“-Beobachtungen gemeinsam mit den INS-Daten in den zweiten Filter (Master-Filter) ein, und aus dieser Filterung ergeben sich schließlich die gesuchten Positions-, Geschwindigkeits- und Neigungsinformationen. Vorteil des dezentralen Ansatzes ist die Erweiterbarkeit um weitere Komponenten ohne bestehende Teilfilter verändern zu müssen. Die Vorprozessierung hat aber auch noch den weiteren Vorteil, dass dadurch etwaige grobe Fehler in den Daten bereinigt werden, bevor sie als Stützinformationen in den Master-Filter einfließen.

Sollen alle Beobachtungen des gesamten Messvorganges in den Schätzprozess einfließen, so führt dies auf einen Glättungsprozess. Glättungsoperationen sind nicht mehr echtzeitfähig und sind also nur im Post-Processing anwendbar, dafür erlauben sie die Einbeziehung aller verfügbaren Beobachtungen zur Zustandsbestimmung des Systems. Kann auf die

Echtzeitfähigkeit verzichtet werden, dann ist die Kombination von Kalman-Filterung mit einer anschließenden Glättung vor allem für höhere Genauigkeitsansprüche, wie sie in photogrammetrischen Anwendungen gestellt werden, von Vorteil.

Durch die Kombinierte Nutzung von GPS und INS in einem integrierten System werden die Stärken der Einzelsysteme optimal genutzt und die Schwachstellen durch das jeweilig andere System gestützt. Das INS kann zwar als autarkes System alle Navigationsgrößen (Position, Geschwindigkeit und Neigung) mit sehr hoher Datenrate (mit mehreren hundert Hz; [Mostafa et al., 2001]) liefern, jedoch wachsen durch die fortlaufende Integration die Fehler mit der Zeit in Abhängigkeit der Qualität der verwendeten Inertialsensoren. Die kurzzeitige Genauigkeit des INS ist jedoch sehr hoch. Das GPS liefert im wesentlichen die Position und Geschwindigkeit mit hoher und konsistenter Langzeitstabilität. Die Messungen werden üblicherweise in Datenraten von 1-10 Hz aufgezeichnet. Probleme sind bei GPS im kurzzeitigen Verhalten gegeben, bei Auftreten von Cycle Slips oder Verlust der Ambiguitätenlösung durch Signalabrisse. Die Bestimmung von Neigungsinformationen kann mit einem einzelnen GPS-Empfänger nicht erfolgen, nur durch Kombination von zumindest drei Antennen sind auch die Neigungswinkel grundsätzlich zu bestimmen, allerdings nur mit zu geringer Genauigkeit.

In der Kombination von GPS und INS können durch die regelmäßigen Stützinformationen vom GPS die langfristigen INS-Fehler eliminiert werden, und im Gegenzug ist mittels der INS-Beobachtungen das Aufdecken von Cycle Slips und das Überbrücken von kurzfristigen Signalabrissen beim GPS möglich.

Das integrierte GPS/INS-System führt zu Verbesserung der gesamten Genauigkeit und Zuverlässigkeit im Vergleich zu den Einzelsystemen, wobei die Positionsgenauigkeit im Wesentlichen durch die GPS-Positionsgenauigkeit und die Neigungsbestimmung durch das Rauschen der INS-Drehratensensoren definiert ist.

## 5 Konzepte zur Georeferenzierung

Wie in Abschnitt 1.1 erläutert, besteht die Georeferenzierung von multispektralen Flugzeugscanneraufnahmen aus zwei Schritten, der Sensororientierung und der nachfolgenden Orthophotoherstellung, bei der die eigentliche Umbildung der Aufnahmen in das Objektkoordinatensystem erfolgt. Je nachdem ob der Einsatz des multispektralen Aufnahmesystems mit oder ohne GPS/INS-Unterstützung erfolgte, kann in der Folge eine indirekte, direkte oder integrierte Sensororientierung durchgeführt werden.

### 5.1 Sensororientierung

#### 5.1.1 Indirekte Sensororientierung

Die indirekte Sensororientierung entspricht im Falle von digitalen oder analogen Flächenkameras der traditionellen Aerotriangulation; die Parameter der äußeren Orientierung eines Bildverbandes und nach Bedarf auch die Kalibrierungsparameter der Kamera werden mit Hilfe von am Boden liegenden Pass- und Verknüpfungspunkten im Rahmen einer Ausgleichung bestimmt. Das zugrunde liegende mathematische Modell basiert auf den bekannten Kollinearitätsgleichungen der Zentralperspektive. Als Beobachtungen gehen dazu die Objektkoordinaten der Passpunkte, deren zugehörige Bildkoordinaten und die Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte ein. Weil Passinformationen und neu zu bestimmende Objektpunkte gemeinsam auf der Erdoberfläche liegen, kann die indirekte Sensororientierung als Interpolationsaufgabe interpretiert werden. Fehler der inneren Orientierungsparameter der Kamera werden dabei aufgrund ihrer Korrelation mit den Parametern der äußeren Orientierung durch entsprechende Änderungen in den äußeren Orientierungen der Luftbilder zu einem gewissen Teil kompensiert.

Die GPS-unterstützte Aerotriangulation ist ebenfalls bei der indirekten Sensororientierung einzuordnen. Es werden dabei zwar mittels GPS die Positionsparameter der äußeren Orientierungen der Luftbilder (nach Berücksichtigung des Exzenters zwischen GPS-Antenne und Kamera) direkt beobachtet, aber zur Bestimmung der Rotationsparameter der äußeren Orientierungen ist nach wie vor eine Aerotriangulation mit Verknüpfungspunkten und einer - immerhin stark reduzierten - Anzahl von Passpunkten notwendig.

Im Falle von zeilenweise aufzeichnenden Systemen ändert sich die äußere Orientierung für jede Zeile. Um eine indirekte Sensororientierung durchführen zu können, sind erstens ein mathematisches Modell für die sich von Zeile zu Zeile ändernden Orientierungsparameter und zweitens genügend Pass- und Verknüpfungsinformationen notwendig. Im Rahmen der Ausgleichung werden dabei die Orientierungsparameter für „ausgewählte“ Zeilen unter Verwendung des zugrunde liegenden mathematischen Modells mit Hilfe der am Boden befindlichen Pass- und Verknüpfungsinformationen bestimmt. Die Orientierungsparameter der dazwischenliegenden Aufnahmezeilen werden schließlich mittels geeigneter Interpolationsmethoden ermittelt. (siehe auch Abschnitte 5.1.3 und 6)

## 5.1.2 Direkte Sensororientierung

Bei Verwendung eines multispektralen Aufnahmesystems in Kombination mit einem integrierten GPS/INS-System kann eine direkte Sensororientierung erfolgen. Die direkte Sensororientierung ist unabhängig von einer Ausgleichung mit Verknüpfungs- und Passinformationen; die Parameter der äußeren Orientierung können alleine durch die Verwendung eines integrierten GPS/INS-Systems direkt bestimmt werden. Eingangsgrößen für die GPS/INS-Prozessierung zur direkten Sensororientierung sind neben den GPS/INS-Beobachtungen auch alle Kalibrierungsparameter der Einzelsysteme und die Kalibrierungsparameter zwischen den Systemen, die nachfolgend noch etwas detaillierter besprochen werden. Voraussetzung für die direkte Sensororientierung ist also auch die genaue Kenntnis aller Kalibrierungsparameter, welche in entsprechenden Schritten vorab bestimmt werden müssen.

Weiters ist zu beachten, dass die GPS/INS-Beobachtungen Passinformationen in der Höhe des Aufnahmesensors darstellen und die Punktbestimmung oder Objektrekonstruktion auf der Erdoberfläche stattfindet. Die direkte Sensororientierung stellt also - im Gegensatz zur indirekten Sensororientierung - eine Extrapolationsaufgabe dar. Damit kommt der korrekten Bestimmung der Systemkalibrierungsparameter besondere Bedeutung zu, weil sich Fehler in den Kalibrierungsparametern unmittelbar auf die Punktbestimmung am Boden fortpflanzen. Auch die Wahl des Objektkoordinatensystems ist sorgfältig zu überlegen, weil die photogrammetrischen Kollinearitätsgleichungen ein kartesisches Koordinatensystem voraussetzen, diese Annahme aber für die gängigen Landeskoordinatensysteme streng genommen nicht erfüllt ist ([Ressl, 2002]).

Sind alle Kalibrierungsparameter und alle Orientierungsparameter aus der GPS/INS-Integration bekannt, so kann die Abbildungsgleichung für die Punktbestimmung nach [Skaloud, 1999] wie in Gleichung (5-1) formuliert werden. Der räumliche Zusammenhang der einzelnen Größen ist in Abb. 5-1 veranschaulicht.

$$\mathbf{r}_i^m = \mathbf{r}_{ins/gps}^m(t) + \mathbf{R}_b^m(t) \cdot (s_i \mathbf{R}_c^b \mathbf{r}_i^c(t) + \mathbf{r}^b) \quad (5-1)$$

wobei:

- $\mathbf{r}_i^m$  ..... Gesuchter Ortsvektor im Objektkoordinatensystem  $m$  (mapping frame) zu einem zu bestimmenden Objektpunkt  $i$
- $\mathbf{r}_{ins/gps}^m(t)$  ..... Ortsvektor des INS-Körpersystems  $b$  (body-frame) im Objektkoordinatensystem  $m$  (mapping frame); er wird bestimmt im Rahmen der GPS/INS-Integration
- $\mathbf{R}_b^m(t)$  ..... Rotationsmatrix des INS-Körpersystems  $b$  (body frame) ins Objektkoordinatensystem  $m$  (mapping frame); sie wird bestimmt im Rahmen der GPS/INS-Integration
- $s_i$  ..... Maßstabsfaktor zwischen dem Vektor vom Projektionszentrum zum Bildpunkt des Objektpunktes  $i$  und dem Vektor vom Projektionszentrum zum Objektpunkt  $i$ ; er wird bestimmt entweder durch einen zweiten Projektionsstrahl aus einer zweiten Aufnahme (Stereoauswertung) oder durch ein digitales Geländemodell (Monoplotting, Orthophotoherstellung)

- $R_c^b$  ..... Rotationsmatrix zwischen dem Kamerasystem  $c$  und dem INS-Körpersystem  $b$  (body frame) (=Misalignment-Drehmatrix); sie wird bestimmt im Rahmen der Kalibrierung
- $r_i^c(t)$  ..... Vektor aus beobachteten Bildkoordinaten und Kamerakonstante im Kamerasystem  $c$  für einen bestimmten Objektpunkt ( $i$ ) und einer Aufnahme ( $t$ )
- $r^b$  ..... Translationsvektor im INS-Körpersystem  $b$  (body frame) zwischen dem INS und dem Kamerazentrum; er wird bestimmt im Rahmen der Kalibrierung

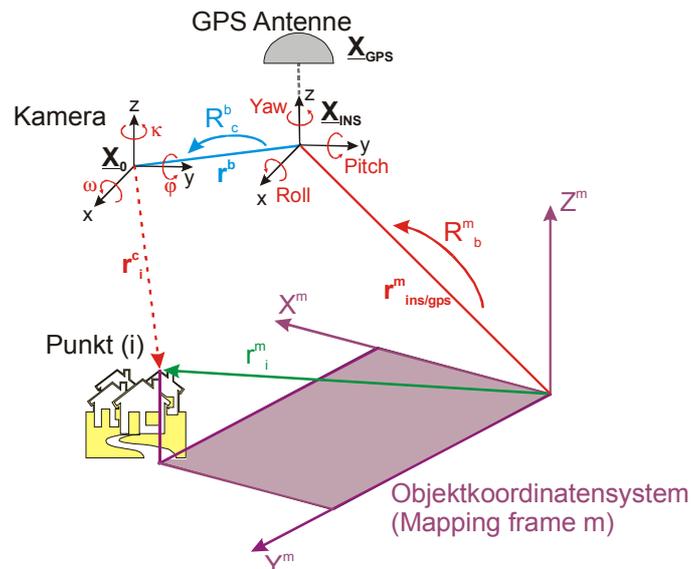


Abb. 5-1: räumlicher Zusammenhang der beteiligten Größen bei der Punktbestimmung aus direkter Sensororientierung mittels GPS/INS

Nach [Skaloud, 1999] ist die Genauigkeit der direkten Sensororientierung abhängig von der Anordnung der Sensoren, der zeitlichen Synchronisation, der Anfangsinitialisierung und der Systemkalibrierung.

Durch die Anordnung der Sensoren sollen erstens die Effekte von Fehlern in der Bestimmung der Exzentrizitäten zwischen den Sensoren minimiert werden, und zweitens soll möglichst jedwede differenzielle Bewegung zwischen den Sensoren vermieden werden. Aus der ersten Zielsetzung ergibt sich, dass die verschiedenen Messsysteme möglichst nahe beieinander liegen sollen. Dem gegenüber stehen jedoch die Zwangsbedingungen für die Sensoranordnung im Flugzeug: die Kamera oder der abbildende Sensor ist in einer Bodenluke eingebaut, und die GPS-Antenne muss an der Oberseite des Flugzeugrumpfes montiert sein. So kann ein minimaler Abstand zwischen Kamera und GPS nur erreicht werden, wenn die GPS-Antenne direkt oberhalb der Kamera angeordnet ist. Das INS wird am besten direkt bei der Kamera platziert. Kleine differentielle Bewegungen sind nicht so einfach zu vermeiden, weil Vibrationen beim Flugzeugeinsatz immer vorhanden sind und nur durch eine vibrationsdämpfende Montierung gemindert werden können. Exzenterfehler beeinflussen hauptsächlich die Positionsbestimmung; Vibrationen erhöhen das Rauschen in den Neigungsbeobachtungen des INS.

Synchronisationsfehler der Sensoren wirken sich auf die Bestimmung aller Parameter der äußeren Orientierung aus. Ihr Einfluss ist abhängig von der Bewegung des zu orientierenden Sensors, daher ist bei hochdynamischen Systemumgebungen die zeitliche Synchronisation mit

größtmöglicher Genauigkeit (im allgemeinen besser als 1 ms) zu gewährleisten. Als gemeinsame Zeitskala wird in der Regel die GPS-Zeit herangezogen, auf die die Messungen des INS und des Aufnahmesensors bezogen werden müssen. Fehlerquellen liegen z. B. in den hardwarespezifischen Signallaufzeiten, der systeminternen Datenverarbeitung (A/D-Wandlung, Prozessierung, Übertragungszeit) und bei älteren Flächenkameras in der Generierung des Kameramittenimpulses.

Die Anfangsinitialisierung des GPS/INS-Systems wird durch die laufende GPS/INS-Integration während des Fluges aktualisiert und verbessert. Genauigkeitslimitierende Faktoren sind im wesentlichen die Genauigkeit der aus GPS abgeleiteten Geschwindigkeit und die Qualität der Beschleunigungsmesser, welche indirekt die Genauigkeit der Neigungsbestimmung beeinflussen. Die Beschleunigungsmesser sollten daher mit der Qualitätsstufe der Kreisel korrespondieren. Ein weiterer limitierender Faktor kommt von Unsicherheiten in den Anomalien des Gravitationsfeldes, welche die Messungen der Beschleunigungsmesser und damit die Neigungsbestimmung beeinflussen.

Wie schon erwähnt, kommt der Systemkalibrierung bei der direkten Sensororientierung eine besondere Bedeutung zu, weil Fehler in der Systemkalibrierung direkt in die nachfolgend abgeleiteten Produkte (Punktbestimmung, Situationsauswertungen, Orthophotoherstellung, etc.) eingehen. Die Systemkalibrierung muss vor dem Flugeinsatz bestimmt werden und kann grundsätzlich in zwei Teile unterteilt werden: in die Kalibrierung der individuellen Sensoren und die Kalibrierung zwischen den Sensoren. Die Kalibrierung der individuellen Sensoren beinhaltet u.a. die Bestimmung der inneren Orientierung der Kamera bzw. des Aufnahmesensors und die INS-Kalibrierung hinsichtlich konstanter Driftfaktoren. Die Kalibrierung zwischen den Sensoren umfasst die Bestimmung der relativen Position und Orientierung zwischen der Kamera und den Navigationssensoren sowie die Bestimmung eines konstanten Synchronisationsoffsets wegen Datenübertragungs- und interner Hardwareverzögerungen.

Der Verschiebungsvektor zwischen der GPS-Antenne und der Kamera kann mit konventionellen Vermessungstechniken hinreichend genau bestimmt werden. Die Fehlaustrichtung zwischen INS und Kamera ist schwieriger zu bestimmen und erfolgt im Rahmen einer gut bestimmten Aerotriangulation durch Vergleich der mit dem INS abgeleiteten Drehwinkel und den in der Aerotriangulation bestimmten Drehwinkeln der einzelnen Aufnahmen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass aus Genauigkeitsgründen nur Bilder im Blockinneren herangezogen werden sollten. Außerdem muss bei Wahl einer transversalen Mercatorprojektion als Objektkoordinatensystem an die aus dem INS abgeleiteten Yaw-Werte eine Kurswinkelkorrektur hinsichtlich Meridiankonvergenz angebracht werden, bzw. bei Wahl eines Tangentialsystems als Objektkoordinatensystems muss eine räumliche Drehwinkeltransformation durchgeführt werden. Ein weiteres Problem stellt die Korrelation zwischen den inneren und äußeren Orientierungsparametern bei der Aerotriangulation dar. Eine Dekorrelation der Orientierungsparameter kann erreicht werden, indem die Positionsbestimmungen der Projektionszentren aus der GPS/INS-Integration als hoch gewichtete Beobachtungen in die Aerotriangulation eingeführt werden. Voraussetzung dafür ist, dass die GPS-Mehrdeutigkeiten korrekt bestimmt werden konnten. Dann wird durch die Fixierung der Projektionszentren sowohl eine bessere Schätzung der Misalignment-Winkel als auch die Möglichkeit der Verbesserung der Kamerakalibrierung ermöglicht. Bei Bedarf kann im Rahmen dieser Aerotriangulation auch ein konstanter Synchronisationsfehler zwischen Kameraauslösung und den Navigationsdaten bestimmt werden.

### 5.1.3 Integrierte Sensororientierung

Die integrierte Sensororientierung nutzt schließlich alle verfügbaren Informationen, also Pass- und Verknüpfungsinformationen sowie GPS/INS-Messungen in einer simultanen Ausgleichung, um alle relevanten Sensororientierungsparameter, äußere Orientierungen und nach Bedarf auch Kalibrierungsparameter, zu bestimmen. Dadurch können die höchsten Genauigkeiten und eine Steigerung der Zuverlässigkeit des gesamten Systems erreicht werden. Dies setzt voraus, dass in einem photogrammetrischen Ausgleichungsprogramm die Einbindung von GPS/INS-Beobachtungen möglich ist und dass im Falle der Sensororientierung von Scanneraufnahmen auch entsprechende mathematische Modelle zur Behandlung dieser Beobachtungskategorie verfügbar sind.

Ein Ausgleichungsprogramm, das diese Anforderungen erfüllt und in dieser Arbeit verwendet wurde, ist das hybride photogrammetrische Ausgleichungsprogramm ORIENT, welches am Instituts für Photogrammetrie und Fernerkundung (I.P.F.) der Technischen Universität Wien seit den 70er Jahren entwickelt wird ([Kager, 1989], [Kager, 2000]). Mit ORIENT kann sowohl eine integrierte als auch indirekte Sensororientierung von Flugzeugscanneraufnahmen durchgeführt werden, wobei der indirekte Fall einen entsprechend hohen Aufwand hinsichtlich der Bereitstellung der notwendigen Pass- und Verknüpfungsinformationen erfordert. Bezüglich der direkten Sensororientierung kann ORIENT zur nachfolgenden Punktbestimmung von 3D-Objektpunkten herangezogen werden. In diesem Fall können die von der GPS/INS-Integration bestimmten Orientierungsparameter in ORIENT übernommen werden und die 3D-Objektkoordinaten interessierender Objektpunkte mit Hilfe von Bildkoordinatenmessungen und räumlichen Vorwärtsschnitten bestimmt werden. Das in ORIENT implementierte mathematische Modell wird in Abschnitt 6 vorgestellt.

Als Ergebnis des Ausgleichungsprozesses erhält man neben den gesuchten Unbekannten (Orientierungsparameter entlang der Flugbahn, ausgeglichene Objektkoordinaten aller Objektpunkte und bei Bedarf auch diverse Kalibrierungsparameter) auch Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsangaben zu allen gesuchten Größen.

## 5.2 Orthophotoherstellung

Nach Bestimmung der Sensororientierung erfolgt in einem zweiten Schritt die Umbildung der Scanneraufnahme in das Objektkoordinatensystem, also die Orthophotoherstellung. Als Eingangsdaten dienen die Scanneraufnahmen, die Parameter der inneren Orientierung des Aufnahmesystems, die Parameter der äußeren Orientierung entlang der gesamten Flugbahn und ein digitales Geländemodell. Das Ergebnis der Umbildung ist schließlich die geometrisch rektifizierte Scanneraufnahme. Für die Orthophotoherstellung im Rahmen dieser Arbeit wurde das Programm DOP des I.P.F. verwendet. ([Ecker et al., 1991 und [Ecker et al., 1993])

Das Prinzip der Umbildung ist in Abb. 5-2 dargestellt. Zunächst wird im Grundriss des Objektkoordinatensystems ein regelmäßiger Raster definiert, der die Bildelemente des rektifizierten Bildes repräsentiert. Aus dem bekannten Geländemodell werden die Höhen für jeden Rasterpunkt interpoliert. Nun wird in einem iterativen Prozess und mit Hilfe der bekannten äußeren Orientierung entlang der gesamten Flugbahn die zum dreidimensionalen Objektpunkt zugehörige Aufnahmezeile gesucht. Mit Hilfe der Gleichungen der Zentralperspektive kann in der Folge für jeden Rasterpunkt im Objektkoordinatensystem die

Position in der Bildmatrix der Scanneraufnahme berechnet werden. Dem Rasterpunkt im Objektkoordinatensystem wird schließlich der Grauwert zugeordnet, der sich aus Interpolation der benachbarten Grauwerte seiner Position in der Scannerbildmatrix ergibt. Im Programm DOP stehen drei Interpolationsmethoden, auch Resamplingmethoden genannt, zur Verfügung: „nearest neighbour“, „bilinear“ und „bikubisch“.

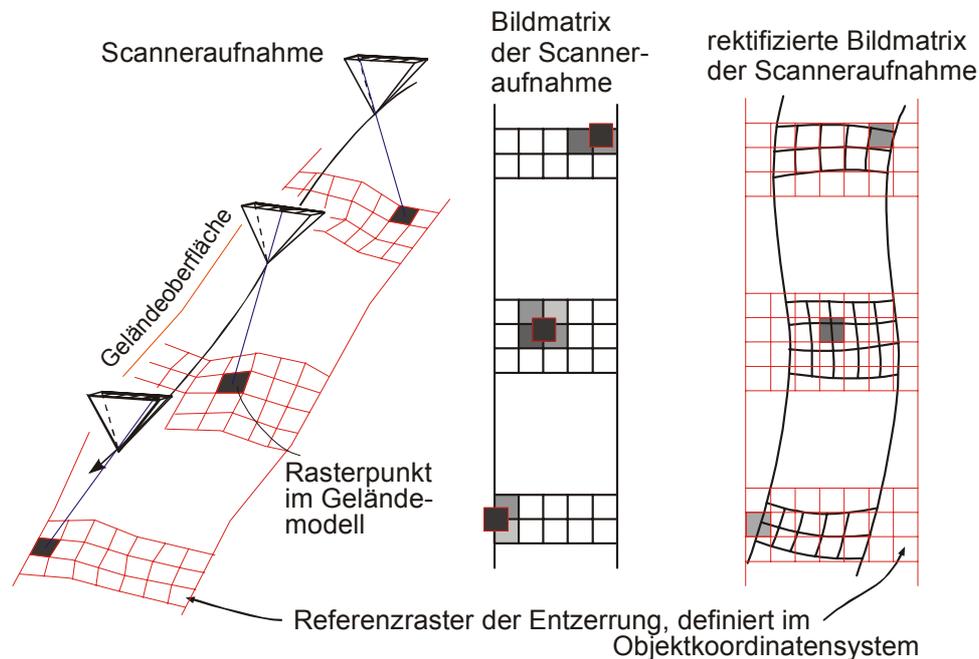


Abb. 5-2: Prinzip der Orthophotoherstellung aus multispektralen Scanneraufnahmen

Anmerkung: Für die Orthophotoherstellung aus Aufnahmen von Flächenkameras wird häufig in Bereichen ohne Geländekanten die sogenannte „Ankerpunktmethode“ angewendet ([Kraus, 1996]). Dabei wird nicht jedes Orthophotopixel streng mit den Kollinearitätsgleichungen ins Ausgangsbild zurückgerechnet, sondern dies erfolgt nur für die Gitterpunkte des Geländemodells, wobei der Gitterpunktabstand in der Regel ein Vielfaches der Orthophotopixelgröße beträgt. Für die innerhalb einer Gelände-Gittermasche liegenden Orthophotopixel wird die Position im Ausgangsbild anschließend mittels bilinearer Interpolation gefunden, wodurch sehr viel Rechenzeit eingespart werden kann. Diese Methode setzt jedoch Flächenaufnahmen oder Scanneraufnahmen mit sehr ruhiger Flugbahn voraus und kann für hochdynamische Flugzeugscanneraufnahmen in der Regel nicht angewendet werden.

## 6 Mathematisches Modell und Datenstruktur in ORIENT

In dieser Arbeit wurde zur Sensororientierung das hybride photogrammetrische Ausgleichungsprogramm ORIENT des I.P.F. verwendet ([Kager, 1989], [Kager, 2000]). In diesem Kapitel wird das in ORIENT zugrundeliegende mathematische Modell und die Datenstruktur beschrieben. Der Ausdruck „hybrid“ soll betonen, dass verschiedene Beobachtungskategorien in einer simultanen Ausgleichung teilnehmen können. Die Ausgleichung basiert auf der Methode der kleinsten Quadrate und geht von unkorrelierten normalverteilten Beobachtungen aus. Zur Fehlersuche stehen in ORIENT die Methoden der robusten Schätzung und Data Snooping zur Verfügung.

ORIENT kann verschiedene Kategorien von Beobachtungen in einer simultanen Ausgleichung bearbeiten:

- Bildkoordinaten in Aufnahmen von Flächenkameras
- Bildkoordinaten in Aufnahmen von Zeilenkameras
- Bildkoordinaten in Aufnahmen von Rotationsscannern
- SAR-Bildkoordinaten
- Passpunkte
- Dreidimensionale Modellkoordinaten
- Geodätische Messungen
- Fiktive Beobachtungen: Punkte einer Ebene oder Polynomialfläche
- Fiktive Beobachtungen: Punkte auf Geraden, Kreisen oder einer Schnittlinie zweier Polynomialflächen
- Fiktive Beobachtungen: Punkte auf dreidimensionalen, aus zusammengesetzten kubischen Polynomen bestehenden Kurven
- Beobachtete Parameter der Abbildungsfunktion

Im folgenden werden die Abbildungsgleichungen der Beobachtungskategorien, die bei der Sensororientierung von multispektralen Flugzeugscanneraufnahmen beteiligt sind, diskutiert, wobei auf die für die Ausgleichung notwendigen Linearisierungen nicht eingegangen wird. Zunächst wird einleitend das grundlegende mathematische Modell von ORIENT basierend auf der räumlichen Ähnlichkeitstransformation erklärt und daraus zunächst die Abbildungsfunktionen für Bildkoordinaten in Aufnahmen von Flächenkameras abgeleitet.

Im Rahmen einer Sensororientierung von Flugzeugscanneraufnahmen ist die Beobachtungskategorie der Bildkoordinaten von Scanneraufnahmen (Zeilenkamera oder Rotationsscanner) von speziellem Interesse. Bevor diese Beobachtungskategorie im Detail betrachtet werden kann, ist eine Diskussion der Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen notwendig. Diese sind in zweifacher Hinsicht wichtig, einerseits als mathematisches Modell zur Modellierung der Variation der äußeren Orientierung von Flugzeugscanneraufnahmen entlang der Flugbahn, und andererseits zur Modellierung

linienhafter 3D-Pass- und Verknüpfungsinformationen. Linienhafte 3D-Pass- und Verknüpfungsinformationen in Form von Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen, oder in Form von Polynomstücken oder Geraden gewinnen besonders bei der indirekten Sensororientierung in dem Fall an Bedeutung, in dem Punkte nicht oder nur schwer in der notwendigen Dichte zur Verfügung gestellt werden können. Werden Passpunkte nicht als Konstante, sondern als Beobachtungen mit einer gewissen Genauigkeit betrachtet, so werden sie in die Ausgleichung als beobachtete Passpunkte eingeführt. Dreidimensionale Modellkoordinaten kommen im Rahmen der Sensororientierung von Flugzeugscanner-aufnahmen durch die Positionsbeobachtungen aus der GPS/INS-Integration ins Spiel, und schließlich werden die Rotationsbeobachtungen aus der GPS/INS-Integration in ORIENT als beobachtete Parameter eingeführt.

Aus didaktischen Gründen wird die Reihenfolge der Diskussion der Abbildungsgleichungen für verschiedene Beobachtungskategorien folgendermaßen gewählt:

- Grundlegendes Mathematisches Modell in ORIENT basierend auf der räumlichen Ähnlichkeitstransformation
- Bildkoordinaten in Aufnahmen von Flächenkameras
- Beobachtete Passpunkte und beobachtete Parameter der Abbildungsfunktion
- Dreidimensionale Modellkoordinaten
- Fiktive Beobachtungen auf Flächen/Geraden/Polynomen
- Fiktive Beobachtungen auf 3D-Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen
- Bildkoordinaten in Aufnahmen von Zeilenkameras oder Rotationsscannern

## 6.1 Grundsätzliches zum mathematischen Modell in ORIENT

Das Ziel ist also, alle verfügbaren Beobachtungen aller möglichen Beobachtungskategorien in einer gemeinsamen Ausgleichung zu vereinigen, um daraus sowohl die Sensororientierung bestehend aus den äußeren Orientierungsparametern und aller notwendigen Systemkalibrierungsparameter als auch die 3D-Koordinaten aller Objektpunkte simultan und optimal zu bestimmen.

Die Beobachtungen der verschiedenen Beobachtungskategorien beziehen sich auf ein (vom Messsystem vorgegebenes) kartesisches Koordinatensystem, welches im folgenden allgemein als Beobachtungskoordinatensystem bezeichnet wird. Das Objekt (die Erdoberfläche) wird in einem anderen dreidimensionalen Koordinatensystem, dem Objektkoordinatensystem, beschrieben. Ein Punkt  $\mathbf{p} = (x, y, z)^T$  im Beobachtungskoordinatensystem ist ein Abbild des Objektpunktes  $\mathbf{P} = (X, Y, Z)^T$ . Die Abbildungsfunktion  $\mathbf{T}$  in Gleichung (6-1) beschreibt den Zusammenhang zwischen dem beobachteten Punkt  $\mathbf{p}$  und dem Objektpunkt  $\mathbf{P}$  und beinhaltet einen Satz von Abbildungsparametern  $\mathbf{S}$ , welche das Beobachtungskoordinatensystem in das Objektkoordinatensystem überführen.

$$\mathbf{p} = \mathbf{T}(\mathbf{S}, \mathbf{P}) \quad (6-1)$$

Die Grundlage für die Abbildungsgleichungen aller Beobachtungstypen, ausgenommen der 3D-Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynome, bildet in ORIENT die räumliche Ähnlichkeitstransformation:

$$(\mathbf{p} - \mathbf{p}_0) = \lambda \cdot \mathbf{R}^T(\Theta) \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{P}_0) \quad (6-2)$$

oder ausführlicher:

$$\begin{pmatrix} x - x_0 \\ y - y_0 \\ z - z_0 \end{pmatrix} = \lambda \cdot \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}^T \cdot \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix}$$

Dabei gilt:

$\mathbf{p} = (x, y, z)^T$ .....	beobachteter Punkt im Beobachtungskoordinatensystem
$\mathbf{p}_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$ .....	innerer Referenzpunkt
$\lambda$ .....	Maßstabsfaktor zwischen dem Vektor vom inneren Referenzpunkt zum beobachteten Punkt im Beobachtungskoordinatensystem und dem Vektor vom äußeren Referenzpunkt zum Objektpunkt
$\mathbf{R}(\Theta)$ .....	3 x 3 Rotationsmatrix, die aus drei Drehwinkeln, zusammengefasst in $\Theta$ , aufgebaut ist
$\mathbf{P} = (X, Y, Z)^T$ .....	Objektpunkt im Objektkoordinatensystem
$\mathbf{P}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)^T$ .....	äußerer Referenzpunkt

Der Satz von Abbildungsparametern  $\mathcal{S}$  besteht in der Abbildungsgleichung (6-2) aus  $\{\mathbf{p}_0, \lambda, \Theta, \mathbf{P}_0\}$ . Die Parameter können außer in Spezialfällen nicht direkt beobachtet werden und werden im Rahmen der Ausgleichung mit Hilfe der Beobachtungen bestimmt. Ein solcher Spezialfall mit direkt beobachteten Parametern liegt z. B. in der Luftbildphotogrammetrie dann vor, wenn äußere Orientierungsparameter mit einem integrierten GPS/INS-System direkt beobachtet werden. Es kann aber auch in manchen Fällen, in denen Parameter nicht mit Hilfe von Beobachtungen bestimmt werden können, notwendig sein, fiktive Beobachtungen von Parametern in der Ausgleichung zu verwenden, um Singularitäten während der Ausgleichung zu vermeiden.

Grundsätzlich scheinen die angeführten Gruppen von Parametern in den Abbildungsgleichungen aller verschiedener Beobachtungskategorien auf (ausgenommen sind 3D-Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen), wobei die Parameter aber teilweise unterschiedliche Bedeutungen haben können, oder es können auch manchen Parametern bestimmte Defaultwerte zugewiesen sein. Die Darstellung von Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen und deren Parameter wird in Abschnitt 6.6 eingehend behandelt.

Für die Drehwinkel  $\Theta$  müssen Definitionen und für die Drehmatrix  $\mathbf{R}(\Theta)$  eine Parametrisierung vorgegeben werden. Eine gebräuchliche Parametrisierung von  $\mathbf{R}(\Theta)$  verwendet die Winkel  $\Theta = (\omega, \varphi, \kappa)^T$  und wurde bereits in Abschnitt 3.4 besprochen. Mit  $\omega$  als primäre Drehung um die X-Achse,  $\varphi$  als sekundäre Drehung um die neu entstandene  $Y_{\omega}$ -Achse und  $\kappa$  als tertiäre Drehung um die wiederum neu entstandene  $Z_{\omega\varphi}$ -Achse ergeben sich

die Koeffizienten von  $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{\omega\varphi\kappa}$  durch Kombination der drei Einzeldrehungen um die Winkel  $\omega$ ,  $\varphi$ ,  $\kappa$  so wie in Gleichung (3-5) dargestellt.

Ein Nachteil dieser Parametrisierung ist allerdings, dass dabei die Drehwinkel nur in Spezialfällen (z. B. Flugrichtung entlang einer Koordinatenachse) die Aufnahmeorientierung anschaulich wiedergeben (vgl. [Kruck, 2003]). Anschaulicher ist die Verwendung der auch in der Navigation gebräuchlichen Drehwinkel Roll  $ro$ , Pitch  $pi$  und Yaw  $ya$ , also  $\Theta = (ro, pi, ya)^T$ . Die Parametrisierung der Drehmatrix  $\mathbf{R} = \mathbf{R}_{ropiya}$  erfolgt in ORIENT gemäß Gleichung (3-10).

Es sei darauf hingewiesen, dass die Erweiterung der Abbildungsgleichung (6-2) um sogenannte zusätzliche Parameter (engl. additional parameters; in ORIENT kurz als *adp* bezeichnet) möglich ist, wodurch sich eine große Flexibilität in der Modellierung verschiedener Beobachtungskategorien ergibt. Als kurzes Beispiel sei vorweggenommen, dass eine Variation des inneren Referenzpunktes formal in folgender Form dargestellt werden kann:

$$(\mathbf{p} - \mathbf{p}_0(\mathbf{adp})) = \lambda \cdot \mathbf{R}^T(\Theta) \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{P}_0) \quad (6-3)$$

Die zusätzlichen Parameter (*adp*) des inneren Referenzpunktes haben zum Beispiel bei der Beobachtungskategorie Bildkoordinatenbeobachtungen in Aufnahmen von Flächenkameras die Bedeutung von Verzeichnungsparametern der Kamera, wie in Abschnitt 6.2 noch näher ausgeführt werden wird.

Es sei festgehalten, dass es in ORIENT möglich ist,

- einzelne Parametergruppen einer Beobachtungskategorie fest zu halten,
- mehreren Beobachtungskoordinatensystemen die selben Abbildungsparameter zuzuweisen, ohne eigene Bedingungsbedingungen formulieren zu müssen, sondern nur durch entsprechende Zuweisung in der ORIENT Datenbasis. (z. B. kann man Aufnahmen von zwei verschiedenen Aufnahmesystemen, die auf der selben Plattform montiert sind, die gleichen Rotationsparameter zuweisen),
- Parametergruppen eines Beobachtungskoordinatensystems als Konstante zu definieren (z. B. bekannte und konstante innere Orientierung einer Kamera, bekannter und konstanter Maßstab).

## 6.2 Beobachtete Bildkoordinaten in Aufnahmen von Flächenkameras

Die Abbildungsgleichung zwischen beobachtetem Bildpunkt und dem zugehörigen Objektpunkt stellt in diesem Fall die perspektive Transformation dar, und das Beobachtungskoordinatensystem ist das Kamerakoordinatensystem. Eine etwaige Verzeichnung des Photos kann durch zusätzliche Parameter (*adp*) des inneren Referenzpunktes berücksichtigt werden, wie in Gleichung (6-3) allgemein angegeben ist.

Der identische Referenzpunkt  $\mathbf{P}_0 \equiv \mathbf{p}_0$  ist im Objektkoordinatensystem gegeben durch die Position des Aufnahmeortes  $\mathbf{P}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)^T$  und bildseitig durch die Lage des Projektionszentrums  $\mathbf{p}_0 = (x_0, y_0, c)^T$  in Bezug zur Bildebene. Der Maßstabsfaktor  $\lambda$  gibt die Position des Objektpunktes  $\mathbf{P}$  auf dem Projektionsstrahl an; damit variiert in der Zentralprojektion der Maßstabsfaktor von Bildpunkt zu Bildpunkt. Da alle Bildpunkte in einer Ebene liegen, ist die dritte Koordinate aller beobachteten Bildpunkte  $\mathbf{p}$  gleich Null. Deshalb ergibt die Division der ersten zwei Zeilen in der Gleichung (6-3) durch die dritte Zeile die Verbesserungsgleichungen in der bekannten Form:

$$\begin{aligned} x &= \bar{x} + v_x = x_0(adp) - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ y &= \bar{y} + v_y = y_0(adp) - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (6-4)$$

Dabei stellen  $x$  und  $y$  die ausgeglichenen Bildkoordinaten,  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  die beobachteten Bildkoordinaten und  $v_x$  und  $v_y$  ihre Verbesserungen dar.

Sind Verzeichnungsparameter im Rahmen der Ausgleichung zu berücksichtigen, so kann dies durch Ersetzen des Hauptpunktes  $(x_0, y_0)$  durch folgende Gleichungen erfolgen:

$$\begin{aligned} x_0(adp) &:= x_0 + dx_0(x, y) = x_0 + \sum_{i \in I} (a_i \cdot dx_{0i}(x, y)) \\ y_0(adp) &:= y_0 + dy_0(x, y) = y_0 + \sum_{i \in I} (a_i \cdot dy_{0i}(x, y)) \end{aligned} \quad (6-5)$$

$dx_0(x, y)$  und  $dy_0(x, y)$  bedeuten eine Verschiebung des Hauptpunktes, welche durch eine Summe von (meistens polynomialen) Funktionen beschrieben wird. Die Funktionen  $dx_{0i}(x, y)$  und  $dy_{0i}(x, y)$  beinhalten einfache Ausdrücke, welche charakteristische Verzeichnungseffekte, wie z. B. affine oder radial symmetrische Verzeichnung, beschreiben. Der Summenindex  $i$  stammt aus einer definierten Menge  $I$  von Indices, und jedem Index  $i$  ist ein Paar von Funktionen  $dx_{0i}(x, y)$  und  $dy_{0i}(x, y)$  zugewiesen. Für eine ausführliche Liste der in ORIENT möglichen Indices  $i$  und der zugehörigen Funktionen von Verzeichnungseffekten wird auf [Kager, 1995] verwiesen. Die Koeffizienten  $a_i$  sind schließlich die zusätzlichen Parameter, welche den Einfluss des zugehörigen Terms steuern, und welche bei Bedarf im Rahmen der Ausgleichung als freie Parameter mitbestimmt werden können.

Durch die Mitbestimmung der zusätzlichen freien Parameter im Rahmen der Ausgleichung passen sie sich optimal an das bestehende Datenmaterial an. Bei der Wahl von zusätzlichen freien Parametern ist aber generell Vorsicht geboten und auf etwaige Abhängigkeiten mit bereits vorhanden freien Parametern zu achten. Auch sollte mittels Signifikanztests immer geprüft werden, ob die zusätzlichen Parameter überhaupt einen nennenswerten Beitrag zur Modellierung liefern.

Anhand dieses gut bekannten Beispiels ist anschaulich demonstriert, wie mittels zusätzlicher Parameter die grundlegende Abbildungsgleichung (6-2) erweitert werden kann, was im Folgenden noch bei mehreren Beobachtungskategorien angewendet wird.

### 6.3 Beobachtete Passpunkte und beobachtete Parameter

Passpunktkoordinaten entstehen aus Beobachtungen und sind damit keine festen Größen, sondern mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet. Es ist daher naheliegend, auch Passpunkte in der Ausgleichung als verbesserungsbedürftige Beobachtungen einzuführen. Die Beziehungen für beobachtete Passpunktkoordinaten erhält man, indem man in Gleichung (6-2) die idente Abbildung verwendet; d.h. den Maßstabsfaktor  $\lambda$  gleich 1 setzt und für die Drehmatrix  $\mathbf{R}$  die Einheitsmatrix verwendet. Als Referenzpunkt kann der Koordinatenursprung gewählt werden ( $\mathbf{P}_0 = \mathbf{p}_0 = \mathbf{0}$ ). Die Verbesserungsgleichungen für Passpunkte ergeben sich mit diesen Vereinfachungen zu:

$$\begin{aligned}x &= \bar{x} + v_x = X \\y &= \bar{y} + v_y = Y \\z &= \bar{z} + v_z = Z\end{aligned}\tag{6-6}$$

Dabei stellen  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  und  $\bar{z}$  die beobachteten Passpunktkoordinaten und  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  die verbesserten Passpunktkoordinaten nach der Ausgleichung dar. Aus numerischen Gründen, speziell bei großen Landeskoordinaten, kann es günstiger sein, als Referenzpunkt einen Punkt im Interessensgebiet zu verwenden.

Verbesserungsgleichungen von beobachteten Parametern entsprechen den Gleichungen (6-6), wobei zum Beispiel für beobachtete Rotationsparameter in Gleichung (6-6) die Objektkoordinaten  $(X, Y, Z)^T$  durch  $\Theta = (ro, pi, ya)^T$  zu ersetzen sind. In gleicher Weise kann man für alle Parameter der Abbildungsgleichungen, also auch für die Koeffizienten der zusätzlichen Parameter, etc., Verbesserungsgleichungen obiger Form aufstellen. Je nach Parametertyp und Spezifizierung durch den Anwender werden alle drei Gleichungen (6-6) oder nur zwei Gleichungen bzw. eine Gleichung in der Ausgleichung verwendet. Auch wenn keine direkten Beobachtungen von Parametern verfügbar sind, kann es sein, dass die Einführung von fiktiven Parameterbeobachtungen sinnvoll ist, um z. B. Singularitäten in der Ausgleichung zu vermeiden. Ein weiteres Beispiel wären fiktive Beobachtungen von Polynomkoeffizienten (siehe z. B. Abschnitt 6.4 oder 6.5), um unkontrolliertes Ausschwingen von Polynomen zu verhindern.

### 6.4 Dreidimensionale Modellkoordinaten

Modellkoordinaten sind beobachtete dreidimensionale Koordinaten in einem kartesischen Koordinatensystem. Den Zusammenhang zum Objektkoordinatensystem stellt bereits die räumliche Ähnlichkeitstransformation in Gleichung (6-2) bzw. bei Berücksichtigung von zusätzlichen Parametern die Gleichung (6-3) dar, und die Verbesserungsgleichungen lauten:

$$\begin{aligned}x &= \bar{x} + v_x = x_0(adp) + \lambda \cdot (r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)) \\y &= \bar{y} + v_y = y_0(adp) + \lambda \cdot (r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)) \\z &= \bar{z} + v_z = z_0(adp) + \lambda \cdot (r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0))\end{aligned}\tag{6-7}$$

Die zusätzlichen Parameter  $adp$  sind formal ähnlich wie die Verzeichnungsparameter der Flächenkamera durch eine Variation des inneren Referenzpunktes mittels Polynome darstellbar, ihre Bedeutung entspricht einer „Verbiegung“ des beobachteten Modells:

$$\begin{aligned}
 x_0(adp) &:= x_0 + \Delta x_0 = x_0 + \sum_{i,j,k=0}^n a_{ijk} \cdot (x')^i \cdot (y')^j \cdot (z')^k \\
 y_0(adp) &:= y_0 + \Delta y_0 = y_0 + \sum_{i,j,k=0}^n b_{ijk} \cdot (x')^i \cdot (y')^j \cdot (z')^k \\
 z_0(adp) &:= z_0 + \Delta z_0 = z_0 + \sum_{i,j,k=0}^n c_{ijk} \cdot (x')^i \cdot (y')^j \cdot (z')^k \\
 \text{mit: } \quad x' &= \left( \frac{x - x_0}{\rho_0} \right); \quad y' = \left( \frac{y - y_0}{\rho_0} \right); \quad z' = \left( \frac{z - z_0}{\rho_0} \right)
 \end{aligned} \tag{6-8}$$

Dabei ist  $(x_0, y_0, z_0)^T$  der innere Referenzpunkt, und die Koeffizienten  $a_{ijk}$ ,  $b_{ijk}$ ,  $c_{ijk}$  sind die zusätzlichen Parameter, welche den Einfluss des zugehörigen Terms steuern und bei Bedarf im Rahmen der Ausgleichung als freie Parameter mitbestimmt werden können.  $\rho_0$  ist der Normalisierungsradius, welcher aus numerischen Gründen so zu wählen ist, dass die reduzierten und skalierten Koordinaten  $(x', y', z')^T$  im Intervall  $[-1, +1]$  zu liegen kommen.

Je nach Wahl bestimmter Polynomkoeffizienten als freie Parameter ist es möglich, Verbiegungen des Modells zu modellieren. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Auswahl der freien Parameter sorgfältig zu treffen ist und Korrelationen zu anderen Parametern zu bedenken sind. Zum Beispiel kann die Verschiebung des Beobachtungskoordinatensystems bezüglich des Objektkoordinatensystems durch einen freien (unbekannten) äußeren Referenzpunkt  $\mathbf{P}_0 = (X_0, Y_0, Z_0)^T$  oder durch Freilassen des inneren Referenzpunktes  $\mathbf{p}_0 = (x_0, y_0, z_0)^T$  erfolgen; auch die Polynomkoeffizienten  $a_{000}$ ,  $b_{000}$ ,  $c_{000}$  entsprechen einer Verschiebung. Gleichzeitiges Freilassen all dieser Parameter in der Ausgleichung bedeutet eine Überparametrisierung und führt zu Singularitäten in der Ausgleichung. Analog verhält es sich mit den linearen Termen in Gleichung (6-8), welche zum Teil mit den Verdrehungen des Beobachtungskoordinatensystems gegenüber dem Objektkoordinatensystem korreliert sind. Überdies ist von der Wahl sehr hoher Polynomgrade wegen möglicherweise unkontrollierten Ausschlagens abzuraten. Mittels Signifikanztests sollte stets überprüft werden, ob diese Terme überhaupt einen nennenswerten Beitrag zur Modellierung liefern.

## 6.5 Fiktive Beobachtungen auf Flächen und Kurven

Fiktive Beobachtungen sind keine Messungen im eigentlichen Sinn, sondern sie repräsentieren das Wissen oder die Annahme des Operateurs, dass gewisse Objektpunkte auf einer Fläche (Ebene, Kugel, polynomiale Fläche,...) oder einer Kurve (Gerade, Kreis, polynomiale Kurve,...) liegen.

Eine mögliche Anwendung von fiktiven Beobachtungen ist die Vervollständigung der photogrammetrischen Punktbestimmung. Um die 3D-Objektkoordinaten eines Objektpunktes

zu ermitteln, sind bekanntlich Bildkoordinatenmessungen in mindestens zwei Aufnahmen notwendig. Ist jedoch z. B. aufgrund von Verdeckungen die Messung von Bildkoordinaten nur in einer Aufnahme möglich, dann kann das Wissen, dass dieser Punkt auf einer Fläche oder Kurve liegt, als fiktive Beobachtung in die Ausgleichung mit eingeführt werden, und die Punktbestimmung wird durch den Schnitt des Abbildungsstrahles mit der Fläche oder Kurve ermöglicht. Hinsichtlich Flugzeugscanneraufnahmen ergibt sich ein Einsatzbereich für fiktive Beobachtungen in der Bereitstellung zusätzlicher Pass- und Verknüpfungsinformationen in Form von linienhaften Elementen, was vor allem in der indirekten Sensororientierung notwendig sein kann.

Wir beginnen mit der Diskussion von fiktiven Beobachtungen auf Flächen: Die Forderung „Der Punkt  $P$  liegt in einer Fläche“ kann durch die Beobachtung „der Normalabstand von  $P$  zu dieser Fläche ist gleich Null“ beschrieben werden. Der Einfachheit halber wird jedoch nicht die euklidische Distanz verwendet, sondern ihre Projektion auf eine der Koordinatenachsen. Die Fläche wird in einem lokalen Beobachtungskoordinatensystem beschrieben und soll näherungsweise parallel zur lokalen  $xy$ -Ebene verlaufen. Der Bezug zum übergeordneten Objektkoordinatensystem ist wieder durch die Ähnlichkeitstransformation in Gleichung (6-3) gegeben, wobei für den Maßstab die Annahme  $\lambda = 1$  getroffen wird. Der innere Referenzpunkt  $p_0$  wird in die lokale  $z$ -Achse gelegt, also  $x_0 = y_0 = 0$ , und der Term  $adp$  bedeutet in diesem Fall, dass die  $z$ -Koordinate von  $p_0$  als Polynom vom Grad  $n$  in Abhängigkeit der anderen beiden Koordinaten angesetzt wird:

$$z_0 = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} \cdot x^i \cdot y^j \quad (6-9)$$

Anschaulich erklärt heißt das, dass  $z_0$  für jeden Flächenpunkt variiert, sodass die  $xy$ -Ebene immer den jeweiligen Flächenpunkt enthält. In obiger Gleichung (6-9) ist eine sogenannte polynomiale  $z$ -Gestalt formuliert. Die fiktive Beobachtung beinhaltet nun, dass der  $z$ -Abstand jedes Punktes zu der Fläche, abgesehen von der Verbesserung, den Wert Null annimmt. Die Beobachtungsgleichung ergibt sich aus der dritten Zeile der Ähnlichkeitstransformation in Gleichung (6-3) und obiger Gleichung (6-9) für  $z_0$ . In gleicher Weise wie die polynomiale  $z$ -Gestalt können auch polynomiale  $x$ - und  $y$ -Gestalten formuliert werden, sodass die fiktive Beobachtung „ein Punkt liegt in einer Fläche“ auf eine der folgenden Weise formuliert werden kann:

$$\begin{aligned} x = 0 + v_x &= \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n a_{jk} \cdot y^j \cdot z^k + (r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)) \\ y = 0 + v_y &= \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^n b_{ik} \cdot x^i \cdot z^k + (r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)) \\ z = 0 + v_z &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} \cdot x^i \cdot y^j + (r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)) \end{aligned} \quad (6-10)$$

Fiktive Beobachtungen auf dreidimensionalen polynomialen Kurven ergeben sich, indem man zwei polynomiale Flächen miteinander schneidet, das heißt ein Punkt erfüllt zwei Gleichungen aus den Gleichungen (6-10). Und schließlich kann die Überlegung weitergeführt werden, dass ein Punkt alle drei Gleichungen (6-10) erfüllt und somit als Schnitt von drei Flächen interpretiert werden kann.

Wie werden nun unbekannte Kurvenparameter bestimmt? Zunächst einmal ist es wichtig zu verstehen, dass zur Bestimmung der Kurvenparameter keine homologen Bildpunkte notwendig sind. Jeder Punkt, der in einer Aufnahme gemessen wird, liefert zwei Beobachtungsgleichungen der Kategorie „Bildkoordinatenbeobachtung“ in Gleichung (6-4). Durch die fiktive Beobachtung „Punkt liegt auf der Kurve“ kommen zwei weitere Beobachtungsgleichungen aus den Gleichungen (6-10) hinzu. Das ergibt vier Beobachtungsgleichungen zur Bestimmung der drei unbekannt Objektpunktskoordinaten und außerdem eine Überbestimmung von eins, welche zur Bestimmung der unbekannt Kurven- bzw. Flächenparameter herangezogen werden kann. Anschaulich definieren mehrere Bildmessungen von Kurvenpunkten in einem Bild ein Strahlenbündel, das eine allgemeine Kegelfläche aufspannt. Bildmessungen von (nicht homologen) Kurvenpunkten in einem anderen Bild definieren eine weitere durch ein Strahlenbündel aufgespannte Kegelfläche. Die Kurvenparameter werden daher nicht notwendigerweise durch homologe Punkte bestimmt, sondern durch den Schnitt von mehreren durch Strahlenbündel aufgespannten Kegelflächen.

## 6.6 Fiktive Beobachtungen auf dreidimensionalen Raumkurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen

Polynomiale Kurven sind zur Modellierung längerer, allgemein geformter Kurven häufig nicht gut geeignet, denn Polynome hohen Grades neigen zu unkontrolliertem Ausschwingen und Polynome niederen Grades sind nicht flexibel genug, um komplexe Kurvenverläufe nachzubilden. Einen Ausweg bieten dreidimensionale Raumkurven (3D-Kurven), die aus Polynomstücken dritten Grades, zusammengesetzt werden. Um einen glatten Kurvenverlauf zu gewährleisten, sollen die einzelnen Segmente der 3D-Kurve in den Knotenpunkten mit zumindest erster stetiger Ableitung zusammenstoßen.

Genauso wie im vorigen Abschnitt 6.5, wird die fiktive Beobachtung „Punkt liegt auf 3D-Kurve“ in der Form „fiktiv beobachteter Abstand des Punktes von der 3D-Kurve ist gleich Null“ formuliert. Jedoch anders als die Beobachtungsgleichungen in den vorhergehenden Abschnitten, baut die Beobachtungsgleichung hier nicht auf der räumlichen Ähnlichkeitstransformation auf, und die Form der ausgleichenden Kurve aus zusammengesetzten kubischen Polynomen hängt nicht nur von den Unbekannten (die während der Ausgleichung bestimmt werden) ab, sondern auch von der Festlegung verschiedener Spezifikationen der 3D-Kurve vor der Ausgleichung. So müssen die Interpolationsart, die Parametrisierungsart und die Anzahl der Knotenpunkte und deren Verteilung entlang der Kurve vor der Ausgleichung festgelegt werden.

Hinsichtlich Interpolationsarten kann man zwischen kubischer Spline-Interpolation, Schmiege-Interpolation und Akima-Interpolation unterscheiden, welche auch im Programmsystem ORIENT implementiert sind. Im folgenden werden die Grundlagen der Modellierung von Kurven mittels zusammengesetzter kubischer Polynome behandelt. Die Literatur-Grundlage zu dieser Diskussion bilden [Forkert, 1994] und [Kraus, 2000], auf die auch für weitere Details verwiesen wird.

### 6.6.1 Grundlagen zur Modellierung von Kurven mittels zusammengesetzter kubischer Polynome

Das im folgenden diskutierte mathematische Modell ist sowohl für die Modellierung von 3D-Kurven als auch zur Modellierung der sechs Elemente der äußeren Orientierung von Flugzeugscanneraufnahmen anwendbar. Daher wird im folgenden die Anzahl der Dimensionen allgemein mit  $d$  bezeichnet. Gegeben sei also eine  $d$ -dimensionale Kurve  $\mathcal{S}$ , welche aus zusammengesetzten kubischen Polynomen aufgebaut ist. Der Verlauf der Kurve  $\mathcal{S}$  ist durch die sogenannten Knotenpunkte  $\mathbf{K}$  festgelegt, in denen die einzelnen Polynomsegmente mit zumindest erster stetiger Ableitung zusammenstoßen. Die  $n$  Knotenpunkte  $\mathbf{K}_i = (k_{i,1}, k_{i,2}, \dots, k_{i,d})^T$  (mit  $i=1(I)n$ ) definieren demnach  $(n-1)$  kubische Polynomsegmente.

Für die Interpolation von Kurvenpunkten zwischen den Knoten muss einerseits eine Parametrisierung der Kurve erfolgen und andererseits eine Interpolationsart festgelegt werden. Durch die Parametrisierung wird die  $d$ -dimensionale Kurve  $\mathcal{S}$  als Funktion des Kurvenparameters  $t$ , also als  $\mathcal{S}(t)$ , dargestellt:

$$\mathcal{S}(t) = \begin{pmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ \vdots \\ s_d(t) \end{pmatrix} \quad \text{mit } t \in [t_{\min}, t_{\max}]$$

Den Knoten  $K_1, K_2, \dots, K_n$  werden dabei die aufsteigenden Parameterwerte  $t_1 = t_{\min} < t_2 < \dots < t_n = t_{\max}$  zugeordnet. Als Grundlage für die Parametrisierung von 3D-Kurven bietet sich die Sehnenlänge zwischen den Knoten an. Bei der sogenannten chordalen Parametrisierung sind die Parameterabstände proportional den Sehnenlängen zwischen den Knoten:

$$t_i = t_{\min} + \frac{t_{\max} - t_{\min}}{\sum_{j=1}^{n-1} |K_{j+1} - K_j|} \cdot \sum_{j=1}^{i-1} |K_{j+1} - K_j| \quad (6-11)$$

Andere Möglichkeiten der Parametrisierung wären zum Beispiel äquidistant (alle Parameterabstände sind gleich) oder zentripedal (Parameterabstände sind proportional den Wurzeln der Sehnenlängen zwischen den Knoten), welche aber hier nicht weiter behandelt werden.

Für manche Kurven ist die Parametrisierung vorgegeben und konstant. Ein einfaches eindimensionales Beispiel dazu wäre die Rekonstruktion des Temperaturverlaufs in Abhängigkeit von der Zeit aus empirischen Messwerten, die zu diskreten Zeitpunkten erfasst worden sind. Dabei kann jedem Messwert ein bestimmter Parameter  $t$  durch den Zeitpunkt der Messung eindeutig zugeordnet werden. Ein anderes Beispiel ist die sechsdimensionale Orientierungsfunktion für eine Scanneraufnahme, deren Parametrisierung ebenfalls konstant ist und durch den Index der einzelnen Aufnahmezeilen definiert wird, welcher aufgrund der stetigen Flugbewegung proportional zur Zeit ist (Abschnitt 6.7).

Mit der festgelegten Parametrisierung kann die Interpolation eines Punktes der Kurve  $\mathbf{S}(t)$  an der Stelle  $t$  des Interpolationsintervalls  $[i] = [t_i, t_{i+1}]$  zwischen den Knoten  $\mathbf{K}_i$  und  $\mathbf{K}_{i+1}$  in folgender Weise erfolgen:

$$s_x(t)_{[i]} = a_{i,x} + b_{i,x} \cdot (t - t_i) + c_{i,x} \cdot (t - t_i)^2 + d_{i,x} \cdot (t - t_i)^3 \quad \text{mit } x = 1(1)d \quad (6-12)$$

oder ausführlicher:

$$\mathbf{S}(t)_{[i]} = \begin{pmatrix} s_1(t)_{[i]} \\ s_2(t)_{[i]} \\ \vdots \\ s_d(t)_{[i]} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i,1} \\ a_{i,2} \\ \vdots \\ a_{i,d} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{i,1} \\ b_{i,2} \\ \vdots \\ b_{i,d} \end{pmatrix} \cdot (t - t_i) + \begin{pmatrix} c_{i,1} \\ c_{i,2} \\ \vdots \\ c_{i,d} \end{pmatrix} \cdot (t - t_i)^2 + \begin{pmatrix} d_{i,1} \\ d_{i,2} \\ \vdots \\ d_{i,d} \end{pmatrix} \cdot (t - t_i)^3$$

Die Polynomkoeffizienten  $a_{i,x}$ ,  $b_{i,x}$ ,  $c_{i,x}$ ,  $d_{i,x}$  müssen für jedes Interpolationsintervall  $[i]$  zwischen den Knotenkoordinaten  $k_{i,x}$  und  $k_{i+1,x}$  bestimmt werden. Dazu benötigt man vier Gleichungen pro Interpolationsintervall. Insgesamt sind also für die  $(n-1)$  Polynomsegmente  $s_x(t)_{[i]}$  einer Koordinatenkomponente  $4(n-1)$  Polynomkoeffizienten zu bestimmen.

Zwei Gleichungen ergeben sich aus der Forderung, dass die interpolierte Kurve durch die Knoten führen soll.

$$(t_i, k_{i,x}): \\ s_x(t_i)_{[i]} = a_{i,x} = k_{i,x} \quad (6-13)$$

$$(t_{i+1}, k_{i+1,x}): \\ s_x(t_{i+1})_{[i]} = k_{i,x} + (t_{i+1} - t_i) \cdot b_{i,x} + (t_{i+1} - t_i)^2 \cdot c_{i,x} + (t_{i+1} - t_i)^3 \cdot d_{i,x} = k_{i+1,x} \quad (6-14)$$

Eine dritte Gleichung ergibt sich aus der Bedingung, dass die einzelnen Segmente in den Knotenpunkten mit stetiger erster Ableitung zusammenstoßen sollen ( $C^1$ -Stetigkeit).

$$\dot{s}_x(t_{i+1})_{[i]} = \dot{s}_x(t_{i+1})_{[i+1]} \\ \Rightarrow b_{i,x} + 2 \cdot (t_{i+1} - t_i) \cdot c_{i,x} + 3 \cdot (t_{i+1} - t_i)^2 \cdot d_{i,x} - b_{i+1,x} = 0 \quad (6-15)$$

Die vierte Gleichung hängt schließlich von der Interpolationsart ab, wie im folgenden für die Spline-Interpolation, die Schmiege-Interpolation und die Akima-Interpolation näher ausgeführt wird.

### 6.6.1.1 Spline-Interpolation

Für die Spline-Interpolation ergibt sich die vierte Gleichung aus der Forderung, dass die einzelnen Segmente in den Knotenpunkten auch mit stetiger zweiter Ableitung zusammenstoßen sollen ( $C^2$ -Stetigkeit):

$$\begin{aligned} \ddot{s}_x(t_{i+1})_{[i]} &= \ddot{s}_x(t_{i+1})_{[i+1]} \\ \Rightarrow 2 \cdot c_{i,x} + 6 \cdot (t_{i+1} - t_i) \cdot d_{i,x} - 2 \cdot c_{i+1,x} &= 0 \end{aligned} \quad (6-16)$$

Für die  $(n-1)$  Polynomsegmente  $s_x(t)_{[ij]}$  liefern die ersten zwei Bedingungen jeweils  $(n-1)$  Bestimmungsgleichungen und die dritte und vierte Bedingung jeweils  $(n-2)$  Bestimmungsgleichungen. Stellt man die Anzahl der zu bestimmenden Interpolationskoeffizienten  $a_{i,x}$ ,  $b_{i,x}$ ,  $c_{i,x}$ ,  $d_{i,x}$  von  $4(n-1)$  der Anzahl der Bestimmungsgleichungen von  $[2(n-1)+2(n-2)]$  gegenüber, so stellt man fest, dass noch zwei Bestimmungsgleichungen fehlen. Diese fehlenden Gleichungen ergeben sich durch folgende Randbedingungen: Bei geschlossenen (periodischen) Kurven ist die Steigung und Krümmung im ersten Knotenpunkt gleich der Steigung und Krümmung im letzten Knotenpunkt. Bei offenen (nichtperiodischen) Funktionen setzt man die Krümmung im ersten und im letzten Knoten gleich Null, womit sich die Kurve außerhalb des Intervalls  $[t_1, t_n]$  als Gerade fortsetzt; in diesem Fall spricht man auch von einer „natürlichen Spline-Funktion“.

### 6.6.1.2 Schmiege-Interpolation

Die Schmiege-Interpolation wird auch Bessel-Interpolation genannt und heißt im Englischen osculatory interpolation. Die Interpolationskoeffizienten des Intervalls  $[i]$  werden hier nur durch die Knoten der näheren Umgebung bestimmt. Die Schmiege-Interpolation ist so definiert, dass an der Stelle  $t_i$  die interpolierte Schmiegekurve den gleichen Anstieg hat, wie die durch die Knotenpunkte  $K_{i-1}$ ,  $K_i$ ,  $K_{i+1}$  führende quadratische Parabel. Aus dieser Forderung kann der Interpolationskoeffizient  $b_{i,x}$  in Abhängigkeit von  $(t_{i-1}, k_{i-1,x})$ ,  $(t_i, k_{i,x})$  und  $(t_{i+1}, k_{i+1,x})$  dargestellt werden („Tangentenformel“):

$$b_{i,x} = \frac{(t_{i+1} - t_i) \frac{k_{i,x} - k_{i-1,x}}{t_i - t_{i-1}} + (t_i - t_{i-1}) \frac{k_{i+1,x} - k_{i,x}}{t_{i+1} - t_i}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad (6-17)$$

Mit Einführung von

$$\tan \alpha_{i-1,x} = \frac{k_{i,x} - k_{i-1,x}}{t_i - t_{i-1}} \quad \tan \alpha_{i,x} = \frac{k_{i+1,x} - k_{i,x}}{t_{i+1} - t_i}$$

$$w_{i-1} = (t_i - t_{i-1}) \quad w_i = (t_{i+1} - t_i)$$

ergibt sich die üblichere Schreibweise als gewogenes Mittel aus den Steigungen  $\tan \alpha_{i-1}$  und  $\tan \alpha_i$  der beiden anliegenden Sehnen:

$$\dot{s}_x(t_i) = \frac{w_i \tan \alpha_{i-1,x} + w_{i-1} \tan \alpha_{i,x}}{w_{i-1} + w_i} \quad (6-18)$$

Auch hier sind bei offenen Kurven noch Randbedingungen notwendig; diese werden so festgelegt, dass im Randintervall die Kurve der Parabel durch die ersten bzw. letzten drei Knotenpunkte entsprechen soll. Für die Tangentenformel (6-17) wird für den ersten bzw. letzten Knoten ein fiktiver zusätzlicher Knotenpunkt außerhalb der Kurve extrapoliert.

Mit der obigen Gleichung (6-17) können alle Koeffizienten  $b_{i,x}$  bestimmt werden. Die noch fehlenden Koeffizienten  $a_{i,x}$  können aus Gleichung (6-13) bzw.  $c_{i,x}$ ,  $d_{i,x}$  aus den Gleichungen (6-14) und (6-15) bestimmt werden.

### 6.6.1.3 Akima-Interpolation

Die Akima-Interpolation schließlich simuliert jene ebene Kurve, mit der ein erfahrener Zeichner die vorgegebenen Knotenpunkte verbinden würde. Die Bestimmung der Interpolationskoeffizienten eines Intervalls erfolgt ähnlich wie bei der Schmiege-Interpolation unter Verwendung der benachbarten Knoten. Der Anstieg der Kurventangente im Knoten  $K_i$  wird dabei mit Hilfe der Anstiege der beiden vorhergehenden Sehnen  $K_{i-1}-K_{i-2}$  und  $K_i-K_{i-1}$  sowie der beiden nachfolgenden Sehnen  $K_{i+1}-K_i$  und  $K_{i+2}-K_{i+1}$  und einer gewogenen Mittelbildung bestimmt. Die Gewichte hängen davon ab, inwieweit die Steigung der beiden vorhergehenden bzw. nachfolgenden Sehnen differieren.

$$\dot{s}_x(t_i) = \frac{w_{i+1} \tan \alpha_{i-1,x} + w_{i-1} \tan \alpha_{i,x}}{w_{i-1} + w_i} \quad (6-19)$$

$$\text{mit } w_i = |\tan \alpha_i - \tan \alpha_{i-1}| \quad \text{und} \quad \tan \alpha_i = \frac{k_{i+1,x} - k_{i,x}}{t_{i+1} - t_i}$$

Bei offenen Kurven werden die Randbedingungen so definiert, dass am Anfang und Ende der Kurve jeweils eine Parabel durch die ersten bzw. letzten drei Knotenpunkte gelegt wird und auf dieser Parabel zwei weitere Punkte extrapoliert werden.

Mit der obigen Gleichung (6-19) können alle Koeffizienten  $b_{i,x}$  bestimmt werden. Die noch fehlenden Koeffizienten  $a_{i,x}$  können aus Gleichung (6-13) bzw.  $c_{i,x}$ ,  $d_{i,x}$  aus den Gleichungen (6-14) und (6-15) bestimmt werden.

### 6.6.1.4 Vergleich der Interpolationsmethoden

Die kubische Spline-Interpolation hat eine interessante Entsprechung in der Mechanik (z. B. [Böhmer, 1974] S.14): durch die Spline-Interpolation wird ein elastischer Stab simuliert, der in festen Lagerpunkten (den Knotenpunkten), die Kräfte senkrecht zur Biegelinie, nicht aber in Richtung der Biegelinie aufnehmen können (in sogenannten normalkraftfreien Einspannungen) fixiert ist. Die Endlage des Stabes ist dadurch gekennzeichnet, dass die aufgewendete Biegeenergie minimiert ist. Die zur Biegeenergie proportionale Krümmung kann sich daher nur stetig ändern. Daraus hat sich für die kubische Splinekurve die Forderung ergeben, dass in den Knotenpunkten zwischen den einzelnen Intervallen die zweite Ableitung der kubischen Splinekurve stetig sein muss. Die mit kubischen Spline-Interpolationen

erzeugten Raumkurven neigen bei ungünstiger Knotenanordnung im Vergleich zu den anderen Interpolationsmethoden noch am ehesten zum Ausschwingen. Weiters ist zu beachten, dass jeder Knotenpunkt die Form der ganzen Kurve beeinflusst; eine solche Eigenschaft wird als „global“ bezeichnet.

Bei der Schmiege-Interpolation werden dagegen nur die Knotenpunkte der näheren Umgebung für die Bestimmung der Polynomkoeffizienten herangezogen. Ein Knotenpunkt beeinflusst die Form der Kurve nur in einem lokalen Bereich und zwar in den vier Nachbarintervallen. Das Ausschwingeverhalten einer Schmiegekurve liegt zwischen der Spline-Interpolation und der Akima-Interpolation.

Bei der Akima-Interpolation wird die ebene Kurve nachgebildet, mit der ein erfahrener Zeichner vorgegebene Knotenpunkte verbinden würde. Auch hier werden für die Berechnung der Interpolationskoeffizienten in einem Intervall nur die benachbarten Knotenpunkte herangezogen. Ein Knotenpunkt beeinflusst sechs Nachbarintervalle der Kurve. Eine interessante Eigenschaft dieser Interpolationsmethode liegt darin, dass drei oder mehrere Knotenpunkte, die auf einer Geraden liegen, wieder mit einer Geraden verbunden werden. Die Akima-Interpolation neigt daher am wenigsten zu Ausschwingungen. Dem gegenüber steht aber der Nachteil, dass die Akima-Interpolation - im Gegensatz zur Spline- und Schmiege-Interpolation - nicht invariant gegenüber Rotationen des Koordinatensystems ist! Sie ist daher für die Darstellung räumlicher Kurven nicht geeignet.

## 6.6.2 Aufstellen der Verbesserungsgleichungen für Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen

Im vorigen Abschnitt 6.6.1 wurde Grundlegendes zur Modellierung von  $d$ -dimensionalen Kurven mittels zusammengesetzter kubischer Polynome behandelt. Dabei wurde basierend auf bekannten Knotenpunkten die Bestimmung der Interpolationskoeffizienten und die Interpolation weiterer Punkte zwischen den Knotenpunkten gezeigt. Es sei wiederholt, dass eine Kurve aus zusammengesetzten kubischen Polynomen mit Festlegung der Parametrisierung, Wahl der Interpolationsart und Kenntnis der Knotenpunkte vollständig definiert ist. Die Knotenpunkte sind aber in der Regel unbekannt und müssen mittels geeigneter Beobachtungen (z. B. Bildkoordinatenbeobachtungen von Punkten der Kurve) im Rahmen einer Ausgleichung bestimmt werden, wobei die Anzahl und die (näherungsweise) Verteilung der Knoten entlang der Kurve vorzugegeben ist (was noch näher erläutert werden wird). Die beobachteten Punkte auf der Kurve sind im allgemeinen nicht identisch mit den Knotenpunkten, sondern es handelt sich um beliebige Punkte auf der Kurve, welche als Stützpunkte bezeichnet werden.

Die fiktive Beobachtung „Abstand eines Stützpunktes  $\mathbf{P} = (p_1, p_2, \dots, p_d)^T$  von der  $d$ -dimensionalen Kurve  $\mathbf{S}(t)$  ist gleich Null“ führt auf folgende Verbesserungsgleichung:

$$\bar{\mathbf{S}} + \mathbf{v}_s = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{s_1} \\ v_{s_2} \\ \vdots \\ v_{s_d} \end{pmatrix} = \mathbf{S}(t) - \mathbf{P}$$

Nach Einsetzen der Interpolationsformel (6-12) ergibt sich schließlich die Verbesserungsgleichung in Vektorform:

$$\bar{\mathbf{S}} + \mathbf{v}_s = \mathbf{0} + \mathbf{v}_s = \mathbf{a}_{[i]} + \mathbf{b}_{[i]}(t - t_i) + \mathbf{c}_{[i]}(t - t_i)^2 + \mathbf{d}_{[i]}(t - t_i)^3 - \mathbf{P} \quad (6-20)$$

oder ausführlicher:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{s_1} \\ v_{s_2} \\ \vdots \\ v_{s_d} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i,1} \\ a_{i,2} \\ \vdots \\ a_{i,d} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{i,1} \\ b_{i,2} \\ \vdots \\ b_{i,d} \end{pmatrix} \cdot (t - t_i) + \begin{pmatrix} c_{i,1} \\ c_{i,2} \\ \vdots \\ c_{i,d} \end{pmatrix} \cdot (t - t_i)^2 + \begin{pmatrix} d_{i,1} \\ d_{i,2} \\ \vdots \\ d_{i,d} \end{pmatrix} \cdot (t - t_i)^3 - \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_d \end{pmatrix}$$

Jeder beobachtete Stützpunkt liefert eine fiktive Beobachtungsgleichung der Art (6-20). Je nach Aufgabenstellung und Festlegung der Kurvenspezifikationen können die Unbekannten sein:

- Die Koordinaten der Knotenpunkte  $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \dots, \mathbf{K}_n$ , denn die Polynomkoeffizienten  $a_{i,x}, b_{i,x}, c_{i,x}, d_{i,x}$  sind Funktionen der Knotenpunkte
- Die Kurvenparameter  $t_i$  der Knotenpunkte (was noch näher erläutert wird)
- Die Kurvenparameter  $t$  des Stützpunkts
- Die Koordinaten des Stützpunkts  $\mathbf{P}$  (dies gilt z. B. bei einer 3D-Kurvenrekonstruktion, wie sie in Abschnitt 6.6.3.2 gezeigt wird. Dies gilt jedoch z. B. nicht bei einer Kurvenanpassung an vorgegebene und feste Stützpunkte, wie sie in Abschnitt 6.6.3.1 erläutert wird)

Damit ist noch die Frage der Knotenanzahl und der Verteilung der Knotenpunkte entlang der Kurve zu klären. Die Flexibilität der ausgleichenden Kurve ist in erster Linie von der Anzahl der Knotenpunkte entlang der Kurve abhängig; je mehr Knotenpunkte, desto flexibler ist die Kurve. Allerdings braucht man zur Bestimmung einer bestimmten Anzahl von Knotenpunkten auch entsprechend viele beobachtete Stützpunkte. Anschauliche Zahlenbeispiele mit Gegenüberstellung der Anzahl von Unbekannten und Beobachtungen für 3D-Kurven werden zum Schluss dieses Abschnitts angeführt.

Bei Kurven ohne konstante Parametrisierung ist zunächst dafür zu sorgen, dass die Kurvenparameter der Rand-Knotenpunkte ihre vorgegebenen Parameterwerte  $t_1 = t_{min}$  und  $t_n = t_{max}$  in einer Ausgleichung beibehalten. Dies kann mittels fiktiver Beobachtungen dieser Kurvenparameter mit hoher Gewichtung erfolgen (vgl. Abschnitt 6.3 – beobachtete Parameter). Bei Freilassen der Kurvenparameter der inneren Knotenpunkte wandern die Knotenpunkte durch die Ausgleichung an günstigere Stellen; bei chordaler Parametrisierung bedeutet dies eine Verschiebung in Richtung der Krümmungsextremstellen der Kurve, wo es unter Umständen auch zu unerwünschten Kollisionen mehrerer Knoten kommen kann.

Eine mögliche praktische Vorgangsweise ist nun die folgende: Man wählt eine bestimmte Anzahl von Knoten und verteilt sie zum Beispiel in gleichen Abständen auf der Kurve. Einer möglichen Kollision der Knoten bei den Krümmungsextremstellen beugt man am besten durch zusätzliche fiktive Beobachtungen der inneren Knotenparameter (mit einer gewissen Genauigkeit) vor. Nach der Ausgleichung untersucht man, ob die geforderte Genauigkeit der Kurvenanpassung erreicht wurde. In den Intervallen, in denen dies nicht der Fall ist, fügt man

einen weiteren Knoten (zum Beispiel in der Intervallmitte) ein und wiederholt die Ausgleichung. Diese Methode eignet sich - eine genügend große Anzahl von Stützpunkten vorausgesetzt - auch zur automatischen Optimierung der Knotenanordnung, indem man mit einer Mindestanzahl von drei gleich verteilten Knoten beginnt und stufenweise jene Intervalle durch Einfügen eines weiteren Knotens halbiert, in denen sich die ausgleichende Kurve zu schlecht an die Stützpunkte anpasst und eine gewisse Fehlertoleranz überschritten wird.

Bei Kurven mit konstanter Parametrisierung werden die Knotenparameter durch die Ausgleichung nicht automatisch verbessert; hier muss die Optimierung der Position der Knotenpunkte entlang der Kurve interaktiv durch den Operateur erfolgen (Abschnitt 6.7).

### 6.6.3 Beispiele für die Anwendung von 3D-Kurven

Zum Abschluss dieses Abschnitts werden ein paar anschauliche Beispiele mit Beobachtungs- und Unbekanntenbilanz und einige praktische Aspekte besprochen.

#### 6.6.3.1 3D-Kurvenanpassung an gegebene Stützpunkte

Gegeben seien  $q$  dreidimensionale feste Stützpunkte und gesucht sei die 3D-Kurve aus zusammengesetzten kubischen Polynomen, die sich in ihrem Verlauf den Stützpunkten möglichst gut anpassen soll. Angenommen sei eine chordale Parametrisierung und eine Schmiege- oder kubische Spline-Interpolation. Wie erwähnt, muss die Anzahl  $n$  der Knotenpunkte und die Parametrisierung der Knotenpunkte vorgegeben werden. Zur Optimierung der Positionierung der Knotenpunkte auf der 3D-Kurve können auch die Knotenparameter als Beobachtungen mit einer gewissen Genauigkeit eingeführt werden. Die Kurvenparameter der Randknotenpunkte werden dabei entsprechend hoch gewichtet, damit sie praktisch festgehalten werden. Bei dieser Vorgangsweise sind die  $n$  Kurvenparameter der Knotenpunkte sowohl bei den Beobachtungen als auch bei den Unbekannten anzuführen.

Damit ergibt sich bei  $q$  Stützpunkten die Anzahl  $o$  der Beobachtungen aus:

- $3q$  Beobachtungsgleichungen vom Typ (6-20) („Punkt liegt auf 3D-Kurve“)
- $n$  beobachtete Kurvenparameter für die Knotenpunkte („beobachteter Parameter“)

Die Anzahl  $u$  der Unbekannten ergibt sich aus:

- $q$  Kurvenparameter der Stützpunkte
- $3n$  Koordinaten der Knotenpunkte
- $n$  Kurvenparameter der Knotenpunkte

Die Unbekannten können im Rahmen einer Ausgleichung bestimmt werden, wenn  $o > u$ <sup>1</sup> ist,

$$\text{also } o = 3q + n > q + 4n = u$$

$$\text{und } q > 1.5n$$

Das heißt, für die Bestimmung eines Knotenpunktes müssen durchschnittlich mehr als 1.5 Stützpunkte zur Verfügung stehen. Eine angestrebte deutliche Überbestimmung ergibt sich ab ungefähr drei Stützpunkten pro einem Knotenpunkt.

---

<sup>1</sup> Die Unbekannten können auch bei  $o = u$  bestimmt werden, jedoch können dann aufgrund fehlender Überbestimmung keine groben Messfehler erkannt oder zufällige Messfehler ausgeglichen werden.

### 6.6.3.2 3D-Kurvenrekonstruktion (photogrammetrischer Vorwärtsschnitt)

Nun sei eine 3D-Kurve gesucht, die in zwei Photos abgebildet ist. Es sind also von der 3D-Kurve keine dreidimensionalen Stützpunkte verfügbar. Der Einfachheit halber werden in den in diesem Abschnitt angeführten Beispielen immer Photos von Flächenkameras verwendet und noch keine multispektralen Scanneraufnahmen, welche erst im Abschnitt 6.7 besprochen werden. Die äußere Orientierung der zwei Photos sei in diesem Beispiel bekannt. Gesucht ist die Rekonstruktion der 3D-Kurve (Parametrisierung und Interpolationsart wie im Abschnitt 6.6.3.1) mit Hilfe von Bildkoordinatenmessungen von Stützpunkten entlang der Kurve in den zwei Photos. Diese Aufgabe entspricht also einem photogrammetrischen Vorwärtsschnitt. Es sei betont, dass die gemessenen Stützpunkte in dem einen Photo in der Regel keine homologe Entsprechung im anderen Photo haben. Anschaulich erklärt, spannen die Bildkoordinatenmessungen der Stützpunkte entlang des Abbildes der Kurve in einem Photo eine allgemein geformte Kegelfläche mit der Kegelspitze im Projektionszentrum des Photos auf. Die 3D-Kurve wird gefunden, indem sozusagen zwei solche Kegelflächen miteinander verschnitten werden.

Beobachtet seien  $q_1$  Stützpunkte der Kurve in einem Photo und  $q_2$  Stützpunkte im zweiten Photo, also insgesamt  $q = q_1 + q_2$  Stützpunkte. Daraus ergeben sich:

$$\begin{array}{ll} 3q = 3(q_1 + q_2) & \text{Beobachtungsgleichungen vom Typ (6-20) („Punkt liegt auf 3D-Kurve“)} \\ 2q = 2(q_1 + q_2) & \text{Bildkoordinatenmessungen vom Typ (6-4)} \\ n & \text{beobachtete Kurvenparameter für die Knotenpunkte} \end{array}$$

Zu bestimmen sind:

$$\begin{array}{ll} 3q = 3(q_1 + q_2) & \text{Koordinatenwerte der Stützpunkte} \\ q = q_1 + q_2 & \text{Kurvenparameter der Stützpunkte} \\ 3n & \text{Koordinatenwerte der Knotenpunkte} \\ n & \text{Kurvenparameter der Knotenpunkte} \end{array}$$

Die Beobachtungs- und Unbekanntenbilanz lautet damit:

$$\begin{array}{l} o = 5(q_1 + q_2) + n > 4(q_1 + q_2) + 4n = u \\ q_1 + q_2 > 3n \\ q > 3n \end{array}$$

Das heißt, es sind pro Knotenpunkt mindestens drei bis vier Stützpunkte notwendig, für eine angestrebte deutliche Überbestimmung sind sechs bis sieben Stützpunkte pro Knotenpunkt zu bestimmen.

Es sei an dieser Stelle betont, dass die erfolgreiche Lösung der Ausgleichung nicht alleine von der Überbestimmung des Systems abhängt, sondern auch von den Schnittbedingungen der Projektionsstrahlen bzw. der daraus gebildeten Kegelflächen. Schlecht bis gar nicht bestimmt werden kann die Kurve bzw. Teile der Kurve, wenn die Kurve als ganzes oder zum Teil in einer Ebene verläuft, die die Basis der beiden Photos enthält. Die Basis der beiden Photos sollte möglichst senkrecht zum Kurvenverlauf angeordnet sein. Im Falle schlechter Schnittbedingungen müssen zum Beispiel ein weiteres Photo mit günstigeren Schnittbedingungen oder sonstige weitere Beobachtungen zur Kurvenrekonstruktion herangezogen werden.

### 6.6.3.3 3D-Passkurven zur Bestimmung der äußeren Orientierung (photogrammetrischer Rückwärtsschnitt)

Nun seien 3D-Kurven gegeben und konstant. Die Bestimmung dieser Kurven kann zum Beispiel so erfolgt sein, wie es in Abschnitt 6.6.3.1 beschrieben ist; damit sind die Knotenpunkte und deren Kurvenparameter schon ermittelt, und sie sollen in der Folge unverändert bleiben. Gesucht ist die äußere Orientierung eines Photos, die innere Orientierung wird als bekannt und konstant angenommen.

Beobachtet sind also:

- $3q$  Beobachtungsgleichungen vom Typ (6-20) („Punkt liegt auf 3D-Kurve“)
- $2q$  Bildkoordinatenmessungen vom Typ (6-4)

Zu bestimmen sind:

- $3q$  Koordinatenwerte der Stützpunkte
- $q$  Kurvenparameter der Stützpunkte
- 6 Parameter der äußeren Orientierung

Die Beobachtungs- und Unbekanntenbilanz lautet damit:

$$o = 5q > 4q + 6 = u$$

$$q > 6$$

Jeder Projektionsstrahl eines Punktes der 3D-Kurve trägt also mit einer Überbestimmung von eins zur Bestimmung der äußeren Orientierung des Photos bei. Theoretisch benötigt man daher nur mindestens sechs Projektionsstrahlen.

Diese Überbestimmung alleine reicht aber nicht aus für eine erfolgreiche Bildorientierung. Die Frage ist, welche Form die Passkurven aufweisen und wie sie verteilt sein sollen. Für eine Abschätzung kann man eine 3D-Kurve in sogenannte signifikante Tangenten unterteilen, wobei dafür die einfache Regel „jedes Krümmungsmaxima liegt zwischen zwei signifikanten Tangenten“ herangezogen werden kann. Aus der Bildorientierung mit Hilfe von Geraden ist bekannt, dass eine im Bild beobachtete Passgerade zwei Gleichung zur Bestimmung der Unbekannten liefert. Demnach benötigt man eine oder mehrere 3D-Kurven mit mindestens drei signifikanten Tangenten zur Bestimmung der Orientierungsparameter des Photos. ([Forkert, 1994])

Aber außerdem ist auch noch darauf zu achten, dass die Anordnung der Passkurven keiner unterbestimmten Situation entspricht, das sind z. B. Situationen, in denen die Passkurven der Wirkungsfigur einer Änderung eines Elements der Bildorientierung entsprechen. Dies wären beispielsweise eine sternförmige oder parallele Anordnung der signifikanten Tangenten der Passkurven. Und natürlich soll – wie generell für alle Passelemente gilt – das Interessensgebiet möglichst von den Passkurven umschlossen sein und die Passkurven im gesamten Bild möglichst gut verteilt sein.

### 6.6.3.4 Bündelblockausgleichung mit 3D-Kurven

Gegeben seien mehrere (mindestens drei) Photos mit unbekannter äußerer Orientierung und bekannter innerer Orientierung. In diesen Photos seien ein oder mehrere zu bestimmende 3D-Kurven abgebildet. Gesucht ist die äußere Orientierung der Photos und die Rekonstruktion der 3D-Kurven.

Der Fall der Bündelblockausgleichung mit Verknüpfungskurven wird wahrscheinlich nur dann stattfinden, wenn zu wenige Verknüpfungspunkte vorhanden sind. Zur absoluten Lagerung des Blockes sind auch einige Passpunkte notwendig. Die Aufnahme von Pass- und Verknüpfungspunktbeobachtungen in die nachfolgende Bilanz der Unbekannten unterbleibt jedoch. Es wird nur der Beitrag der Verknüpfungskurven zur Bestimmung der äußeren Orientierung und zur Rekonstruktion der 3D-Kurve betrachtet.

Bei  $q$  beobachteten Kurvenstützpunkten in  $nph$  Photos und insgesamt  $n$  Knotenpunkten kann die Bilanz der verfügbaren Beobachtungen folgendermaßen allgemein aufgestellt werden:

- $3q$  Beobachtungsgleichungen vom Typ (6-20) („Punkt liegt auf 3D-Kurve“)
- $2q$  Bildkoordinatenmessungen der Kurvenpunkte in  $nph$  Photos vom Typ (6-4)
- $n$  beobachtete Kurvenparameter der Knotenpunkte

Dem gegenüber stehen die Unbekannten:

- $3q$  Koordinatenwerte der Stützpunkte
- $q$  Kurvenparameter der Stützpunkte
- $3n$  Koordinatenwerte der Knotenpunkte
- $n$  Kurvenparameter der Knotenpunkte
- $6nph$  Parameter der äußeren Orientierung

Genauso wie in Abschnitt 6.6.3.3 trägt jeder beobachtete Kurvenpunkt mit einer Überbestimmung von eins zur Lösung des Gesamtsystems bei, wobei nun nicht mehr nur die Parameter der äußeren Orientierung gesucht sind, sondern auch die gleichzeitige Rekonstruktion der 3D-Kurve.

Verknüpfungskurven können nur in der Bündelblockausgleichung verwendet werden, wenn sie in mindestens drei Photos abgebildet sind. Dies lässt sich anschaulich wieder mit den durch die Stützpunkte entlang der Kurve aufgespannten Kegelflächen erklären. Zwei solche Kegelflächen schneiden sich bei jeder beliebigen Orientierung der Photos in einer Raumkurve, die im allgemeinen aber nicht der tatsächlichen und gesuchten Raumkurve entspricht. Dies wäre nur bei fehlerfreier äußerer Orientierung der Photos der Fall (vgl. Abschnitt 6.6.3.2). Erst eine dritte Kegelfläche durch beobachtete Stützpunkte in einem dritten Photo vermag Widersprüche in der zu rekonstruierenden 3D-Kurve und/oder in den Orientierungsparametern der Photos aufzudecken. Die in den vorhergehenden Abschnitten angesprochenen Aspekte der Schnittbedingungen zwischen den Kegelflächen und der Kurvenverteilung sind hier selbstverständlich genauso anzuwenden.

## 6.7 Beobachtete Bildkoordinaten in Aufnahmen von Scannersystemen

Auf Basis der bisher behandelten Beobachtungsgleichungen können nun die Beobachtungsgleichungen für Aufnahmen von Scannersystemen (Zeilenkameras oder Rotationsscanner) besprochen werden. Bei einer Zeilenkamera stellt eine Zeile der Aufnahme eine Zentralperspektive quer zur Flugrichtung dar. Bei Rotationsscannern ist dies zunächst nicht der Fall, hier muss zuvor die Panoramakorrektur (Gleichung (2-2)) angebracht werden. Man kann also sagen, die flächenhafte zentralperspektive Abbildung der Flächenkameras

„schrumpft“ bei Scannersystemen auf die Zentralperspektive einer einzelnen Zeile quer zur Flugrichtung zusammen. Die flächige Aufnahme entsteht durch die Weiterbewegung der Plattform in Flugrichtung. Eine einzelne Aufnahmezeile wird häufig als Scan bezeichnet, und die flächige Aufnahme bestehend aus hintereinander aufgenommenen Scans wird als Szene bezeichnet. Die Variation der Parameter der äußeren Orientierung für jede Aufnahmezeile entlang der Flugbahn muss in den Abbildungsgleichungen entsprechend modelliert werden. Per Konvention ist in ORIENT für die Achsen des Bildkoordinatensystems  $(x, y)$  festgelegt, dass  $x$  in Richtung der Flugrichtung positiv zählt und  $y$  senkrecht zur Flugrichtung, also in Richtung der Aufnahmezeilen, verläuft (vgl. Abb. 6-1 bzw. Definition des Körpersystems in Abb. 3-5).

### 6.7.1 Polynom-Orientierung

Die mathematische Formulierung der Variation der äußeren Orientierung kann bei ruhigen Flugbahnen, wie sie bei Satelliten vorkommen, mittels Polynomen niederen Grades erfolgen. Die Parameter der äußeren Orientierung  $(\Theta, P_0)$  sind damit als Polynomfunktionen des Polynomparameters  $t$  (für den der Index der jeweiligen Aufnahmezeile gewählt wird:  $t = x$ ) und der zugehörigen Polynomkoeffizienten **adp** darstellbar, wie aus Gleichung (6-21) und (6-22) ersichtlich ist und in Abb. 6-1 veranschaulicht ist. Ähnlich wie bei Flächenaufnahmen kann man in der Folge die ersten zwei Zeilen der Gleichung (6-21) durch die dritte Zeile dividieren, um die Beobachtungsgleichungen für Bildkoordinatenmessungen  $(x, y)$  in der Scanneraufnahme zu erhalten.

$$(\mathbf{p} - \mathbf{p}_0(t, \mathbf{adp})) = \lambda \cdot \mathbf{R}^T(\Theta(t, \mathbf{adp})) \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{P}_0(t, \mathbf{adp})) \quad (6-21)$$

dabei gilt:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_0 : \quad X_0(t, \mathbf{adp}) &:= X_0 + \Delta X_0 = X_0 + \sum_{i=0}^n a_i \cdot (t')^i & \Theta : \quad ro(t, \mathbf{adp}) &:= ro + \Delta ro = ro + \sum_{i=0}^n d_i \cdot (t')^i \\ Y_0(t, \mathbf{adp}) &:= Y_0 + \Delta Y_0 = Y_0 + \sum_{i=0}^n b_i \cdot (t')^i & pi(t, \mathbf{adp}) &:= pi + \Delta pi = pi + \sum_{i=0}^n e_i \cdot (t')^i \\ Z_0(t, \mathbf{adp}) &:= Z_0 + \Delta Z_0 = Z_0 + \sum_{i=0}^n c_i \cdot (t')^i & ya(t, \mathbf{adp}) &:= ya + \Delta ya = ya + \sum_{i=0}^n f_i \cdot (t')^i \end{aligned}$$

mit  $t' = \frac{t - t_0}{\rho_0}$

(6-22)

Die Bedeutung der einzelnen Größen dieser „Polynom-Orientierung“ sind nun wie folgt:  $t_0$  ist der Scanindex des sogenannten Referenzscans, der üblicherweise in der Mitte der Szene gewählt wird. Für  $t = t_0$  ergibt sich  $t' = 0$ , und somit ergeben sich auch die  $\Delta$ -Zuschläge an die äußeren Orientierungsparameter für den Referenzscan zu Null. Der Normalisierungsradius  $\rho_0$  ist genauso wie in Abschnitt 6.4 über Modellkoordinaten aus numerischen Gründen so zu wählen, dass alle Parameter  $t'$  im Intervall  $[-1, 1]$  liegen. Liegt  $t_0$  in der Mitte der Szene, so bietet sich für den Normalisierungsradius  $\rho_0$  der Wert der halben Gesamtscananzahl der Szene

an. Die Polynomkoeffizienten  $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i$  steuern den Einfluss des zugehörigen Terms und werden bei der Ausgleichung bestimmt. Wie schon mehrfach erwähnt, ist die Wahl der freien Polynomkoeffizienten sorgfältig zu treffen. Aus obigen Gleichungen ist unmittelbar ablesbar, dass die Koeffizienten für  $(i=0)$  Verschiebungen darstellen; gleichzeitiges Freilassen z. B. der Parameter  $X_0$  und  $a_0$  würde zu einer Überparametrisierung führen.

Die zusätzlichen Parameter beim inneren Referenzpunktes  $p_0$  beinhalten, dass der Hauptpunkt immer mit den einzelnen Aufnahmezeilen mitwandert. Bei Satellitenaufnahmen kann es vorkommen, dass die aufeinanderfolgenden Zeilen der Szene infolge der Erdrotation etwas gegeneinander versetzt sind. Dann ist es notwendig, dass der Hauptpunkt innerhalb der Zeile quer zur Flugrichtung von Aufnahmezeile zu Aufnahmezeile entsprechend verschoben wird.

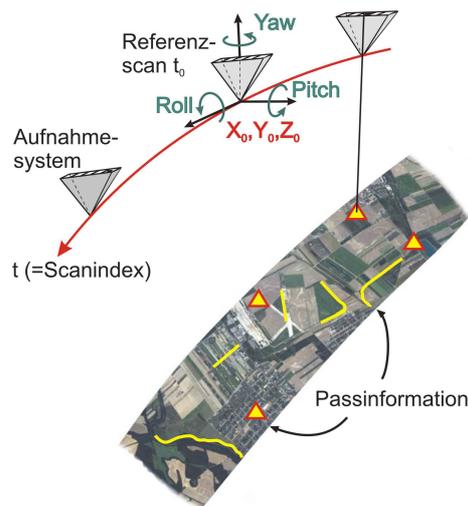


Abb. 6-1: Veranschaulichung der Polynom-Orientierung

## 6.7.2 Orientierungsfunktion aus zusammengesetzten kubischen Polynomen

Für hochdynamische Flugbahnen, wie sie bei Flugzeugen vorkommen, sind Polynome zur Beschreibung der Variation der äußeren Orientierungsparameter zu unflexibel, hier sind Funktionen aus zusammengesetzten kubischen Polynomen besser geeignet. Ähnlich zu obiger Gleichung (6-21) kann die Abbildungsgleichung für eine Flugzeugscanneraufnahme entlang eines Flugstreifens in folgender Weise dargestellt werden, wobei die Polynom-Terme durch entsprechende Terme von zusammengesetzten kubischen Polynomen zu ersetzen sind:

$$(\mathbf{p} - \mathbf{p}_0(t, \mathbf{adp})) = \lambda \cdot \mathbf{R}^T(\boldsymbol{\Theta}(t, \mathbf{K}_\Theta)) \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{P}_0(t, \mathbf{K}_0)) \quad (6-23)$$

Dabei gilt für die Parameter der äußeren Orientierung im Intervall  $[i] = [t_i, t_{i+1}]$  zwischen den Knoten  $\mathbf{K}_{0,i}$  und  $\mathbf{K}_{0,i+1}$  bzw.  $\mathbf{K}_{\Theta,i}$  und  $\mathbf{K}_{\Theta,i+1}$  (vgl. Gleichung (6-12) in Abschnitt 6.6.1):

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}_0(t, \mathbf{K}_o): \quad X_0(t)_{[i]} &:= a_{i,X_0} + b_{i,X_0}(t-t_i) + c_{i,X_0}(t-t_i)^2 + d_{i,X_0}(t-t_i)^3 \\
Y_0(t)_{[i]} &:= a_{i,Y_0} + b_{i,Y_0}(t-t_i) + c_{i,Y_0}(t-t_i)^2 + d_{i,Y_0}(t-t_i)^3 \\
Z_0(t)_{[i]} &:= a_{i,Z_0} + b_{i,Z_0}(t-t_i) + c_{i,Z_0}(t-t_i)^2 + d_{i,Z_0}(t-t_i)^3 \\
\mathbf{O}(t, \mathbf{K}_\Theta): \quad ro(t)_{[i]} &:= a_{i,ro} + b_{i,ro}(t-t_i) + c_{i,ro}(t-t_i)^2 + d_{i,ro}(t-t_i)^3 \\
pi(t)_{[i]} &:= a_{i,pi} + b_{i,pi}(t-t_i) + c_{i,pi}(t-t_i)^2 + d_{i,pi}(t-t_i)^3 \\
ya(t)_{[i]} &:= a_{i,ya} + b_{i,ya}(t-t_i) + c_{i,ya}(t-t_i)^2 + d_{i,ya}(t-t_i)^3
\end{aligned} \tag{6-24}$$

Fasst man die Orientierungsparameter zu einem sechsdimensionalen Vektor  $\mathbf{O}(t)$  zusammen, können die Gleichungen (6-24) als sechsdimensionale Vektorfunktion, die im folgenden als Orientierungsfunktion  $\mathbf{O}(t)$  bezeichnet wird, zusammengefasst werden:

$$\mathbf{O}(t)_{[i]} = \mathbf{a}_{[i]} + \mathbf{b}_{[i]}(t-t_i) + \mathbf{c}_{[i]}(t-t_i)^2 + \mathbf{d}_{[i]}(t-t_i)^3 \tag{6-25}$$

$$\begin{aligned}
\text{mit} \quad \mathbf{O}(t)_{[i]} &= (X_0(t)_{[i]}, Y_0(t)_{[i]}, Z_0(t)_{[i]}, ro(t)_{[i]}, pi(t)_{[i]}, ya(t)_{[i]})^T \\
\mathbf{a}_{[i]} &= (a_{i,X_0}, a_{i,Y_0}, a_{i,Z_0}, a_{i,ro}, a_{i,pi}, a_{i,ya})^T \\
\mathbf{b}_{[i]} &= (b_{i,X_0}, b_{i,Y_0}, b_{i,Z_0}, b_{i,ro}, b_{i,pi}, b_{i,ya})^T \\
\mathbf{c}_{[i]} &= (c_{i,X_0}, c_{i,Y_0}, c_{i,Z_0}, c_{i,ro}, c_{i,pi}, c_{i,ya})^T \\
\mathbf{d}_{[i]} &= (d_{i,X_0}, d_{i,Y_0}, d_{i,Z_0}, d_{i,ro}, d_{i,pi}, d_{i,ya})^T
\end{aligned}$$

Damit können auch die Knoten  $\mathbf{K}_{0,i}$  und  $\mathbf{K}_{\Theta,i}$  zusammengefasst werden zu:

$$\mathbf{K}_{0,\Theta,i} = (X_{0,i}, Y_{0,i}, Z_{0,i}, ro_i, pi_i, ya_i)^T$$

Die Orientierungsfunktion  $\mathbf{O}(t)$  ist in Abb. 6-2 veranschaulicht. Sie ist also aus einer Serie von Segmenten aufgebaut, und jedes Segment wird durch ein sechsdimensionales kubisches Polynom als Funktion des Kurvenparameters  $t$  beschrieben. Die einzelnen Segmente stoßen an den Knotenpunkten  $\mathbf{K}_{0,\Theta,i}$  mit zumindest erster stetiger Ableitung zusammen.

Die Parametrisierung der Orientierungsfunktion ist konstant und durch den Scanindex  $t$  vorgegeben. Daraus folgt, dass die Kurvenparameter  $t$  der Knotenpunkte vorzugeben sind. Als Interpolationsart kann entweder die kubische Spline-Interpolation oder die Schmiege-Interpolation gewählt werden. Aufgrund der globalen Eigenschaft der Spline-Interpolation würde jeder Knoten den Verlauf der gesamten Orientierungsfunktion beeinflussen. Daher wurde in dieser Arbeit die Schmiege-Interpolation verwendet.

Die Unbekannten im Rahmen der Ausgleichung sind die sechsdimensionalen Knotenpunkte. Sind diese bestimmt, dann ist die Form der Orientierungsfunktion vollständig definiert.

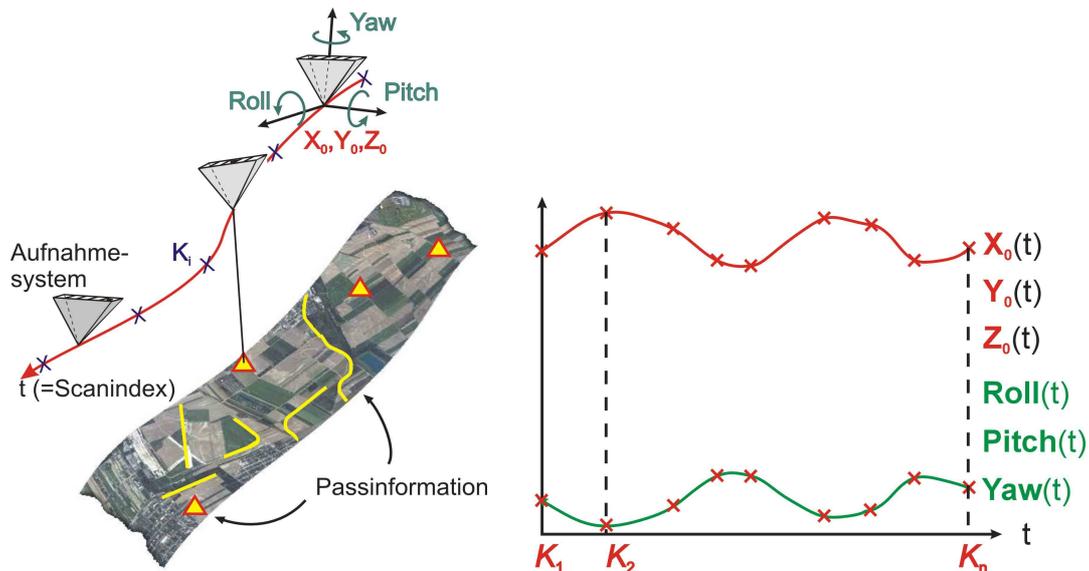


Abb. 6-2: Veranschaulichung der sechsdimensionalen Orientierungsfunktion der Flugzeugscanneraufnahme eines Flugstreifens

In einer weiteren Steigerungsstufe der Komplexität kann nun noch die Orientierungsfunktion mit zusätzlichen polynomialen Parametern der oben diskutierten Polynom-Orientierung in Gleichung (6-21) kombiniert werden. Die allgemeine Darstellung der Abbildungsgleichung lautet dann:

$$(\mathbf{p} - \mathbf{p}_0(t, \mathbf{adp})) = \lambda \cdot \mathbf{R}^T(\boldsymbol{\Theta}(t, \mathbf{K}_\Theta, \mathbf{adp})) \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{P}_0(t, \mathbf{K}_0, \mathbf{adp})) \quad (6-26)$$

Die zusätzlichen Parameter der äußeren Orientierung entsprechen dabei (6-22). Anschaulich kann man sich diese Kombination nun folgendermaßen vorstellen: Durch die Knotenpunkte ist eine Orientierungsfunktion definiert, welche durch die zusätzlichen polynomialen Terme verschoben, verdreht und „verbogen“ wird (vgl. Abschnitt 7.6).

### 6.7.2.1 Praktische Aspekte zur Bestimmung von Orientierungsfunktionen aus zusammengesetzten kubischen Polynomen

Zum Schluss dieses Abschnitts seien einige praktische Aspekte erläutert, und zwar zunächst zur **indirekten Sensororientierung** von Flugzeugscanneraufnahmen: Die Anzahl und die Verteilung der Knotenpunkte entlang der Orientierungsfunktion jedes Flugstreifens müssen aufgrund der konstanten Parametrisierung der Orientierungsfunktion vorgegeben werden; die Lage der Knoten in Kurvenrichtung kann durch die Ausgleichung nicht verändert bzw. verbessert werden. Dies führt auf einem iterativen Optimierungsprozess zur Bestimmung der Knotenpunktanzahl und -verteilung unter Berücksichtigung der verfügbaren Pass- und Verknüpfungsinformationen. Die Startverteilung der Knotenpunkte kann zum Beispiel mit einem einfachen Wahlkriterium, mit dem die Knotenpunkte in gleichen Parameterabständen angeordnet werden, vorgegeben werden. In Intervallen mit großen Residuen nach der Ausgleichung können noch weitere Knotenpunkte eingefügt werden.

Die Anzahl der bestimmbaren Knotenpunkte ist abhängig von den verfügbaren Pass- und Verknüpfungsinformationen. Jeder in einer Scanneraufnahme gemessene Passpunkt liefert zwei Beobachtungsgleichungen der Kategorie „Bildkoordinatenmessung in der Scanneraufnahme“, dies ergibt bei  $p$  Passpunkten  $2p$  Beobachtungsgleichungen. Die Anzahl der Unbekannten in der Ausgleichung ergibt sich bei  $n$  Knotenpunkten zu  $6n$ . Zur Lösung des Ausgleichungssystems muss wieder gelten, dass die Anzahl der Beobachtungen  $o$  größer als die Anzahl der Unbekannten  $u$  ist, also:

$$\begin{aligned} o &= 2p > 6n = u \\ p &> 3n \end{aligned}$$

Das bedeutet, um mittels Passpunkte die Orientierungsfunktion einer Scanneraufnahme bestimmen zu können, sind pro Knotenpunkt mehr als drei Passpunkte notwendig. Eine angestrebte deutliche Überbestimmung ergibt sich bei etwa fünf Passpunkten pro Knotenpunkt.

Verknüpfungspunkte, die in zwei Scanneraufnahmen gemessen wurden, liefern insgesamt vier Beobachtungsgleichungen der Kategorie „Bildkoordinatenmessung in der Scanneraufnahme“, jedoch sind auch die drei unbekanntes Objektkoordinaten in der Ausgleichung zu bestimmen, womit ein in zwei Aufnahmen gemessener Verknüpfungspunkt mit einer Überbestimmung von eins zur Lösung des Ausgleichungssystems beiträgt. Allgemein trägt ein in  $nph$  Aufnahmen (mit  $nph \geq 2$ ) gemessener Verknüpfungspunkt mit einer Überbestimmung von  $(2nph-3)$  zur Lösung der Ausgleichung bei.

Gemessene Kurvenpunkte auf Pass- oder Verknüpfungskurven (letztere falls sie in mehr als zwei Aufnahmen abgebildet sind) liefern zwei Beobachtungsgleichungen der Kategorie „Bildkoordinatenmessung in der Scanneraufnahme“ und drei weitere Beobachtungsgleichungen der Kategorie „Punkt liegt auf 3D-Kurve“ gemäß Gleichung (6-20). Aber für jeden Kurvenpunkt sind in der Ausgleichung auch die drei unbekanntes Objektkoordinaten und der zugehörige Kurvenparameter zu bestimmen. Damit trägt jeder in einer Scanneraufnahme gemessene Kurvenpunkt mit einer Überbestimmung von eins zur Lösung des gesamten Ausgleichungssystems bei. (vgl. Abschnitt 6.6.3)

Ohne direkte Beobachtungen der Orientierungsparameter entlang der Flugbahn führt das Freilassen aller sechs Parameter der äußeren Orientierung aufgrund der hohen (bei ebenen Gelände vollständigen) Korrelation von Pitch mit der Verschiebung der Plattform in Flugrichtung zu einer Überparametrisierung des Systems. Dem kann durch zusätzliche fiktive Beobachtungen für Pitch und Fixierung zum Beispiel auf den Wert gleich Null begegnet werden.

Bei der **integrierten Sensororientierung** sind direkte Beobachtungen der Sensor-Orientierungsparameter in Form von GPS/INS-Beobachtungen vorhanden. Diese Beobachtungen können als direkte Beobachtungen von Werten der sechsdimensionalen Orientierungsfunktion einer Scanneraufnahme in die Ausgleichung eingeführt werden. Der Knotenpunktastand wird korrespondierend mit der hohen Frequenz der GPS/INS-Beobachtungen sehr dicht sein. Die relative Genauigkeit der GPS/INS-Beobachtungen kann als sehr gut angesehen werden, und damit ist der relative Verlauf der Orientierungsfunktion durch die direkten GPS/INS-Beobachtungen schon sehr gut bestimmt. Es werden sozusagen für jeden Flugstreifen in sich starre Beobachtungsmodelle für die Orientierungsfunktionen („Streifen-GPS/INS-Modelle“) definiert. Etwaige Datumskorrekturen oder Driftparameter für

die Streifen-GPS/INS-Modelle, also Verschiebungen, Verdrehungen und Verbiegungen, können mit Hilfe von Pass- und Verknüpfungsinformationen bestimmt werden, wobei das Modell in Gleichung (6-26) zur Anwendung kommt.

Falls eine einzige Datumskorrektur für den gesamten Block ausreichend ist, können die Streifen-GPS/INS-Modelle zu einem Modell für den gesamten Flugblock zusammengefasst werden, wodurch ein einziges „Block-GPS/INS-Modell“ definiert wird. Für dieses kann mit Hilfe von wenigen Passpunkten eine Verschiebung und Verdrehung erfolgen. Falls eine einzige Datumskorrektur für den gesamten Block nicht ausreichend ist, können im nächst einfachen Fall die Streifen-GPS/INS-Modelle der einzelnen Flugstreifen mit Hilfe von entsprechend mehr Pass- und Verknüpfungspunkten ins Landessystem eingepasst werden.

Wenn in den GPS/INS-Beobachtungen innerhalb eines Streifens Driftphänomene enthalten sind, so können mit Hilfe von zusätzlichen Parametern Korrekturpolynome zur Modellierung und Korrektur dieser Driftphänomene für das betroffene Streifen-GPS/INS-Modell definiert und in der Ausgleichung bestimmt werden (vgl. Abschnitt 6.4 und 6.7). Folgen die Driftphänomene (näherungsweise) einem polynomialen Verlauf, so kann durch diesen Ansatz die Drift korrigiert (oder ihre Auswirkung zumindest gedämpft) werden. Eine Datumskorrektur mit Verschieben und Drehen des GPS/INS-Modells entspricht in diesem Zusammenhang einem Korrekturpolynom vom Grad Null.

Folgen die Driftphänomene keinem polynomialen Verlauf, sondern weisen sie ein "sprunghaftes" Verhalten bzw. „Knicke“ innerhalb eines Streifens auf (vgl. Abb. 8-40 in Abschnitt 8.4.2), so kann das Streifen-GPS/INS-Modell eines Flugstreifens noch in mehrere Teilmodelle unterteilt werden. Für jedes Teilmodell kann ein eigenes Korrekturpolynom im Rahmen der Ausgleichung bestimmt werden. Durch das Unterteilen in mehrer Teilmodelle werden unstetige erste Ableitungen erlaubt, für den stetigen Übergang zwischen den Teilmodellen wird mit Hilfe einer kleinen Überlappung gesorgt.

Die Einführung von Korrekturpolynomen ist generell mit der Einführung von zusätzlichen Parametern in die Ausgleichung verbunden, was einer Einführung von zusätzlichen Freiheitsgraden (engl.: degree of freedom – „dof“) in die Ausgleichung entspricht. Zum Beispiel erhöht die Einführung eines Korrekturpolynoms vom Grad 3 (Index  $i=0(1)3$  in Gleichung (6-26) bzw. (6-22)) für jede Koordinatenkomponente die Anzahl der zusätzlichen dof um 4. Werden also z. B. für alle drei Positionsbeobachtungen eines Streifen-GPS/INS-Modells Korrekturpolynome vom Grad 3 eingeführt, so sind im Rahmen der Ausgleichung zusätzliche 12 dof zu bestimmen.

Die gleiche Anzahl zusätzlicher dof erhält man durch eine Unterteilung eines Streifen-GPS/INS-Modells in 3 Teilmodelle und Definition von Korrekturpolynomen vom Grad 1 (Index  $i=0(1)1$  in Gleichung (6-26) bzw. (6-22)) für die drei Positionsbeobachtungen entlang der Flugbahn. Zwar führen zunächst 3 Teilmodelle mal 3 Koordinatenkomponenten mal 2 dof auf 18 zusätzliche dof, jedoch ergibt sich in den beiden Überlappungsbereichen der drei Teilmodelle durch die Forderung, dass die Teilmodelle stetig ineinander übergehen müssen, auch für jede der drei Koordinatenkomponenten eine zusätzliche Verknüpfungsbedingung. Dadurch ergibt sich die Anzahl der zusätzlich in der Ausgleichung zu bestimmenden dof für dieses Beispiel ebenfalls zu 12.

Zu beachten ist, dass zur Bestimmung der zusätzlichen dof in der Ausgleichung entsprechend mehr Passinformationen in entsprechend geeigneter Verteilung notwendig sind. Um (teure) Passpunkte einzusparen, wurde versuchsweise bei der Projektbearbeitung des Messfluges 2000 der vergleichsweise bescheidene Beitrag, den (billigere) Zweifach-Verknüpfungspunkte zur Ausgleichung liefern, durch folgende Maßnahme erhöht: Verknüpfungspunkte, die auf der Geländeoberfläche liegen, wurden als Höhenpasspunkte in die Ausgleichung eingeführt. Dazu wurde für die näherungsweise aus der Streifen-GPS/INS-Modell-Einpassung bekannten Lagekoordinaten der Verknüpfungspunkte mit Hilfe des Geländemodells die Geländehöhe interpoliert; diese Geländehöhe wurde in der Ausgleichung als Höhenpassinformation verwendet. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass erstens hinreichend gute Näherungen für die Lagekoordinaten der Gelände-Verknüpfungspunkte bekannt sind, und dass zweitens das Geländemodell an diesen Stellen näherungsweise horizontal ist. Beide Voraussetzungen konnten im Fall des Messfluges 2000 als erfüllt betrachtet werden. Im Falle von bewegteren oder gebirgigem Gelände oder/und schlechten Näherungen für die Lagekoordinaten könnte die Genauigkeit der Höhenpassinformation in einem iterativen Prozess sukzessive verbessert werden. Beispiele und Ergebnisse der Verwendung von Gelände-Verknüpfungspunkten als Höhenpasspunkte („DGM-Höhenpasspunkte“) beim Messflug 2000 sind in Abschnitt 8.4 zu finden.

## 6.8 Datenstruktur in ORIENT

In den Abschnitten 6.1 bis 6.7 wurde das grundlegende mathematische Modell von ORIENT und die Abbildungsfunktionen verschiedener Beobachtungskategorien besprochen. In diesem Abschnitt wird die generelle Datenstruktur in ORIENT erläutert ([Kager, 1995], [Rottensteiner, 2001]) und anschließend speziell die Handhabung von Scanneraufnahmen mit direkten Beobachtungen der äußeren Orientierungsparameter mittels eines GPS/INS-Systems besprochen.

Alle Daten werden in ORIENT in einer sogenannten „ORIENT Datenbasis“ gespeichert und in Datenräumen (im folgenden auch häufig nur kurz als „Räume“ bezeichnet) organisiert. In ORIENT werden zwei Arten von Datenräumen unterschieden, Parameterräume und Beobachtungsräume. Wie in Gleichung (6-1) dargestellt ist, kann jede Beobachtung als eine Funktion von Parametern aufgefasst werden. Der Begriff „Parameter“ ist hier sehr allgemein zu verstehen und umfasst alles, was keine Beobachtung darstellt (z. B. äußere/innere Orientierungsparameter, Verzeichnungsparameter, zusätzliche Parameter).

Alle Beobachtungen eines Beobachtungsdatensatzes werden in einem Beobachtungsraum gespeichert. Dem Beobachtungsraum ist ein Beobachtungskoordinatensystem zugeordnet, und die zu einem bestimmten Beobachtungsraum zugehörigen Parameter sind in Parameterräumen abgelegt. Die Objektpunkte  $P$  und äußeren Referenzpunkte  $P_0$  sind in einem speziellen Parameterraum, dem sogenannten „Referenzsystem“ oder kurz REFSYS, enthalten. Die Parameter eines Parameterraumes können in der Ausgleichung als Konstante oder Unbekannte teilnehmen. (Fiktiv) beobachtete Parameter sind Beobachtungen und befinden sich in entsprechenden Beobachtungsräumen.

Jedem Raum ist ein Raumtyp, eine Raumnummer, ein Header und eine Punktliste zugeordnet. Der Raumtyp gibt im Falle von Beobachtungsräumen an, welche Abbildungsfunktion zu

verwendet ist, und im Falle von Parameterräumen, um welchen Parametertyp es sich handelt (Rotationen, Maßstab, etc.). Mehrere Räume können die gleiche Raumnummer teilen, so haben z. B. der Beobachtungsraum eines Photos und der zugehörigen Parameterraum der Rotationen dieses Photos üblicherweise die gleiche Raumnummer. Ein Raum ist durch Raumtyp in Kombination mit der Raumnummer eindeutig gekennzeichnet.

Der Header eines Raumes beinhaltet Referenzen zu den Parameterräumen der Abbildungsfunktion und den „Sub-Typ“ des Raumes. Es ist möglich, dass ein Parameterraum mehreren Beobachtungsräumen zugewiesen ist, indem dieser Parameterraum in den Headern der entsprechenden Beobachtungsräume referenziert ist. Ein einfaches Beispiel dazu ist die innere Orientierung einer Messkamera, mit der mehrere Photos gemacht wurden. Die innere Orientierung der Messkamera ist nur einmal in einem Parameterraum gespeichert und wird mittels der entsprechenden Referenz in den Headern der Photo-Beobachtungsräume allen Photos zugewiesen. Der Sub-Typ des Raumes kodiert spezielle Eigenschaften des Raumes. Zum Beispiel gibt der Sub-Typ eines Rotations-Parameterraumes an, welche Parametrisierung für die Drehmatrix verwendet wird. Der Sub-Typ bei Kurven aus zusammengesetzten Polynomen gibt an, welche Kurven-Interpolationsart (Spline-, Schmiege- oder Akima-Interpolation) und welche Parametrisierungsart (konstante, chordale, etc. Parametrisierung) verwendet wird.

Die Punktliste beinhaltet schließlich die eigentlichen Daten. Alle Daten sind in ORIENT als „Punkte“ organisiert; jeder Punkt hat eine eindeutige Punktnummer, bis zu drei „Koordinaten“ und im Falle von Beobachtungsräumen auch a-priori Genauigkeitsangaben zu jeder Koordinate. Zum Beispiel besteht im Falle von beobachteten Modellkoordinaten ein Punkt aus einer Punktnummer, den drei beobachteten Modellkoordinaten ( $x, y, z$ ) und den Genauigkeiten der beobachteten Koordinaten ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ). Im Falle von fiktiven Beobachtungen auf Polynomialflächen beinhaltet ein Punkt nur die Punktnummer und eine Genauigkeitsangabe, aber keine Koordinaten, weil die fiktive Beobachtung bekannt ist und „Abstand des Punktes von der Fläche ist gleich Null“ lautet. Für jeden Punkt definiert ein Status-Wort, ob der Punkt aktiv ist, also in der Ausgleichung teilnehmen soll, oder ob der Punkt inaktiv ist und nicht in der Ausgleichung teilnehmen soll.

Eine tabellarische Übersicht der beim mathematischen Modell besprochenen Beobachtungskategorien und deren Parameter befindet sich im Anhang, wobei die in ORIENT gebräuchlichen Bezeichnungen verwendet werden. Weiters wird im Anhang die ORIENT-Datenstruktur für eine Scanneraufnahme mit direkten GPS/INS-Beobachtungen der äußeren Orientierungsparameter entlang der Flugbahn detaillierter beschrieben.

Die Datenstruktur in ORIENT ist so aufgebaut, dass der Operateur für die Ausgleichung genau festlegen kann, welche Beobachtungen und Parameter teilnehmen sollen:

- Der Operateur kann festlegen, welche Beobachtungskategorien in der Ausgleichung teilnehmen sollen.
- Für jede Beobachtungskategorie kann eine Liste von Räumen, die in der Ausgleichung teilnehmen sollen, angegeben werden.
- Weiters kann für jede Beobachtungskategorie angegeben werden, welche Parameter der spezifischen Abbildungsfunktion in der Ausgleichung als Unbekannte bestimmt bzw. welche Parameter festgehalten werden sollen.

- Um einzelne Punkte von der Ausgleichung auszuschließen, können sie deaktiviert werden. Bei Punkten in Beobachtungsräumen können auch einzelne Koordinaten deaktiviert werden. Zum Beispiel wird ein Höhenpasspunkt so generiert, dass der Punkt in einem Beobachtungsraum vom Typ „Beobachtete Passpunkte“ eingefügt wird und seine Lagekoordinaten deaktiviert werden.
- Wenn einzelne Parameter konstant gehalten werden sollen, obwohl die Parametergruppe als Unbekannte gewählt wurde, so kann der entsprechende Punkt im Parameterraum deaktiviert werden. Deaktivierte Parameter werden zwar zum Aufstellen der Abbildungsfunktionen verwendet, aber sie werden nicht als Unbekannte in der Ausgleichung bestimmt.

Beispiel: Bildkoordinatenmessungen in Aufnahmen von Messkameras und von Amateurkameras sollen gleichzeitig in einer Ausgleichung teilnehmen. Die Parametergruppe „inneren Orientierung“ wird für alle Photos als Unbekannte angegeben, aber bei der Messkamera ist die innere Orientierung deaktiviert und bleibt in der Ausgleichung somit konstant, während bei der Amateurkamera die innere Orientierung aktiv ist und in der Ausgleichung bestimmt wird.

## 7 Wirkungsfiguren der einzelnen Fehlereinflüsse

Die Genauigkeit der Georeferenzierung einer Scanneraufnahme ist von der Genauigkeit der Orientierungsfunktion und des bei der Orthophotoherstellung verwendeten digitalen Geländemodells abhängig. In diesem Kapitel werden zunächst die Auswirkungen von Fehlern in den einzelnen Orientierungselementen gezeigt. Dabei wird von einer idealisierten Standardaufnahme ausgegangen (siehe Abb. 7-1). In der Folge wird jeweils ein fehlerhaftes Orientierungselement unter der Annahme betrachtet, dass alle anderen Orientierungselemente fehlerfrei sind. Im Anschluss daran werden ein paar Beispiele diskutiert, in denen mehrere Fehler zusammenwirken<sup>1</sup>. Danach wird die Wirkungsweise von zusätzlichen Polynomparametern in Gleichung (6-26) anhand von Wirkungsfiguren veranschaulicht. Und zum Abschluss dieses Kapitels werden Auswirkungen von Fehlern im Geländemodell auf die Orthophotoherstellung betrachtet.

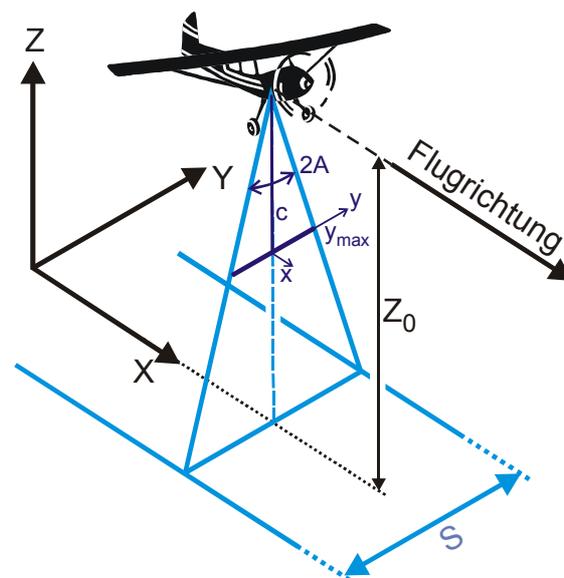


Abb. 7-1: Standardaufnahmesituation für die Fehlerüberlegungen

Abb. 7-1 zeigt die für die folgenden Betrachtungen zu Grunde liegende Standardaufnahmesituation. Die Flugbahn folgt exakt einer Parallelen zur  $X$ -Achse in der Flughöhe  $Z_0$  über Grund und sämtliche Drehwinkel seien gleich Null. Das durchgezogene Dreieck symbolisiert den in einer Aufnahmezeile aufgenommenen Bereich mit der Streifenbreite  $S$  am Boden, und die Schenkel des gleichseitigen Dreiecks schließen den gesamten Öffnungswinkel  $2A$  des Aufnahmesystems ein; in der Bildebene gilt unter dem Beobachtungswinkel  $\alpha = A$  für die  $y$ -Koordinate  $y = y_{max}$ .

<sup>1</sup> Weitere Beispiele von Kombinationen mehrerer Fehlereinflüsse sind in [Portalés Ricart, 2002] enthalten.

## 7.1 Fehler in Roll

Bei einem Fehler  $\Delta r_o$  in Roll ergibt sich die in Abb. 7-2 dargestellte Situation: Die Bildebene wird um  $\Delta r_o$  aus ihrer Ursprungslage herausgedreht, während die Objektpunkte am Boden unverändert bleiben. Bei fehlerfreier Orientierung ergibt die Rückprojektion eines 3D-Punktes  $P$  am Streifenrand in die Aufnahmezeile die Position  $y_P$ . Jedoch bei einer um  $\Delta r_o$  fehlerhaften Orientierung wird bei der Rückprojektion von  $P$  die Position  $(y_P + \Delta y_P)$  gefunden. In der Scanneraufnahme ist der Fehlervektor  $\Delta \mathbf{f} = (\Delta x = 0, \Delta y)^T$  für  $y$  am Streifenrand am größten und in der Streifenmitte, also im Nadir, am kleinsten. Über die gesamte Streifenbreite weisen die Fehlervektoren in die gleiche Richtung.

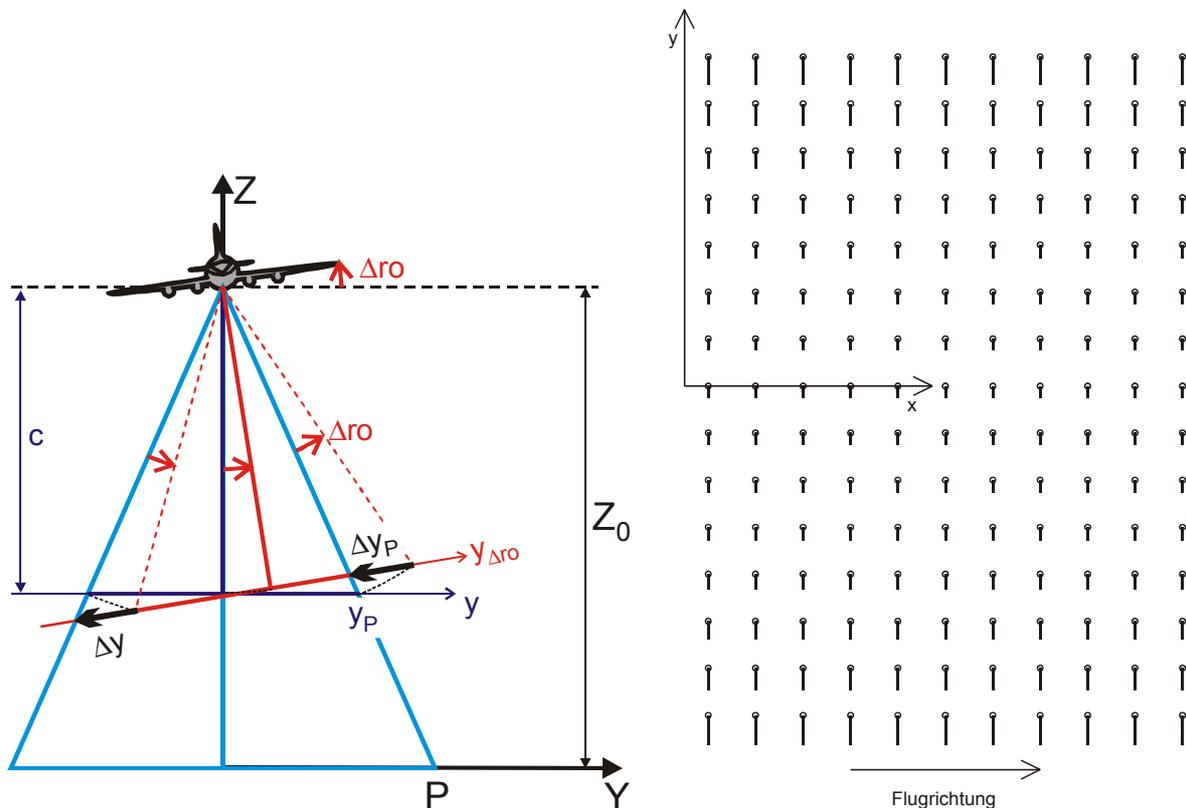


Abb. 7-2: links: Darstellung der Situation bei einem Fehler  $\Delta r_o$  in Roll und rechts: Wirkungsfigur mit Fehlervektoren  $\Delta \mathbf{f} = (\Delta x = 0, \Delta y)^T$  aufgrund  $\Delta r_o$  entlang der Flugbahn für ein regelmäßiges Gitter von Punkten in der Scanneraufnahme

Es gilt:  $y = c \cdot \tan \alpha$ , mit  $\alpha$  ... Beobachtungswinkel

$$y + \Delta y = c \cdot \tan (\alpha - \Delta r_o)$$

$$\Delta y = c \cdot [ \tan (\alpha - \Delta r_o) - \tan \alpha ]$$

$$\Delta y = -c \cdot \frac{\sin(\Delta r_o)}{\cos(\alpha - \Delta r_o) \cdot \cos \alpha}$$

Für ein kleines  $\Delta r_o$  kann noch folgende Vereinfachung durchgeführt werden:

$$\Delta y \approx -c \cdot \frac{\Delta r_o}{\cos^2 \alpha} \quad \text{mit } \Delta r_o \text{ im Bogenmaß}$$

Anschaulich lässt sich das Fehlerverhalten in der Scanneraufnahme mittels einer sogenannten Wirkungsfigur darstellen, wie sie in Abb. 7-2 rechts dargestellt ist. Dabei wurden zunächst in einer Scanneraufnahme Punkte in einem gleichabständigen Gitter angeordnet und ein konstanter Fehler  $\Delta r_o$  entlang der Flugbahn angenommen. Die resultierenden Fehlervektoren  $\Delta \mathbf{f} = (\Delta x = 0, \Delta y)^T$  in jedem Punkt sind in der Scanneraufnahme vergrößert eingezeichnet.

## 7.2 Fehler in Pitch

Für einen Fehler  $\Delta pi$  in Pitch ergibt sich die in Abb. 7-3 dargestellte Situation: Die Bildebene wird um  $\Delta pi$  aus ihrer Ursprungslage herausgedreht, während die Objektpunkte am Boden unverändert bleiben. Rückprojektion der Geländepunkte in die Scanneraufnahme und Vergleich der rückprojizierten Bildpunkte mit den ursprünglichen Bildpunkten ergibt die Fehlervektoren  $\Delta \mathbf{f} = (\Delta x, \Delta y \approx 0)^T$ , wobei die  $y$ -Komponente bei kleinem  $\Delta pi$  vernachlässigbar klein ist. Die Fehlervektoren weisen in Flugrichtung und haben über die gesamte Streifenbreite gleiche Länge, wie auch die Wirkungsfigur in Abb. 7-3 rechts veranschaulicht.

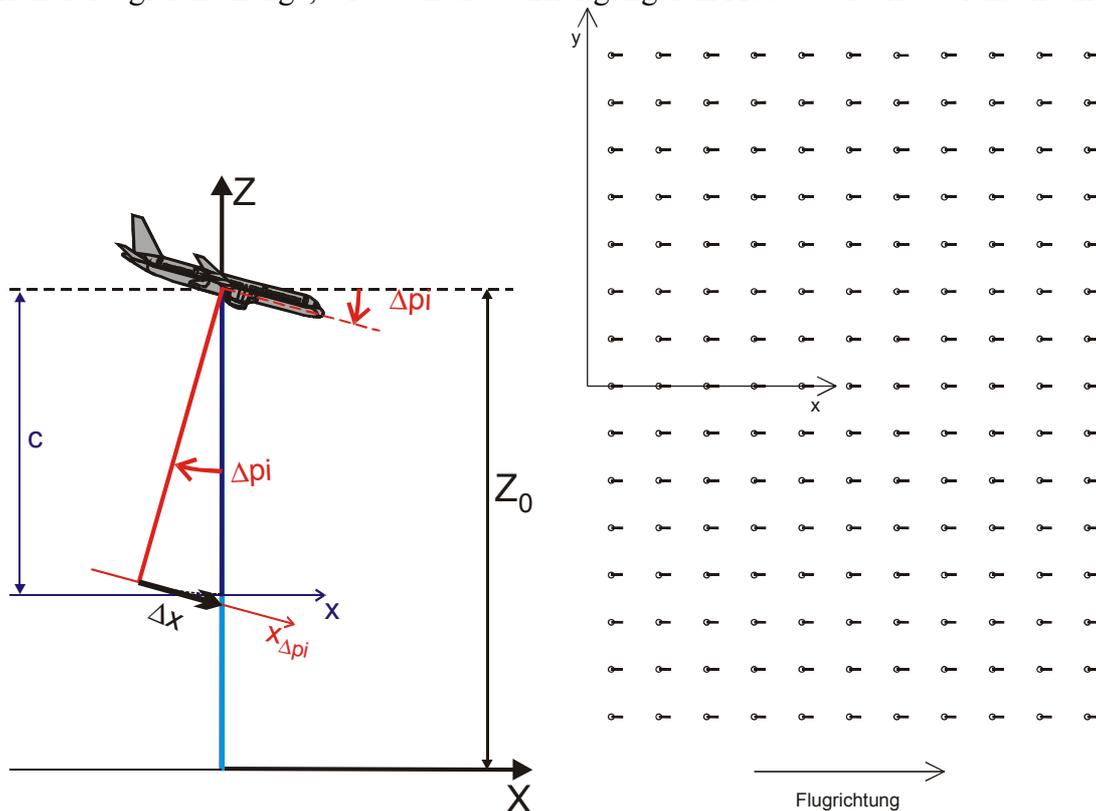


Abb. 7-3: links: Darstellung der Situation bei einem Fehler  $\Delta pi$  in Pitch und rechts: Wirkungsfigur mit Fehlervektoren  $\Delta \mathbf{f} = (\Delta x, \Delta y \approx 0)^T$  aufgrund  $\Delta pi$  entlang der Flugbahn für ein regelmäßiges Gitter von Punkten in der Scanneraufnahme

Es gilt:  $\Delta x = c \cdot \tan \Delta pi$

### 7.3 Fehler in Yaw

Für einen Fehler  $\Delta ya$  in Yaw ergibt sich die in Abb. 7-4 dargestellte Situation: Die Bildebene wird um  $\Delta ya$  gedreht. Auch hier ist die  $y$ -Komponente der Fehlervektoren  $\Delta \mathbf{f} = (\Delta x, \Delta y)^T$  für kleine  $\Delta ya$  vernachlässigbar. In der Streifenmitte sind für  $y=0$  auch die Fehlervektoren  $\Delta \mathbf{f} = \mathbf{0}$ , sie weisen bei positivem  $\Delta ya$  und für positives  $y$  in Flugrichtung und für negatives  $y$  gegen die Flugrichtung, wie in Abb. 7-4 rechts veranschaulicht ist.

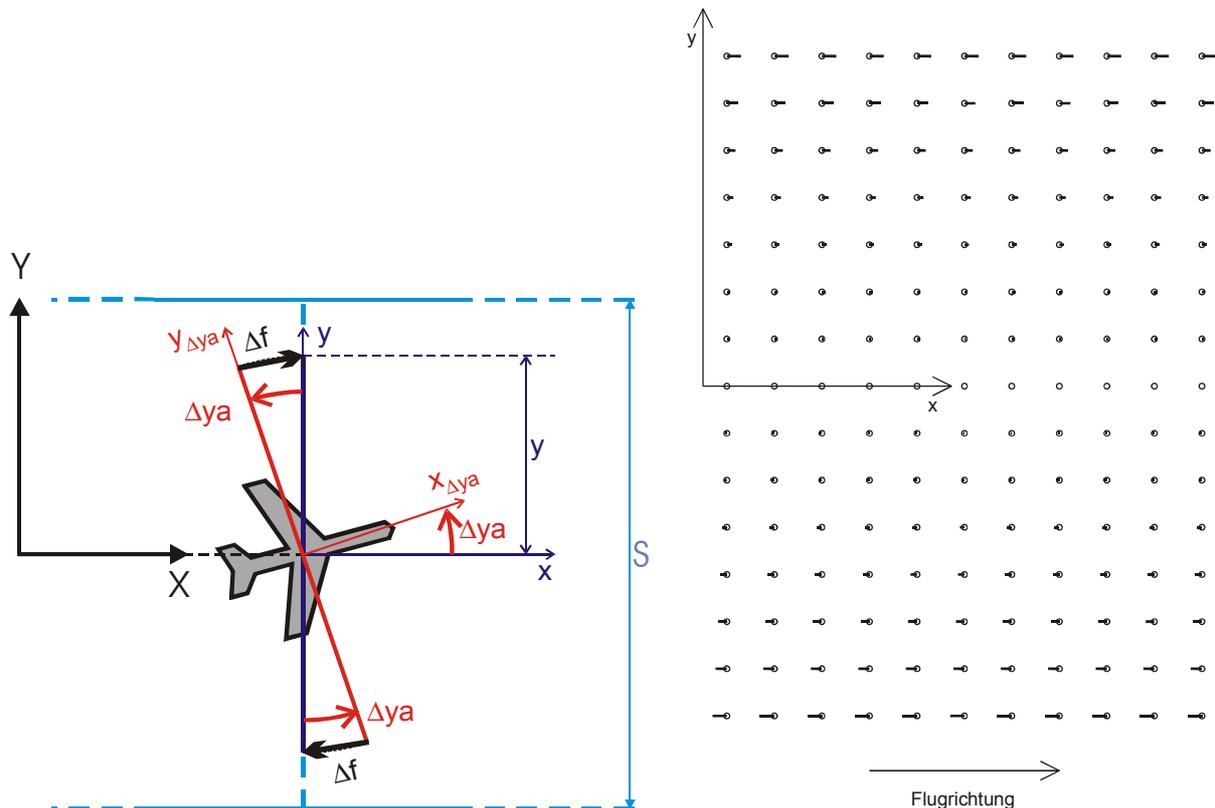


Abb. 7-4: links: Darstellung der Situation bei einem Fehler  $\Delta ya$  in Yaw und rechts: Wirkungsfigur mit Fehlervektoren  $\Delta \mathbf{f} = (\Delta x, \Delta y \approx 0)^T$  aufgrund  $\Delta ya$  entlang der Flugbahn für ein regelmäßiges Gitter von Punkten in der Scanneraufnahme

Es gilt:  $\Delta x = y \cdot \sin \Delta ya$

Für ein kleines  $\Delta ya$  gilt folgende Vereinfachung:

$$\Delta x = y \cdot \Delta ya \quad \text{mit } \Delta ya \text{ im Bogenmaß}$$

Für die  $y$ -Komponente des Fehlervektors  $\Delta \mathbf{f}$  gilt:

$$\Delta y = y \cdot (1 - \cos \Delta ya)$$

Es ist leicht einsichtig, dass für  $\Delta ya$  gegen Null auch  $\Delta y$  gegen Null geht.

## 7.4 Fehler in den Positionskomponenten $X_0$ , $Y_0$ , $Z_0$

Lagefehler in der äußeren Orientierung wirken sich auch in der Scanneraufnahme als Verschiebungen aus; die Länge der Fehlervektoren im Bildraum weist den um den Bildmaßstab entsprechend verkleinerten Betrag der Lagefehler der äußeren Orientierung auf. Die entsprechenden Wirkungsfiguren für einen Fehler  $\Delta X_0$  bzw.  $\Delta Y_0$  sind in Abb. 7-5 dargestellt.

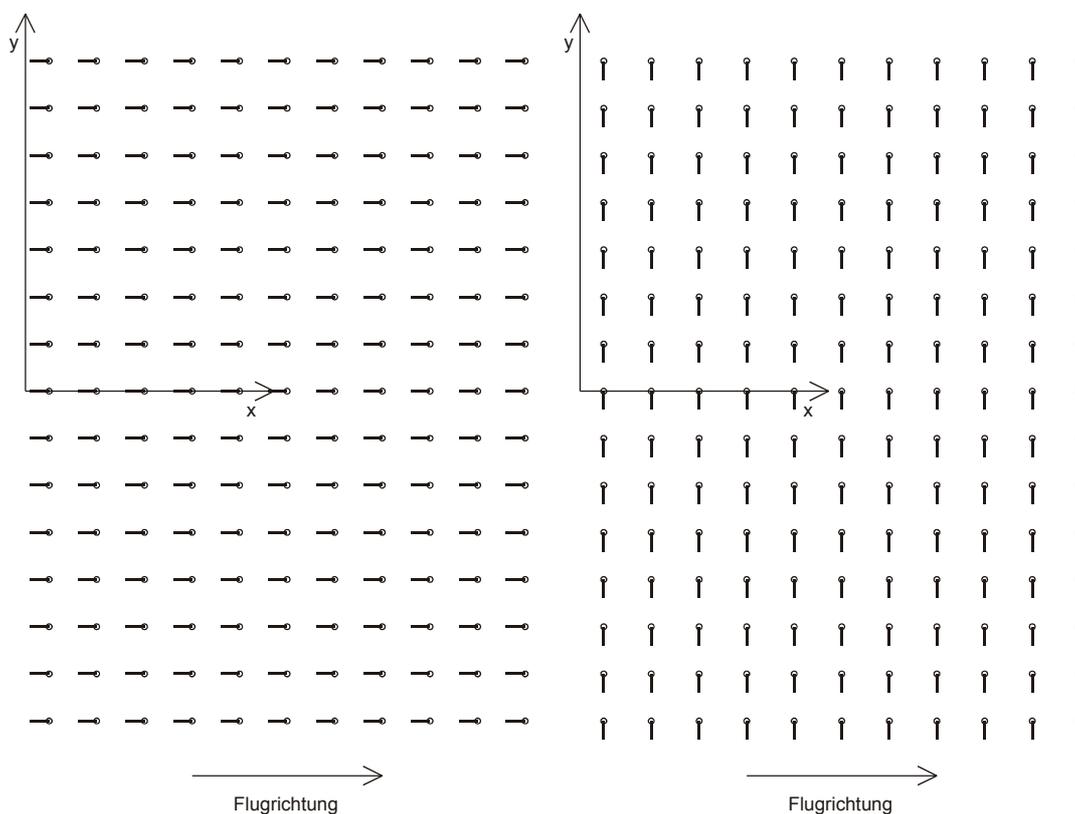


Abb. 7-5: Wirkungsfiguren mit Fehlervektoren  $\Delta \mathbf{f} = (\Delta x, \Delta y)^T$  für ein regelmäßiges Gitter von Punkten in der Scanneraufnahme  
 links aufgrund eines Fehlers  $\Delta X_0$ :  $\Delta \mathbf{f} = (\Delta x, \Delta y = 0)^T$   
 rechts aufgrund eines Fehlers  $\Delta Y_0$ :  $\Delta \mathbf{f} = (\Delta x = 0, \Delta y)^T$

Abb. 7-6 zeigt schließlich, wie sich ein Fehler in der Flughöhe  $\Delta Z_0$  quer zur Flugrichtung auswirkt: die Fehlervektoren sind in der Streifenmitte gleich Null und werden zu den Streifenrändern mit zunehmendem Betrag von  $y$  kontinuierlich größer. Die Fehlervektoren  $\Delta \mathbf{f} = (\Delta x = 0, \Delta y)$  weisen bei positivem  $\Delta Z_0$  links und rechts der Flugachse zur Streifenmitte und bei negativen  $\Delta Z_0$  zum Streifenrand.

Es gilt:

$$\frac{Y}{Z_0} = \frac{y}{c} \quad \text{und} \quad \frac{Y}{Z_0 + \Delta Z_0} = \frac{y + \Delta y}{c}$$

Daraus folgt nach einigen Umformungen:

$$\Delta y = -y \frac{\Delta Z_0}{Z_0 + \Delta Z_0}$$

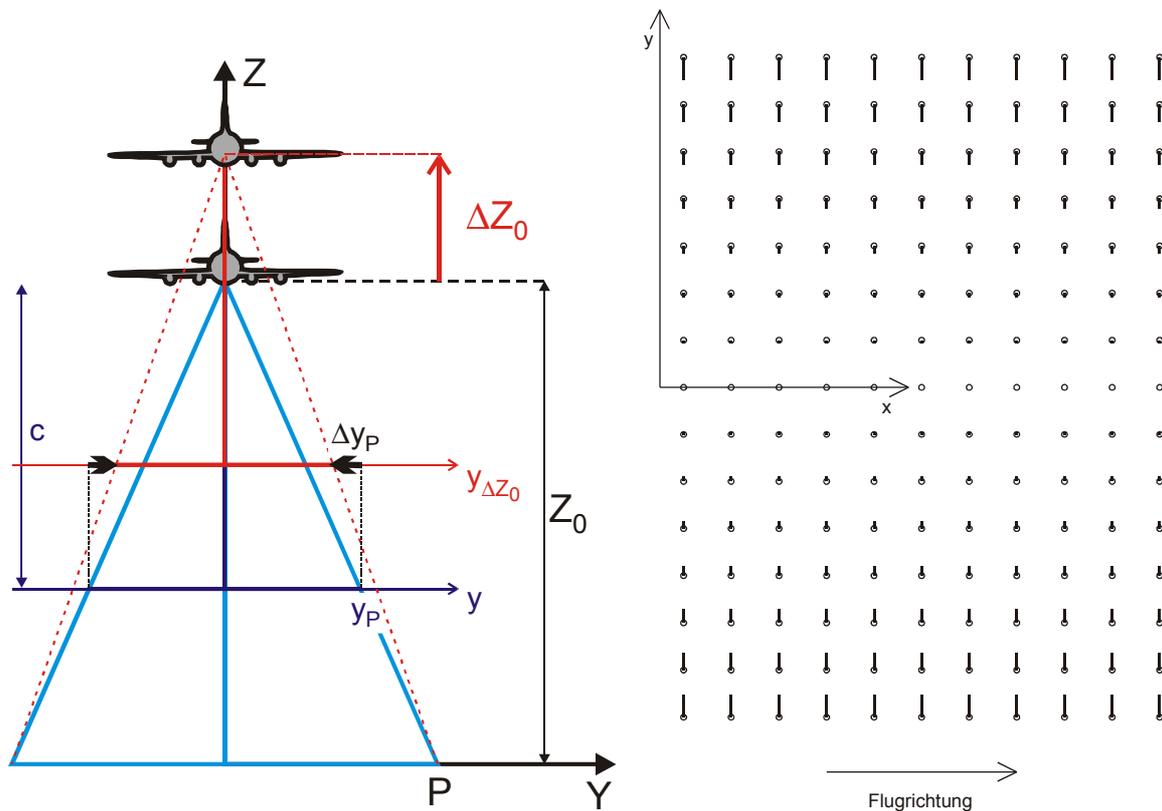


Abb. 7-6: links: Darstellung der Situation bei einem Fehler  $\Delta Z_0$  in der Flughöhe und rechts: Wirkungsfigur mit Fehlervektoren  $\Delta f = (\Delta x = 0, \Delta y)^T$  aufgrund  $\Delta Z_0$  für ein regelmäßiges Gitter von Punkten in der Scanneraufnahme

## 7.5 Zusammenwirken von Fehlern in mehreren Orientierungselementen

Ein Vergleich der Wirkungsfigur in Abb. 7-2 rechts für einen Fehler in Roll und der Wirkungsfigur in Abb. 7-5 rechts für eine Verschiebung quer zur Flugrichtung zeigt starke Ähnlichkeiten und damit eine hohe Korrelation der beiden Größen. Ein Vergleich der Wirkungsfiguren in Abb. 7-3 rechts für einen Fehler in Pitch und der Wirkungsfigur in Abb. 7-5 links für eine Verschiebung in Flugrichtung zeigt noch stärkere Ähnlichkeiten, und bei ebenen Gelände ergibt sich praktisch eine totale Korrelation dieser beiden Größen. Sind diese hoch korrelierten Parameter ohne zusätzliche direkte Beobachtungen aus einer GPS/INS-Integration gleichzeitig in der Ausgleichung zu bestimmen, führt dies zu Singularitäten, welchen mit fiktiven Beobachtungen (z. B. fiktive Beobachtung des Pitch-Winkels entlang der Flugbahn  $pi = 0$ ) entgegengewirkt werden kann und muss.

Kombinationen mehrerer Fehler lassen sich anhand von Wirkungsfiguren gut veranschaulichen. So können sich die Auswirkungen zweier oder mehrerer Fehler in manchen Bereichen gegenseitig auslöschen und in anderen Bereichen dagegen verstärken. In den folgenden Beispielen sind die angegebenen Fehler jeweils größer Null, und die Fehlerbeträge sind so angenommen worden, dass die Beträge der Fehlervektoren aufgrund der Einzelfehler am Streifenrand in etwa gleich groß sind.

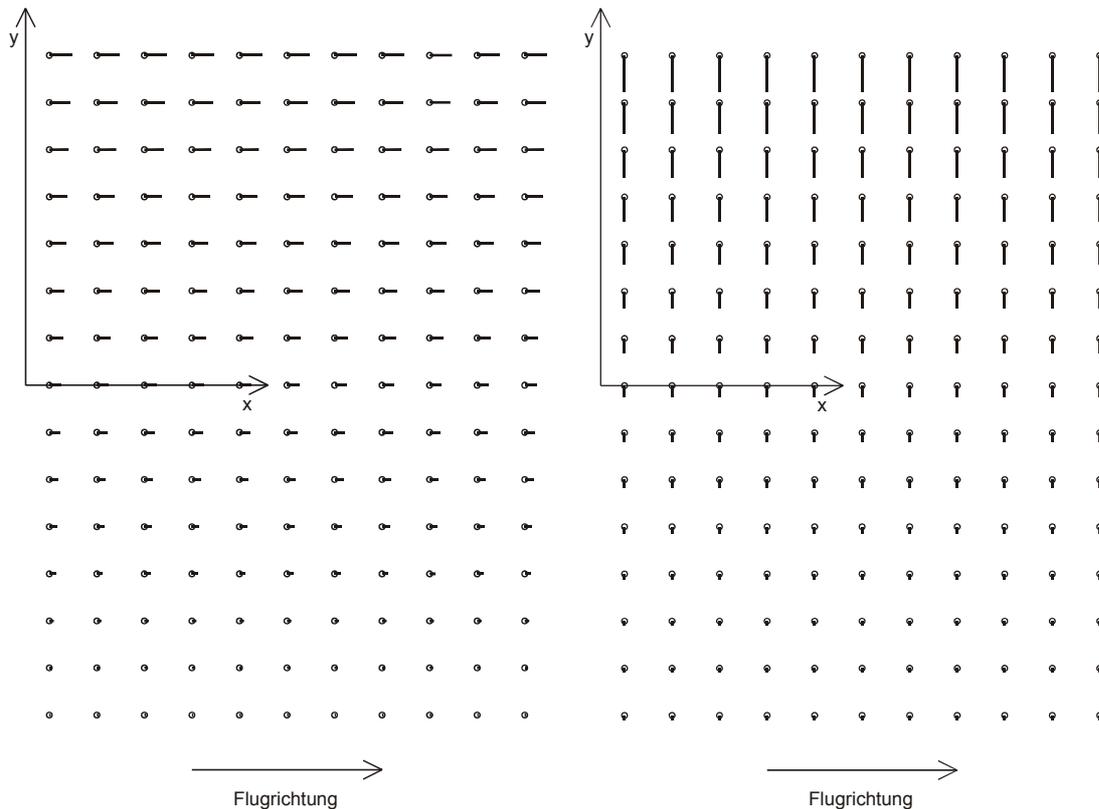


Abb. 7-7: Wirkungsfiguren mit Fehlervektoren  $\Delta f = (\Delta x, \Delta y)^T$  für ein regelmäßiges Gitter von Punkten in der Scanneraufnahme:  
 links: aufgrund von Fehlern  $\Delta p_i$  und  $\Delta y_a$   
 rechts: aufgrund von Fehlern  $\Delta r_o$  und  $\Delta Z_0$

Abb. 7-7 links zeigt das Zusammenwirken von Fehlern  $\Delta p_i$  und  $\Delta y_a$ : Dieses Bild erhält man, indem man die Fehlervektoren der Wirkungsfiguren der Einzelfehler (vgl. Abb. 7-3 und Abb. 7-4) addiert. Man erkennt deutlich, dass die Fehlervektoren am rechten Streifenrand der Scanneraufnahme fast verschwinden; die Fehlervektoren der Einzelfehler sind in diesem Bereich gegengleich gerichtet, sodass sich die Auswirkungen der Einzelfehler gegenseitig auslöschen. In der Streifenmitte wirkt nur der Fehler  $\Delta p_i$ , weil die Auswirkung eines Fehlers  $\Delta y_a$  in der Streifenmitte gleich Null ist. Am linken Streifenrand weisen die Fehlervektoren der Einzelfehler in die gleiche Richtung und werden daher aufaddiert. Da die Einzelfehler parallel zur Flugrichtung wirken, bewirkt auch die Kombination der Einzelfehler Fehlervektoren parallel zur Flugrichtung.

Ähnlich zeigt Abb. 7-7 rechts das Zusammenwirken von Fehlern  $\Delta r_o$  und  $\Delta Z_0$ ; auch hier ergibt sich auf der einen Seite fast eine Auslöschung und auf der anderen Seite eine Verstärkung der Einzelfehler, wobei in diesem Beispiel die Fehler senkrecht zur Flugrichtung wirken.

Abb. 7-8 zeigt schließlich das Zusammenwirken von drei bzw. vier Fehlern. Ist auch hier zwar jede Wirkungsfigur durch (gedankliches) Addieren der Fehlervektoren der Einzelfehler leicht nachvollziehbar, so ergeben sich doch in der Kombination recht interessante Schaubilder der Fehlervektoren. Die Wirkungsfigur in Abb. 7-8 links entsteht aus Abb. 7-7 links, in der die Fehler  $\Delta p_i$  und  $\Delta y_a$  zusammenwirken, durch das zusätzliche Wirken eines

Fehlers  $\Delta r_o$ . In Summe ergibt sich ein Fehlerbild, in dem am linken Streifenrand durch Aufaddieren aller drei Fehlerbeträge die größten Fehler entstehen. In der Streifenmitte wirken nur  $\Delta r_o$  und  $\Delta p_i$ , weil die Fehlerwirkung von  $\Delta y_a$  in der Streifenmitte gleich Null ist. Und am rechten Streifenrand löschen sich die Fehler von  $\Delta p_i$  und  $\Delta y_a$  gegenseitig aus, und es wirkt nur der Fehler von  $\Delta r_o$ .

Die Wirkungsfigur in Abb. 7-8 mitte entsteht ebenfalls aus Abb. 7-7 links, in der die Fehler  $\Delta p_i$  und  $\Delta y_a$  zusammenwirken, jetzt aber durch das zusätzliche Wirken eines Fehlers  $\Delta Z_0$ . In Summe ergibt sich ein Fehlerbild, in dem die Vektoren am linken Streifenrand schräg nach vorne in Flugrichtung zeigen und den größten Fehlerbetrag als Summe der Einzelfehler aufweisen. In der Streifenmitte weisen die Fehlervektoren exakt in Flugrichtung; es wirkt nur der Fehler  $\Delta p_i$ . Und schließlich stehen die Fehlervektoren am rechten Streifenrand genau senkrecht zur Flugrichtung, die Einflüsse von  $\Delta p_i$  und  $\Delta y_a$  löschen sich gegenseitig aus und es wirkt nur der Fehler  $\Delta Z_0$ .

Die Wirkungsfigur in Abb. 7-8 rechts entsteht schließlich aus Addition von Abb. 7-7 links und rechts, und es wirken die Drehwinkel Fehler  $\Delta r_o$ ,  $\Delta p_i$  und  $\Delta y_a$  und ein Fehler in der Flughöhe  $\Delta Z_0$  zusammen. Am linken Streifenrand werden die Fehlereinflüsse aller Einzelfehler aufaddiert, in der Streifenmitte wirken nur die Fehler  $\Delta r_o$  und  $\Delta p_i$  und am rechten Streifenrand löschen sich die Fehlereinflüsse gegenseitig aus.

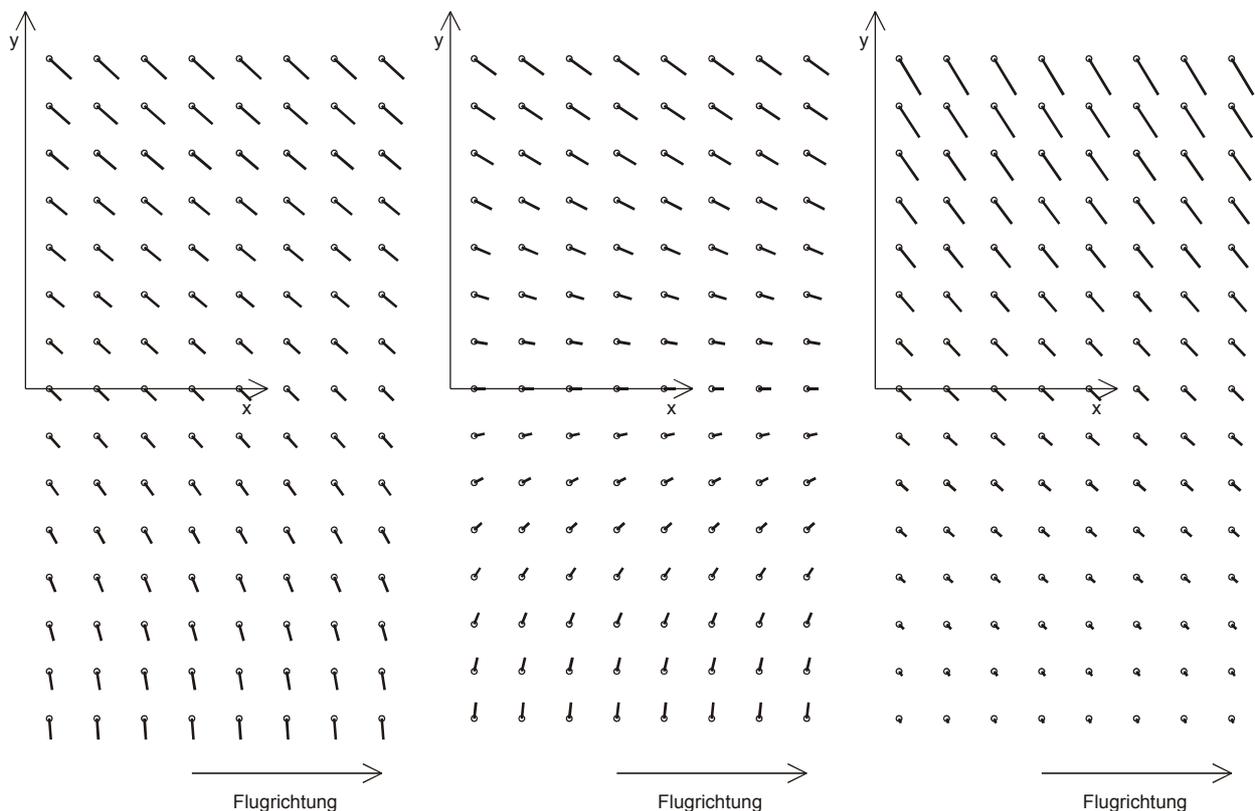


Abb. 7-8: Wirkungsfiguren mit Fehlervektoren  $\Delta f = (\Delta x, \Delta y)^T$  für ein regelmäßiges Gitter von Punkten in der Scanneraufnahme:  
 links: aufgrund von Fehlern  $\Delta r_o$ ,  $\Delta p_i$  und  $\Delta y_a$   
 mitte: aufgrund von Fehlern  $\Delta p_i$ ,  $\Delta y_a$  und  $\Delta Z_0$   
 rechts: aufgrund von Fehlern  $\Delta r_o$ ,  $\Delta p_i$ ,  $\Delta y_a$  und  $\Delta Z_0$

## 7.6 Wirkungsfiguren der zusätzlichen Polynomkoeffizienten

Mit Hilfe der Wirkungsfiguren lässt sich auch die Wirkung der zusätzlichen Polynomparameter *adp* der äußeren Orientierungsparametern in Gleichung (6-22) bzw. (6-26) anschaulich darstellen. Ausgangssituation sei wieder die idealisierte Aufnahmesituation wie in Abb. 7-1 dargestellt ist. Es werden nun keine Fehler  $\Delta r_o$ ,  $\Delta p_i$ ,  $\Delta y_a$  bzw.  $\Delta X_0$ ,  $\Delta Y_0$ ,  $\Delta Z_0$  eingeführt, sondern einzelne Polynomkoeffizienten aus Gleichung (6-22) ungleich Null gesetzt. Zur Illustration werden im folgenden die Wirkungsfiguren der linearen und quadratischen Terme der zusätzlichen Polynomkoeffizienten für  $Y_0$  und  $Z_0$  dargestellt.

Abb. 7-9 zeigt die Wirkung von zusätzlichen Polynomkoeffizienten bei  $Y_0$ : Links wird der Polynomkoeffizient  $b_1$  aus Gleichung (6-22) ungleich Null gesetzt; dieser Koeffizient entspricht einer linearen Änderung von  $Y_0$  in Abhängigkeit von der Entfernung vom Referenzscan. Rechts wird der Polynomkoeffizient  $b_2$  aus Gleichung (6-22) ungleich Null gesetzt; dieser Koeffizient entspricht einer quadratischen Änderung von  $Y_0$  in Abhängigkeit von der Entfernung vom Referenzscan.

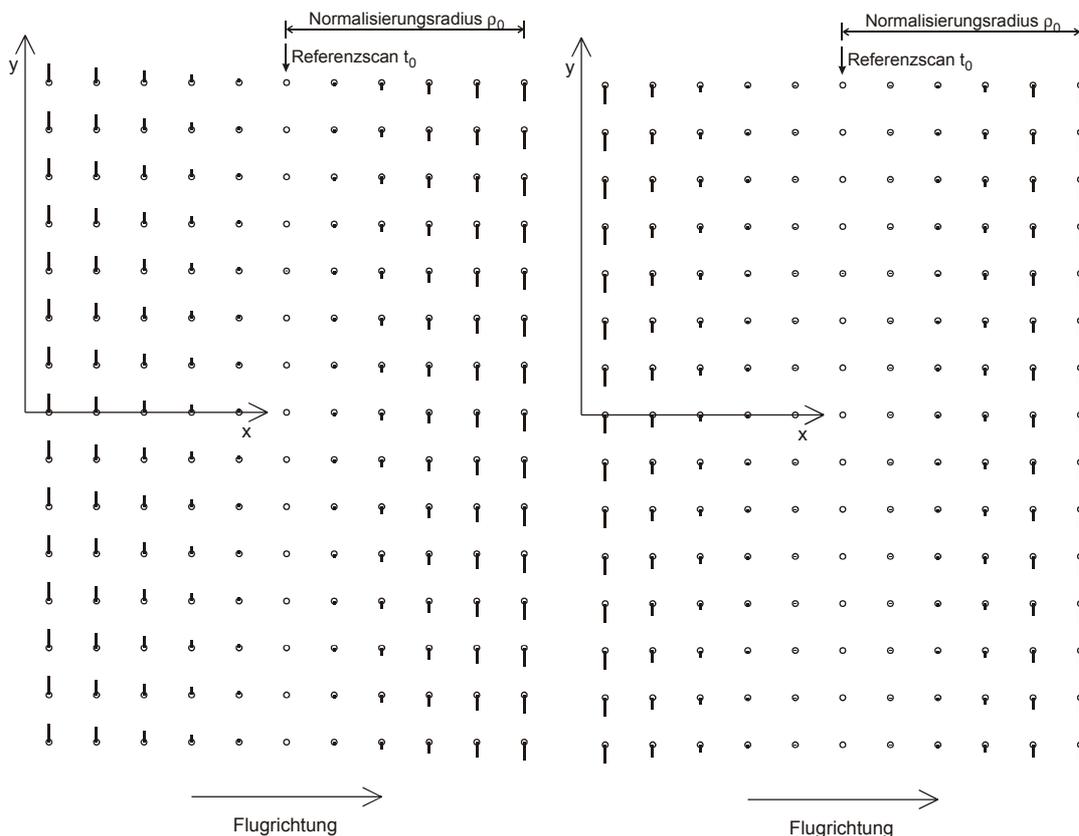


Abb. 7-9: Wirkungsfigur von zusätzlichen Polynomkoeffizienten bei  $Y_0$ :  
links: Polynomkoeffizienten  $b_1$  aus Gleichung (6-22) ungleich Null  
rechts: Polynomkoeffizienten  $b_2$  aus Gleichung (6-22) ungleich Null

Abb. 7-10 zeigt die Wirkung von zusätzlichen Polynomkoeffizienten bei  $Z_0$ : Links wird der Polynomkoeffizient  $c_1$  aus Gleichung (6-22) ungleich Null gesetzt; dieser Koeffizient entspricht einer linearen Änderung von  $Z_0$  in Abhängigkeit von der Entfernung vom Referenzscan. Rechts wird der Polynomkoeffizient  $c_2$  aus Gleichung (6-22) ungleich Null

gesetzt; dieser Koeffizient entspricht einer quadratischen Änderung von  $Z_0$  in Abhängigkeit von der Entfernung vom Referenzscan.

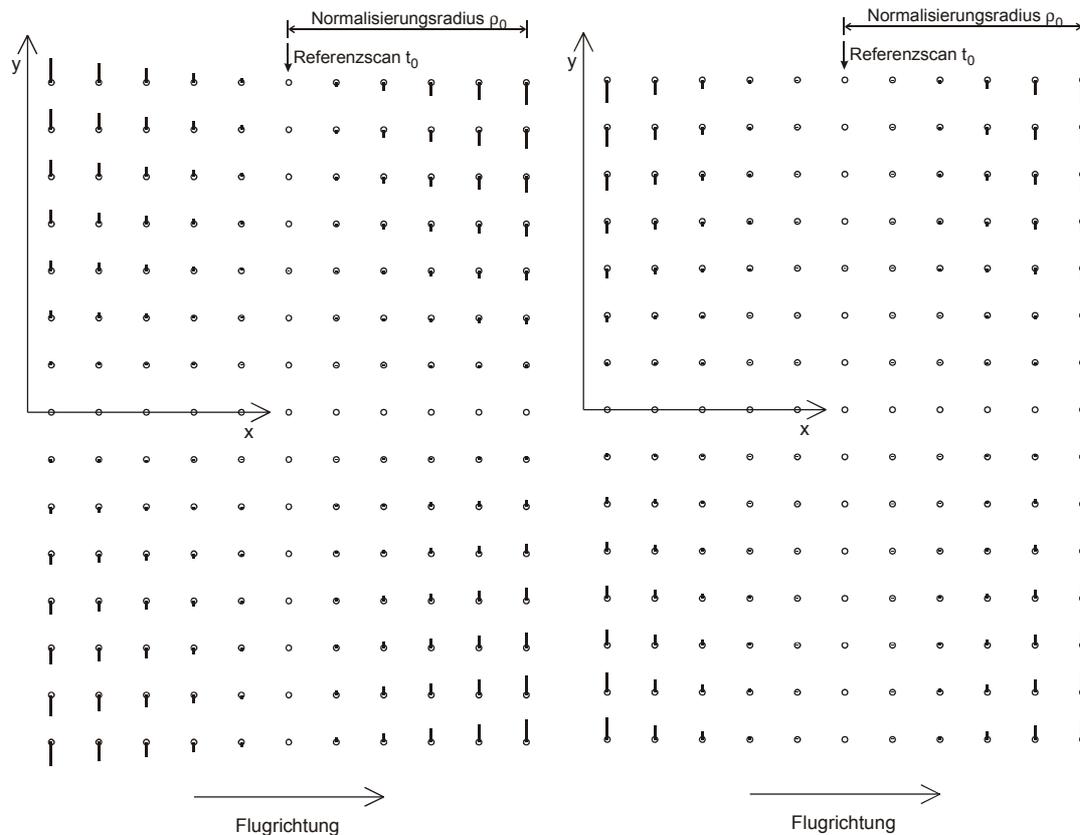


Abb. 7-10: Wirkungsfigur von zusätzlichen Polynomkoeffizienten bei  $Z_0$ :  
links: Polynomkoeffizienten  $c_1$  aus Gleichung (6-22) ungleich Null  
rechts: Polynomkoeffizienten  $c_2$  aus Gleichung (6-22) ungleich Null

## 7.7 Fehler im Geländemodell

Fehler im Geländemodell bewirken bei der Orthophotoherstellung Lageversetzungen im Orthophoto, welche abhängig sind vom Abstand des betroffenen Bildpunktes zum Bildhauptpunkt, vom Betrag des Geländehöhenfehlers und von der Geländeneigung.

Es sei zunächst die Auswirkung eines Geländehöhenfehlers bei ebenen Gelände betrachtet. Die entsprechende Fehlersituation ist in Abb. 7-11 dargestellt. Der Punkt  $P$  wird in der Aufnahmezeile des Scannersystems an der Position  $y_P$  abgebildet. Bei der Orthophotoherstellung und Rückprojektion der Scanneraufnahme auf das Geländemodell wird der Punkt  $P$  aufgrund eines Geländemodellfehlers jedoch nicht an der korrekten Position  $P'$  im Orthophoto abgebildet, sondern an der falschen Position  $Q'$ . Es sei angemerkt, dass für die Lageversetzung im Orthophoto streng genommen nicht der Geländehöhenfehler im Punkt  $P$  verantwortlich ist, sondern der Geländehöhenfehler im Punkt  $Q$ .

Für den Betrag der Lageversetzung  $\Delta Y$  gilt: 
$$\frac{\Delta Y}{\Delta Z} = \frac{y}{c}$$

Aus der Abb. 7-11 ist ersichtlich, dass der Fehlervektor bei positivem  $y$  und positivem  $\Delta Z$  in negative  $Y$ -Richtung zeigt und daher für  $\Delta Y$  gilt:

$$\Delta Y = -\frac{y}{c} \cdot \Delta Z$$

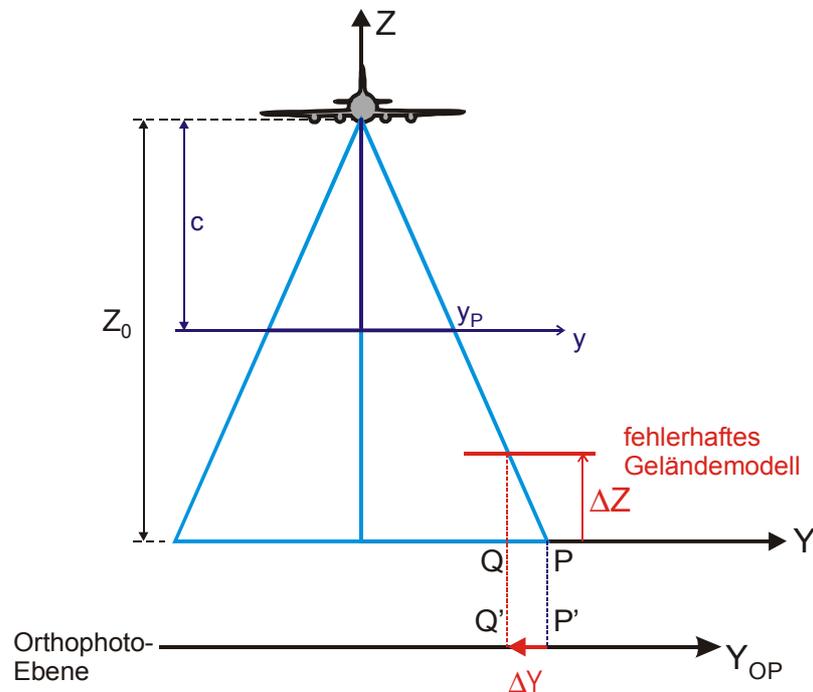


Abb. 7-11: Lageversetzung im Orthophoto aufgrund eines Fehlers  $\Delta Z$  der Geländehöhe bei ebenen Gelände

Bei geneigtem Gelände ergibt sich die in Abb. 7-12 dargestellte Situation (vgl. [Kraus, 1997]). Wir lassen vorerst noch die Richtung des Fehlervektors  $\Delta Y$  außer acht; es gilt:

$$\Delta Z = \Delta Z_1 + \Delta Z_2 \quad \text{und} \quad \Delta Y = \Delta Z_1 \cdot \tan \alpha = \Delta Z_2 \cdot \cot \gamma$$

mit:  $\gamma$  .... Geländeneigung in Richtung der Aufnahmezeile:  
 $\gamma > 0$  für ein Gefälle nach innen (d.h. Gefälle in Richtung Streifenmitte)  
 $\gamma < 0$  für ein Gefälle nach außen.

Nach einigen Umformungen und Berücksichtigung der Richtung des Fehlervektors ergibt sich:

$$\Delta Y = -\frac{\Delta Z \cdot \tan \alpha}{1 + \tan \alpha \cdot \tan \gamma}$$

bzw. mit  $\tan \alpha = \frac{y}{c}$  folgt:

$$\Delta Y = -\frac{\Delta Z}{\frac{c}{y} + \tan \gamma}$$

Üblicherweise kennt man jedoch nicht  $\gamma$ , sondern die Geländeneigung  $\bar{\gamma}$  in Richtung der Falllinie, die mit der Richtung der Aufnahmezeile den Winkel  $\beta$  einschließt.

Mit  $\tan \gamma = \tan \bar{\gamma} \cdot \cos \beta$  ergibt sich schließlich:

$$\Delta Y = - \frac{\Delta Z}{\frac{c}{y} + \tan \bar{\gamma} \cdot \cos \beta}$$

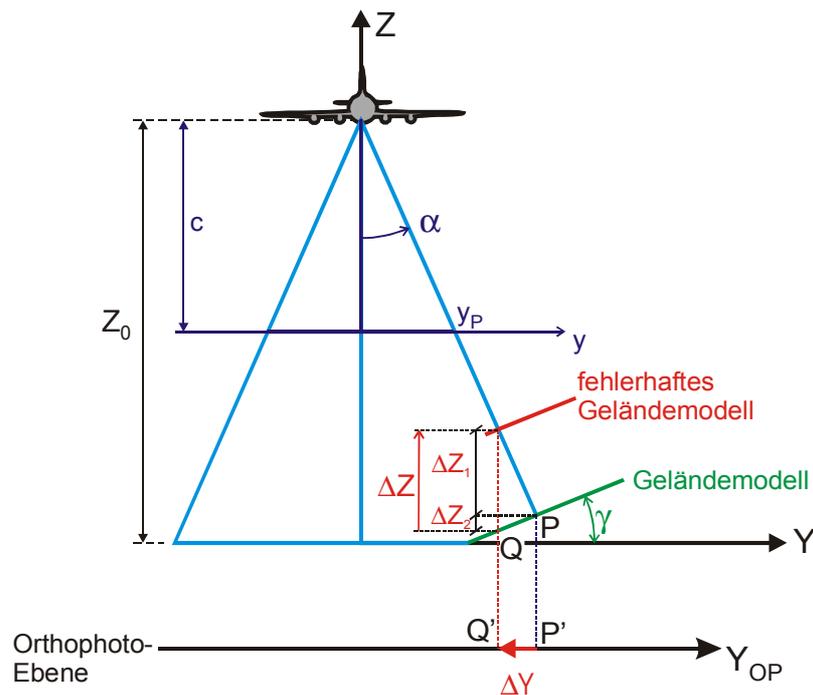


Abb. 7-12: Lageversetzung im Orthophoto aufgrund eines Fehlers  $\Delta Z$  der Geländehöhe bei mit Geländeneigung  $\gamma$  geneigtem Gelände

## 8 Anwendungsbeispiele

In den vorhergehenden Abschnitten wurde die Theorie zur Georeferenzierung von multispektralen Scannerdaten ausführlich besprochen. In diesem Kapitel wird die Anwendbarkeit an praktischen Datensätzen gezeigt, und es werden Erfahrungen aus der Datenbearbeitung zusammengefasst.

Konkret wurde der vorgestellte Ansatz anhand von zwei größeren Datensätzen von Wien erprobt, die beide mit dem Rotationsscanner Daedalus AADS 1268 Airborne Thematic Mapper (Kurzbezeichnung ATM) aufgenommen wurden:

- Messflug 1997: bei diesem Datensatz aus dem Jahr 1997 stand noch kein integriertes GPS/INS-System zur Verfügung, und es wurde eine indirekte Sensororientierung zur Georeferenzierung durchgeführt. Bei diesem Beispiel werden zwei Fälle unterschieden:
  - Indirekte Sensororientierung ohne jedwede Information über die äußeren Orientierungsparameter und
  - Indirekte Sensororientierung unter (eingeschränkter) Nutzung von Beobachtungen der Stellungparameter entlang der Flugbahn aus den Registrierungen des Flugzeugkreisels bzw. des ATM-Rollwinkel-Kreisels.
- Messflug 2000: Beim zweiten Datensatz aus dem Jahr 2000 standen GPS/INS-Beobachtungen zur Verfügung, und es wurde eine integrierte Sensororientierung durchgeführt.

Jeder der beiden Messflüge umfasst das gesamte Stadtgebiet von Wien mit ca. 420 km<sup>2</sup>. Die Flüge wurden vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Auftrag des Österreichischen Bundesinstituts für Gesundheitswesen (ÖBIG) durchgeführt. Die Messflüge erfolgten im Rahmen des Projekts „BiotopMonitoring Wien“ ([Pillman und Kellner, 2001]), das seit 1991 die detaillierte Erfassung und Überwachung aller Vegetationsflächen von Wien beinhaltet. Das Projekt BiotopMonitoring stützt sich hauptsächlich auf visuelle Luftbildinterpretation, wofür in den Jahren 1991, 1997 und 2000 photogrammetrische Messflüge durchgeführt wurden. Parallel zu den für die visuelle Luftbildinterpretation verwendeten analogen Farbinfrarotluftbildern wurden bei den Messflügen auch ATM-Daten aufgenommen, um (zukünftige) Methoden der automationsunterstützten Datenauswertung im Rahmen der Vegetationskartierung und -interpretation zu entwickeln und testen zu können. Voraussetzung für die weitere Nutzung der ATM-Daten ist die Georeferenzierung, welche für den Messflug 1997 für einen Teilbereich von Wien und für den Messflug 2000 für die Gesamtfläche von Wien im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde. Teilergebnisse der Georeferenzierung der ATM-Daten dieser beiden Messflüge sind in [Ries et al. 2001] und [Ries et al. 2002abc] publiziert.

In Abschnitt 8.1 wird zunächst das zur Verfügung stehende Datenmaterial vorgestellt, in Abschnitt 8.2 wird der Arbeitsablauf der Projektbearbeitung zusammengefasst, und es werden praktische Aspekte der Datenbearbeitung und vor allem der Beschaffung von Pass- und Verknüpfungspunktinformationen besprochen. Schließlich wird in den Abschnitten 8.3 und

8.4 die Georeferenzierung der Scannerdaten des Messfluges 1997 bzw. des Messfluges 2000 gezeigt und die erreichten Ergebnisse diskutiert.

## 8.1 Datenbeschreibung der Messflüge 1997 und 2000

Folgende Datensätze standen im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung:

- ATM-Scannerdaten der Messflüge 1997 und 2000
- GPS/INS-Beobachtungen entlang der Flugbahn für den Messflug 2000
- Digitale Mehrzweckkarte von Wien (Passinformationsquelle und flächendeckende Referenz für die Kontrolle der Georeferenzierung)
- Digitales Geländemodell von Wien (Höhenpassinformationsquelle und Nutzung bei der Orthophotoherstellung)

### 8.1.1 ATM-Daten der Messflüge 1997 und 2000

Beim ATM handelt es sich um einen multispektralen Rotationsscanner mit 11 spektralen Kanälen. In Tab. 8-1 sind die wichtigsten technischen Spezifikationen und der Betriebsmodus des Scanners sowie Kenngrößen der Messflüge 1997 und 2000, welche für beide Messflüge gleich waren, zusammengefasst und teilweise zur Erläuterung in Abb. 8-1 dargestellt.

Gesamtanzahl von Kanälen (sichtbares Licht, nahes, mittleres und thermisches Infrarot)	11
Gesamtöffnungswinkel $2A$	$42.9^\circ$
Momentaner Öffnungswinkel $\Delta\alpha$	1.25 mrad
Anzahl der Pixel pro Aufnahmezeile	716
Radiometrische Auflösung	8 bit
Scanrate	25 Hz
Flughöhe über Grund	$\sim 2400$ m
Bodenauflösung im Nadir	$\sim 3$ m
Streifenbreite	$\sim 1900$ m

Tab. 8-1: Technische Daten und Betriebsmodus des ATM und Kenngrößen der Messflüge 1997 und 2000

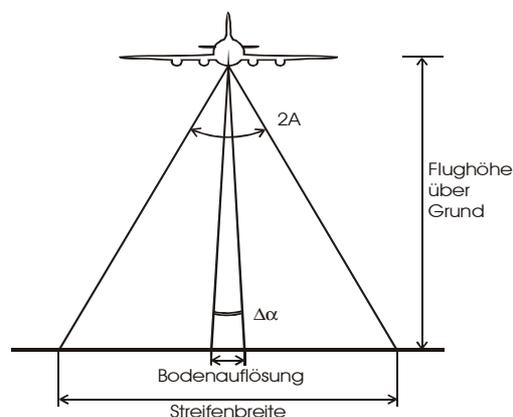


Abb. 8-1: räumliche Eigenschaften des Rotationsscanners

Die Scanneraufnahmen haben in der Streifenmitte eine Bodenauflösung von rund 3 m, welche sich bis zum Streifenrand zunehmend bis auf etwa 3.5 m verschlechtert. Das Wiener Stadtgebiet wurde bei beiden Messflügen mit 24 Nord-Süd-Streifen abgedeckt, die Breite eines Flugstreifens beträgt ungefähr 1.9 km, und die Streifenquerüberdeckung beträgt ca. 30-40%. Abb. 8-2 zeigt die Stadt- und Bezirksgrenzen von Wien sowie die Anordnung der Flugbahnen der 24 Flugstreifen, die für beide Messflüge gleich ist. Darunter zeigen die Pfeile die Flugrichtung für den jeweiligen Streifen an; für den Messflug 1997 sind nur die Flugrichtungen der fünf bearbeiteten Flugstreifen eingetragen. Das vom Messflug 1997 bearbeitete Gebiet von ca. 50 km<sup>2</sup> ist als graues Rechteck markiert. Vom Messflug 2000 wurden alle 24 Streifen bearbeitet.

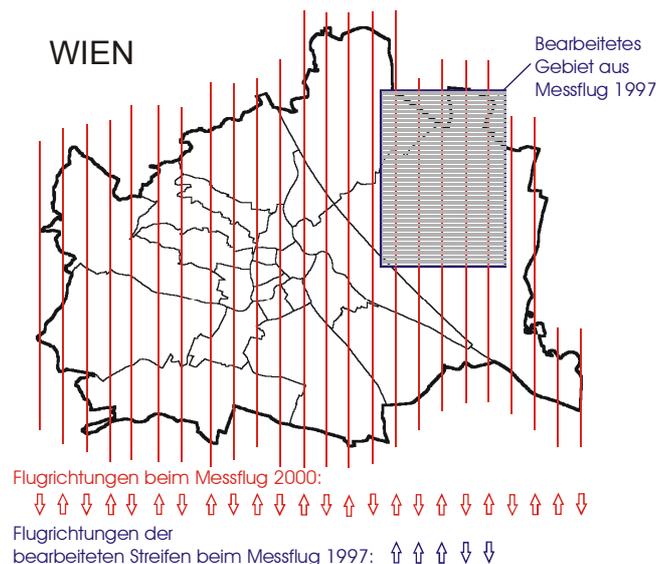


Abb. 8-2: Wiener Stadt- und Bezirksgrenzen mit Streifenübersicht der Messflüge 1997 und 2000; das Bearbeitungsgebiet des Messfluges 1997 ist grau gekennzeichnet, vom Messflug 2000 wurden alle Flugstreifen bearbeitet.

Die 11 spektralen Kanäle des ATM erfassen spektrale Information im Bereich des sichtbaren Lichts, des nahen und mittleren bis hin zum thermischen Infrarot (siehe Tab. 8-2).

Kanal-Nr.	Spektrale Grenzen [ $\mu\text{m}$ ]	Mittenwellenlängen [ $\mu\text{m}$ ]	
1	0.42 - 0.45	0.435	sichtbares Licht
2	0.45 - 0.52	0.485	:
3	0.52 - 0.60	0.560	:
4	0.605 - 0.625	0.615	:
5	0.63 - 0.69	0.660	sichtbares Licht
6	0.695 - 0.75	0.723	nahes IR
7	0.76 - 0.90	0.830	:
8	0.91 - 1.05	0.980	nahes IR
9	1.55 - 1.75	1.650	mittleres IR
10	2.08 - 2.35	2.215	mittleres IR
11	8.5 - 13.0	-	thermisches IR

Tab. 8-2: Spektrale Empfindlichkeit der Kanäle des ATM (nach [Amann, 1986])

In jeder Aufnahmezeile (Scan) steht neben den 716 Pixel zur Aufzeichnung der multispektralen Bildinformation noch ein Zusatzdatenbereich von 19 Byte zur Speicherung von Zusatzinformationen (diese werden auch als „Housekeeping-Daten“ bezeichnet) zur Verfügung. Diese Housekeeping-Daten können an die jeweilige Systemkonfiguration angepasst werden und beinhalten z. B. die laufende Nummer der Aufnahmezeile, Informationen zum Systembetriebsmodus und - wenn vorhanden - Informationen zu den Stellungs- und Positionsparametern des Scanners.

Beim Messflug 1997 beinhalten die Housekeeping-Daten unter anderem die laufende Nummer der Aufnahmezeile, den „Aircraft Pitch Angle“, „Aircraft Heading“ und den „ATM Roll Angle“. Die Winkel Aircraft Pitch und Aircraft Heading sind laut der verfügbaren Datenbeschreibung die Messwerte des Flugzeugkreisels und müssen nicht notwendigerweise mit Pitch und Yaw des ATM übereinstimmen. Wenn jedoch während der Streifenaufnahme keine Veränderung an der relativen Lage zwischen Flugzeug und Scanner erfolgt, können diese Winkel – eventuell nach Anbringen eines Stand-Korrekturwertes – als nützliche Zusatzinformationen für die Orientierung herangezogen werden. Die ATM-Rollwinkel stellen die Messwerte des ATM-Rollkreisels dar, der eine automatische Rollwinkelkorrektur ermöglicht, um möglichst unverzerrte Aufnahmen zu erzeugen. Diese automatische Rollwinkelkorrektur war beim Messflug 1997 aktiviert, wie auch in Abb. 8-3 anhand eines Ausschnitts aus den ATM-Originaldaten des Messfluges 1997 zu erkennen ist. Die Aufnahmen sind zwar leicht „zittrig“, weisen aber keine extremen Verzerrungen aufgrund einer starken Flugdynamik auf. Die (eingeschränkte) Nutzung der in den Housekeeping-Daten enthaltenen Stellungenbeobachtungen Aircraft Pitch, Aircraft Heading und ATM Roll im Rahmen der Ausgleichung wird in Abschnitt 8.3.2 näher diskutiert.



Abb. 8-3: Ausschnitt aus den ATM-Originaldaten des Messfluges 1997, aufgenommen mit aktiver automatischer Rollwinkelkorrektur: dargestellt sind ca. 300 Scans aus Streifen 6 in Infrarot-Kanalkombination 6/4/2.

Beim Messflug 2000 wurde bereits ein integriertes GPS/INS-System eingesetzt. Daher wurde die automatische Rollwinkelkorrektur des ATM-Scanners deaktiviert, um nicht mehrere verschiedene Winkelbeobachtungen (verschieden genauer Messsysteme) kombinieren zu müssen. In der Folge erscheinen die Originalaufnahmen zwar sehr verzerrt (siehe Abb. 8-4), aber die Georeferenzierung wird durch die GPS/INS-Beobachtungen sehr erleichtert. Zur Synchronisation der ATM-Aufnahmen mit den GPS/INS-Beobachtungen beinhalten die Housekeeping-Daten der ATM-Aufnahmen die aktuelle GPS-Wochensekunde und einen

sogenannten PPS-Pulse, der das genaue Byte des etwaigen Wechsels der GPS-Wochensekunde im vorausgegangenen Scan angibt.



Abb. 8-4: Ausschnitt aus den ATM-Originaldaten des Messfluges 2000, aufgenommen ohne automatischer Rollwinkelkorrektur: dargestellt sind ca. 300 Scans aus Streifen 6 in Infrarot-Kanalkombination 6/4/2.

### 8.1.2 GPS/INS-Beobachtungen für den Messflug 2000

Beim Messflug 2000 kam ein integriertes GPS/INS-System (Typ CCNS AEROcontrol der Fa. IGI mbh Hilchenbach; <http://www.igi-ccns.com/index.html>) zum Einsatz, welches Positions- und Stellungsbeobachtungen entlang der Flugbahn mit einer Frequenz von 50 Hz registrierte. Dieses GPS/INS-System ist differentialfähig und bei Nutzung einer GPS-Bodenstation sind Positionsgenauigkeiten im Dezimeterbereich möglich. Laut der verfügbaren Datenbeschreibung werden jedoch bei ATM-Flugeinsätzen in der Regel keine Bodenstationen verwendet, sondern das OmniSTAR Satellitensystem (<http://www.omnistar.nl>). Das OmniSTAR Satellitensystem ist ein globales Echtzeit-dGPS-System, welches basierend auf einem weltweiten Netzwerk von Referenzstationen laufend GPS-Korrekturwerte ermittelt und in Echtzeit an die Empfangseinrichtungen weiterleitet. Die Positionierungsgenauigkeit ist regional unterschiedlich und wurde im Jahr 2000 im Bereich von 1-3 m geschätzt.

Für die Genauigkeit der Stellungsbeobachtungen bei ATM-Einsätzen waren der Datenbeschreibung folgende Angaben zu entnehmen:

INS-Roll und Pitch: besser  $1/100^\circ$

INS-Yaw: besser  $1/10^\circ$

Die Genauigkeiten von Roll und Pitch entsprechen damit einem Bogen am Boden von  $<0.5$  m ( $\sim 0.2$  Pixel) und die Genauigkeit von Yaw entspricht einem Bogen am Streifenrand von  $<1.5$  m ( $\sim 0.5$  Pixel).

Die GPS/INS-Prozessierung wurde von der flugausführenden Stelle durchgeführt, und die Datenlieferung inkludierte Positions- und Stellungsdaten des ATM beginnend vom Abflug bis zu Landung des Flugzeuges. Tab. 8-3 zeigt einen kleinen Ausschnitt der aufgezeichneten Daten zu Beginn des Flugstreifens 20.

Projekt	Zeit (GPS-Wochen- Sec)	Geo-Breite [°]	Geo-Länge [°]	Höhe [m]	Roll [°]	Pitch [°]	Yaw [°]
02BIOTOPMOWIEN	34897.007	48.2658115	16.2596378	2616.667	1.614	1.086	173.588
02BIOTOPMOWIEN	34897.027	48.2657997	16.2596377	2616.670	1.604	1.087	173.590
02BIOTOPMOWIEN	34897.047	48.2657879	16.2596377	2616.674	1.593	1.087	173.592
02BIOTOPMOWIEN	34897.067	48.2657761	16.2596376	2616.677	1.585	1.086	173.596

Tab. 8-3: Ausschnitt der GPS/INS-Beobachtungen zu Beginn des Flugstreifens 20

Die GPS/INS-Positionen beziehen sich auf das Bezugssystem WGS84; die Winkelbeobachtungen liefern Stellungsdaten des ATM gemäß der Luftfahrtnorm ARINC 705. Zur Synchronisation der aufgezeichneten GPS/INS-Daten mit den ATM-Aufnahmen dienen die GPS-Wochensekunden.

### 8.1.3 Digitale Mehrzweckkarte von Wien

Zur Bearbeitung beider Messflüge stand die digitale Mehrzweckkarte (MZK) von Wien im Rasterformat mit einer Pixelgröße von  $25 \times 25 \text{ cm}^2$  zur Verfügung. Die MZK zeichnet sich durch hohe Genauigkeit und großen Detailreichtum aus und stellt damit einen optimalen Referenzdatensatz dar. Die Pixelgröße der ATM-Daten mit ca.  $3 \times 3 \text{ m}^2$  ist im Vergleich zur MZK um ein Vielfaches größer (um den Faktor 144 bezogen auf die Pixelgröße und um den Faktor 12 bezogen auf die Pixelseite). Die MZK wurde in zweifacher Weise genutzt:

- als Quelle für Passinformationen und
- als Referenz für die flächendeckende Kontrolle der georeferenzierten Daten

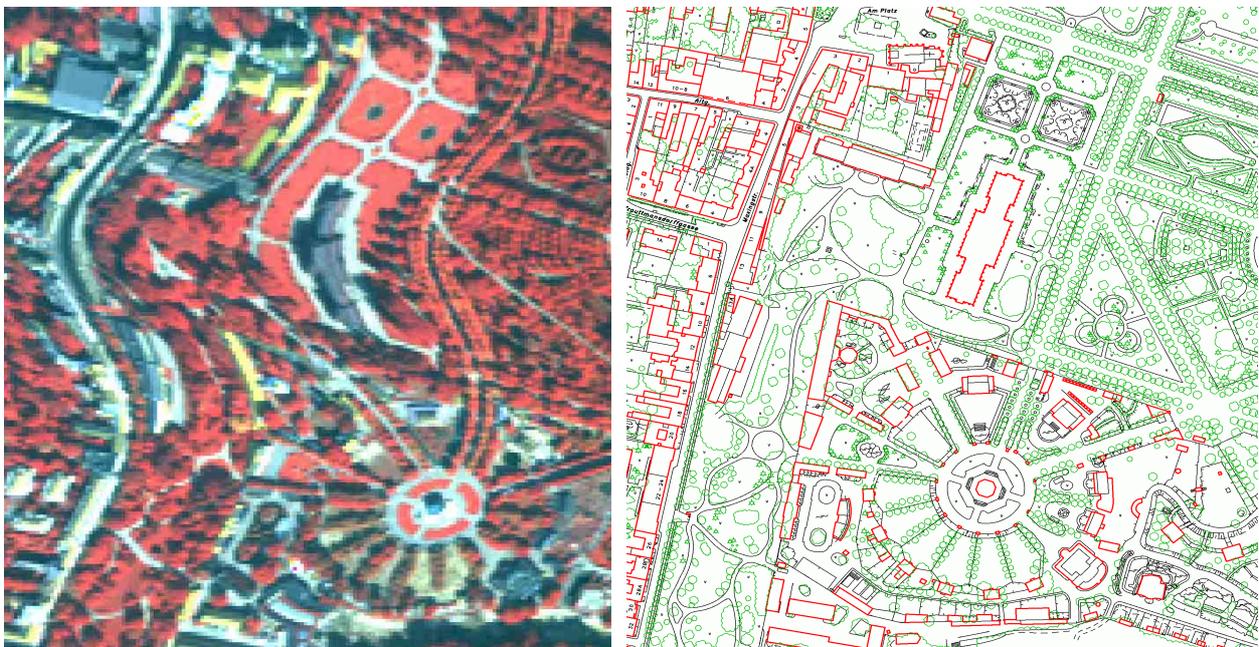


Abb. 8-5: Vergleich ATM-Daten und MZK:  
links: Ausschnitt aus ATM-Daten des Messflugs 2000  
(Infrarot-Kanalkombination 6/4/2) und  
rechts: der korrespondierende Ausschnitt der MZK.

Abb. 8-5 zeigt einen Ausschnitt aus den ATM-Daten des Messfluges 2000 und den korrespondierenden Ausschnitt aus der MZK.

Da aus der MZK im Rasterformat jedoch nur zweidimensionale Passinformationen abgeleitet werden können, mussten die ebenfalls notwendigen Höheninformationen mit Hilfe eines Geländemodells bestimmt werden. Dies schränkt die Auswahl der Passinformationen auf am Boden liegende Punkte und Linien ein.

### **8.1.4 Digitales Geländemodell von Wien**

Vom Bearbeitungsgebiet stand das digitale Geländemodell des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesen zur Verfügung, welches je nach Geländeform (flach/hügelig) und Bedeckung (offen oder bedeckt) eine Höhengenaugigkeit von ca.  $\pm 1-5$  m aufweist. Ein etwaiger Höhenfehler von 3 m im Geländemodell wirkt sich am Streifenrand als Lagefehler (Bildsturz) von ca. 1.3 m (dies entspricht etwa 0.5 Pixel) aus, was für den bearbeiteten Datensatz noch ausreichend ist.

Das Geländemodell wurde zur Ergänzung der Höheninformation zu den aus der MZK bestimmten Lage-Passinformationen und zur Orthophotoherstellung verwendet.

## **8.2 Arbeitsablauf**

Den Arbeitsablauf zur Georeferenzierung der Daten aus beiden Messflügen kann man grob in folgende Schritte gliedern:

- Datenaufbereitung
- Messung und Aufbereitung der Pass- und Verknüpfungsinformationen
- Bestimmung der Orientierungsfunktionen der Scanneraufnahmen
- Orthophotoherstellung und Kontrolle der Georeferenzierung

### **8.2.1 Datenaufbereitung**

Die Datenaufbereitung umfasst die Aufbereitung der ATM-Aufnahmen, das Auslesen und Aufbereiten der Housekeeping-Daten der ATM-Aufnahmen und für den Messflug 2000 die Aufbereitung der GPS/INS-Beobachtungen.

Die ATM-Aufnahmen wurden in einem Rohdatenformat geliefert. Diese Rohdaten wurden in das Bildverarbeitungssystem ERDAS/Imagine eingelesen und für die Weiterverarbeitung in gängige Bilddatenformate (img bzw. tif) konvertiert. Die Housekeeping-Daten wurden mittels eines am I.P.F. entwickelten Utility-Programms ausgelesen und in ASCII-Files aufbereitet.

Die für den Messflug 2000 verfügbaren GPS/INS-Beobachtungen wurden folgendermaßen aufbereitet:

Als Objektkoordinatensystem für die Ausgleichung wurde das amtlichen österreichischen Bezugssystem Gauß-Krüger mit Bezugsmeridian  $34^\circ$  östlich von Ferro (GK-M34) gewählt, weil in diesem System die MZK und das DTM vorliegen und auch das Endprodukt, die georeferenzierten ATM-Aufnahmen, in diesem System vorliegen sollte. Die GPS/INS-Positionen sind in Dezimalgrad im Bezugssystem WGS84 gegeben und wurden für die Weiterbearbeitung in das österreichische System GK-M34 transformiert. Für diese Transformation wurden für das gesamte Staatsgebiet von Österreich geltende mittlere Transformationsparameter verwendet, die Genauigkeiten im Bereich von einigen Metern erwarten lassen. Das bedeutet, dass die aus dieser Transformation erhaltenen GPS/INS-Positionen bei (testweiser) Durchführung einer direkten Sensororientierung ebenfalls nur eingeschränkte absolute Positionierungsgenauigkeit liefern können. Für ein Projekt, das ausschließlich auf direkte Sensororientierung ausgerichtet wäre, müssten für das Bearbeitungsgebiet bestmögliche lokale Transformationsparameter bestimmt werden.

Die aus dem GPS/INS-System erhaltenen Stellungsdaten Roll, Pitch und Yaw beziehen sich auf ein lokales Horizontsystem, genauer auf ein North-East-Down-System (Abb. 3-4). Für die Verwendung der Stellungsparameter im verebneten Bezugssystem GK-M34 ist bei Yaw die Meridiankonvergenz zu berücksichtigen. Die Meridiankonvergenz ist abhängig von den Formgrößen des Bezugsellipsoides, der geographischen Breite und der Längendifferenz zum Bezugsmeridian. Mit größer werdenden Abstand zum Bezugsmeridian wächst auch die Meridiankonvergenz. Die Variation der Meridiankonvergenz innerhalb eines Flugstreifens der Messflüge von Wien ist kleiner als  $0.0005^\circ$  und liegt deutlich unter der angegebenen Genauigkeit der Yaw-Beobachtungen. Somit kann innerhalb eines Flugstreifens die Meridiankonvergenz als konstant betrachtet werden. Der Betrag der Meridiankonvergenz erreicht für die östlichsten Flugstreifen ein Maximum von ca.  $0.2^\circ$ . Verglichen mit der angegebenen Genauigkeit der Yaw-Beobachtungen von besser als  $0.1^\circ$  ist die Meridiankonvergenz (in Hinblick auf eine testweise direkte Georeferenzierung) nicht zu vernachlässigen und wurde daher an die Yaw-Beobachtungen entsprechend angebracht. Außerdem wurden die Stellungsparameter, die gemäß der ARINC 705-Definition in einem North-East-Down-System gegeben waren gemäß Gleichung (3-9) in ein East-North-Up-System (Abb. 3-5) für ORIENT übergeführt.

## 8.2.2 Messung der Pass- und Verknüpfungsinformationen

Die Sensororientierung des Messfluges 1997 stützte sich ausschließlich auf Passinformationen, also Passpunkte und Passlinien (polynomiale Kurven oder 3D-Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen). Für den Messflug 2000 wurden zusätzlich zu den GPS/INS-Informationen Pass- und Verknüpfungspunkte verwendet. Der Großteil der Punktmessungen für Pass- und Verknüpfungspunkte sowie Linienpunkte erfolgte manuell. Für die Messung von Linienpunkten in den ATM-Aufnahmen konnte teilweise auch ein semi-automatisches Verfahren angewendet werden.

Die manuellen Punktmessungen wurden mit dem Programm ORPHEUS (ORIENT Photogrammetric Engineering and Utility System; [Rottensteiner, 2001]) durchgeführt. ORPHEUS wurde am I.P.F. in der ursprünglichen Intention entwickelt, eine graphische Benutzeroberfläche für ORIENT bereit zu stellen, und bietet die Möglichkeit, Punkte in

digitalen Aufnahmen interaktiv zu messen. Die ORIENT-Beobachtungskategorien „Fiktive Beobachtungen auf 3D-Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen“ (Abschnitt 6.6) und „Bildkoordinaten in Scanneraufnahmen“ (Abschnitt 6.7) sind derzeit noch nicht in ORPHEUS implementiert, sodass ORPHEUS für dieses Projekt lediglich als „digitaler Mehrbild-Monokomparator“ eingesetzt wurde; die Messdaten wurden für die nachfolgenden Ausgleichungen in eine ORIENT-Datenbasis übernommen.

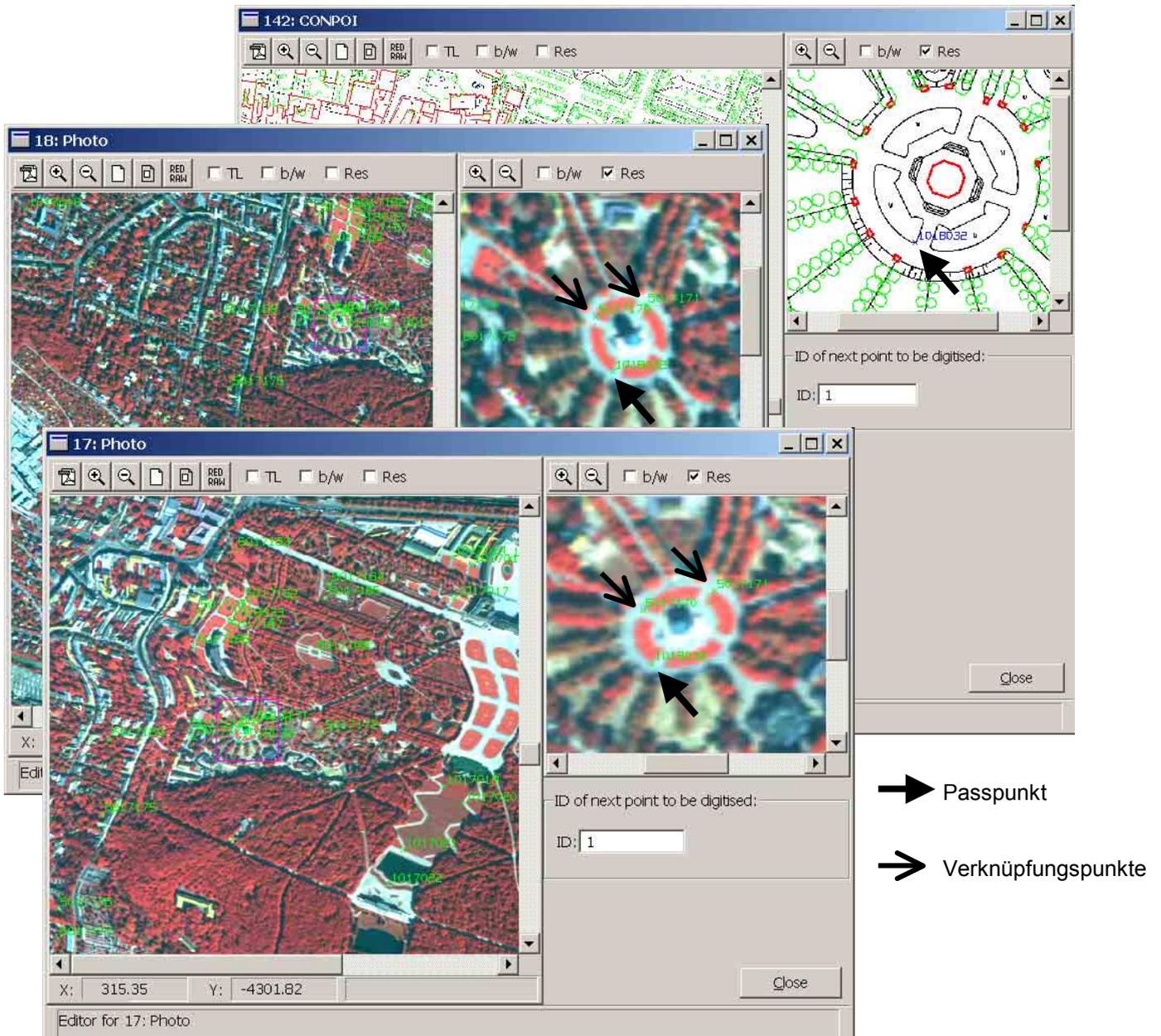


Abb. 8-6: Beispiel für die interaktive Punktmessung mit ORPHEUS

Abb. 8-6 zeigt ein Beispiel für eine interaktive Passpunktmessung in zwei benachbarten ATM-Aufnahmen und der MZK und von Verknüpfungspunkten in den beiden benachbarten ATM-Aufnahmen. Gemäß der Pixelgröße von  $3 \times 3 \text{ m}^2$  in den ATM-Aufnahmen eigneten sich als Pass- und Verknüpfungspunkte zum Beispiel die Mittelpunkte oder Ecken von Grünflächen oder Schwimmbecken oder auch Mittelpunkte von Kreuzungen. Da – wie erwähnt – die Z-Koordinaten der Passpunkte und auch der Stützpunkte der Passlinien mit Hilfe des Geländemodells ergänzt werden mussten, war die Auswahl ausschließlich auf am

Boden liegende Passinformationen beschränkt. Diese Einschränkung besteht bei den Verknüpfungspunkten grundsätzlich nicht. Jedoch bieten Verknüpfungspunkte, die am Boden liegen und somit DGM-Höhenpasspunkte bilden können (vgl. Erläuterungen in Abschnitt 6.7.2.1), die Möglichkeit, dass bei hinreichend guten Näherungskordinaten und bei hinreichend flachem Gelände mit Hilfe des Geländemodells zusätzliche Z-Passinformationen für die Ausgleichung generiert werden können (praktische Anwendung siehe Abschnitt 8.4).

Für die Bearbeitung des Messfluges 1997 wurden neben Passpunkten auch Passlinien (Polynomkurven und 3D-Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen) verwendet. Zur Bestimmung der Passlinien dienten Stützpunkte, die in der MZK manuell gemessen wurden und deren zugehörige Z-Koordinaten mit Hilfe des Geländemodells ergänzt wurden. Damit gilt auch für die Passlinien die Einschränkung, dass nur Linien auf der Geländeoberfläche zu verwenden waren. Mit den Linienstützpunkten können die Formparameter der Linie (bei polynomialen Kurven sind dies die Polynomparameter gemäß Abschnitt 6.5, und bei 3D-Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen sind dies die Knotenpunkte mit ihren Kurvenparametern gemäß Abschnitt 6.6) im Rahmen einer Ausgleichung bestimmt werden. Das bedeutet, dass die gemessenen Linienpunkte in der MZK (lediglich) so dicht gesetzt werden müssen, dass sie eine möglichst gute und zuverlässige Modellierung der Linie ermöglichen. Bei geradlinig verlaufenden Straßenachsen sind aber häufig mehr Punkte zur Modellierung nötig, als der geradlinige Grundriss vermuten ließe, denn obwohl der Grundriss geradlinig verläuft, zeigt die zugehörige Z-Komponente oftmals einen gekrümmten Verlauf. Eine modellierte Passlinie ist im Objektkoordinatensystem durch ihre Formparameter vollständig definiert und wird in der Folge bei der Bestimmung der Orientierungsfunktionen für die ATM-Aufnahmen fest gehalten.

Damit die Passlinien zur Bestimmung der Orientierungsfunktionen herangezogen werden können, sind auch in den ATM-Aufnahmen Linienpunkte zu messen. Jeder Linienpunkt liefert jeweils einen Punkteintrag in den ORIENT-Beobachtungskategorien „Bildkoordinaten in Scanneraufnahmen“ (Abschnitt 6.7) und „Punkt liegt auf polynomialer Kurve“ (Abschnitt 6.5) bzw. „Punkt liegt auf 3D-Kurve aus zusammengesetzten kubischen Polynomen“ (Abschnitt 6.6). Ein solcher Linienpunkt trägt mit einer Redundanz von (lediglich) Eins zur Bestimmung der Unbekannten in der Ausgleichung bei, denn in der Regel sind die in den ATM-Aufnahmen gemessenen Linienpunkte keine homologen Punkte zu den MZK-Linienstützpunkten oder zu den Linienpunkten in der benachbarten ATM-Aufnahme (vgl. Abschnitt 6.5 und 6.6). Um einen möglichst großen Gesamtbeitrag einer Passlinie zur Bestimmung der Orientierungsfunktion einer ATM-Aufnahme zu erhalten, sollen in den ATM-Aufnahmen möglichst viele Linienpunkte in engem Punktabstand gemessen werden.

Die Linienpunkte in den ATM-Aufnahmen wurden teilweise manuell in ORPHEUS gemessen; es konnte aber auch teilweise ein semi-automatisches Verfahren eingesetzt werden. Die manuelle Linienpunktmessung entspricht der interaktiven Punktmessung und unterscheidet sich nur dadurch, dass der Punkt nicht nur in der Beobachtungskategorie „Bildkoordinaten in Scanneraufnahmen“ (Abschnitt 6.7) erfasst wird, sondern auch in den entsprechenden Beobachtungsraum der Kategorie „Polynomkurve“ oder „3D-Kurve aus zusammengesetzten kubischen Polynomen“ (Abschnitt 6.5 bzw. Abschnitt 6.6) eingetragen wird. Außerdem sind – wie oben besprochen – die Linienpunkte in der Regel keine homologen Punkte in benachbarten Aufnahmen bzw. in den Aufnahmen und der MZK.

Die semi-automatische Erfassung von Linienstützpunkten in den ATM-Aufnahmen wurde mittels sogenannter Snakes in einem noch im Entwicklungsstadium befindlichen Programm

des I.P.F. durchgeführt. Die resultierenden Messdaten wurden in ORPHEUS importiert, um alle Messdaten in einer gemeinsamen Datenbasis zu sichern. Für Details zur implementierten Snake-Methode wird auf [Kerschner, 1998] bzw. [Kerschner 2003] verwiesen, hier wird lediglich die Funktionsweise der semi-automatischen Linienmessung erläutert, die auch in Abb. 8-7 dargestellt ist: Der Benutzer digitalisiert entlang einer Grauwertkante den ungefähren Verlauf der Kurve mit wenigen Punkten (Abb. 8-7 linkes Bild) und startet die automatische Detailmessung. Dazu wird entlang der Kurve eine Snake initialisiert, der eine Energiefunktion zugeordnet wird. Diese Energiefunktion enthält verschiedene Terme, wobei auf jeden Fall auch solche Terme darunter sind, die beschreiben, ob die Kurve auf einer Grauwertkante im Bild liegt. Die Snake verformt sich nun solange, bis ihre Energiefunktion minimiert ist. In diesem iterativen Prozess wird eine Grauwertkante im digitalen Bild gefunden. Konkret wird im abgebildeten Beispiel die Grauwertkante entlang einer Grünfläche ermittelt (Abb. 8-7 rechtes Bild). Der Benutzer überwacht diesen Prozess und kontrolliert das Ergebnis. Im abgebildeten Beispiel stehen den vier vom Benutzer grob digitalisierten Punkten 85 automatisch gemessene Linienpunkte gegenüber, was einem Faktor der „Vervielfachung“ der manuellen Messung von über 20 entspricht.



Abb. 8-7: Semi-automatische Linienmessung mit Snakes:  
 links: Startkurve (vom Benutzer durch vier grob digitalisierte Punkte vorgegeben);  
 rechts: Ergebnis der automatischen Detailmessung (ca. 85 automatisch gemessene Linienstützpunkte in einem Abstand von etwa 2-3 Pixel);  
 Darstellung der ATM-Daten in Echtfarb-Kanalkombination 4/3/2.

Mit einem modifizierten Snake-Ansatz können helle, dünne Linien von 1-2 Pixel Breite aufgefunden werden, wie Abb. 8-8 zeigt. Auch hier stehen den vier manuell und nur grob vorgegebenen Punkten über 20-mal so viele automatisch extrahierte, genau positionierte Punktmessungen entlang der Kurve gegenüber.

Die semi-automatische Linienmessung funktionierte sehr gut entlang von klar definierten Grauwertgrenzen (z. B. Ackergrenzen) oder klar definierten, dünnen und hellen Linien (z. B. Feldwege, aber auch bei schmalen Straßen in Wohnsiedlungen). Bei Straßenachsen von breiteren Straßen oder bei stark strukturiertem Straßenrand, also bei Linien, die den Voraussetzungen für die semi-automatische Messung nicht entsprechen und bei denen auch eine gewisse visuelle Interpretation des Operateurs notwendig ist, musste die Linienmessung manuell durchgeführt werden. Insgesamt wurden 361 Passlinien (290 polynomiale Kurven und 71 3D-Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen) im Rahmen des Projekts gemessen, ca. 33% der Linien wurden semi-automatisch in den ATM-Aufnahmen erfasst.



Abb. 8-8: Semi-automatische Linienmessung mit Snakes:  
 links: Startkurve (vom Benutzer durch 4 grob digitalisierte Punkte vorgegeben);  
 rechts: Ergebnis der automatischen Detailmessung (ca. 95 automatisch gemessene Linienpunkte in einem Abstand von etwa 2-3 Pixel);  
 Darstellung der ATM-Daten in Echtfarb-Kanalkombination 4/3/2.

Abb. 8-9 zeigt einen Bildausschnitt aus den ATM-Aufnahmen mit zwei als Passlinien verwendeten Straßenachsen. Entlang der Straßenachse (1) wurden manuelle Linienpunkte gesetzt; die Linienpunkte der Straßenachse (2) wurden semi-automatisch gemäß dem modifizierten Snake-Ansatz „dünne, helle Linie von 1-2 Pixel Breite“ extrahiert und anschließend in ORPHEUS importiert.



- 1 manuell gemessene Linienpunkte
- 2 semi-automatisch gemessene Linienpunkte

Abb. 8-9: Beispiel von manuellen und semi-automatischen Linienpunktmessungen in den ATM-Daten (Infrarot-Kanalkombination 6/4/2)

### **8.2.3 Bestimmung der Orientierungsfunktionen der ATM-Aufnahmen**

Alle Messdaten wurden in eine ORIENT-Datenbasis übernommen (vgl. Abschnitt 6.8). Die ORIENT-Datenbasis enthält beim Messflug 1997 neben dem speziellen Parameterraum „Referenzsystem“, in dem alle Objektpunkte und äußeren Referenzpunkte gespeichert sind, weiters Beobachtungsräume (inkl. der zugehörigen Parameterräume) der Kategorien

- Beobachtete Passpunkte
- Fiktive Beobachtungen auf Geraden oder Polynomen (Passlinien)
- Fiktive Beobachtungen auf 3D-Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen (Passlinien)
- Bildkoordinaten in Scanneraufnahmen (Bildpunkte in den ATM-Aufnahmen)

Die ORIENT-Datenbasis des Messfluges 2000 ist sehr ähnlich aufgebaut, nur kommen keine Passlinien vor und die GPS/INS-Positionen werden für jeden Flugstreifen getrennt in Beobachtungsräumen der Kategorie "dreidimensionale Modellkoordinaten" vorgehalten. Die GPS/INS-Rotationsbeobachtungen werden ebenfalls für jeden Flugstreifen getrennt in speziellen Beobachtungsräumen für Rotationsparameter („beobachtete Parameter der Abbildungsfunktion“) gespeichert.

In ORIENT wurde die Ausgleichung und Bestimmung der Orientierungsfunktionen der ATM-Aufnahmen durchgeführt. Details zu den Ergebnissen werden in den Abschnitten 8.3 und 8.4 diskutiert, hier sollen nur einige praktische Aspekte der Projektdurchführung mit ORIENT angeführt werden.

Die Programmsteuerung von ORIENT erfolgt interaktiv mittels Direktiven. Es ist möglich, mehrere Direktiven zu Kommandoprozeduren in „cmd-files“ zusammenzufassen. Einzelne Prozeduren können entweder interaktiv aufgerufen werden oder es können mehrere Prozeduren hintereinander im Stapelbetrieb abgearbeitet werden. Dadurch kann die Steuerung von ORIENT sehr gut an die Bedürfnisse des jeweiligen Benutzers und an das jeweilige Projekt angepasst und beschleunigt werden. cmd-files können auch so aufgebaut werden, dass sie eine gute Dokumentation des Projektablaufes ergeben, womit einerseits das bearbeitete Projekt zuverlässig und rasch reproduziert werden kann und andererseits ein gleichartiges Folgeprojekt durch Verwendung der vorhandenen cmd-files (nach eventuell notwendigen Adaptionen) rascher bearbeitet werden kann. Typische Prozeduren betreffen das Importieren von Messdaten, Setzen von Punktaktivitäten, die eigentliche Ausgleichung, numerische und graphische Ausgaben der Messdaten und Ausgleichungsergebnisse, z. B. das Plotten von Residuenvektoren, und den Export der Orientierungsfunktionen für die nachfolgende Orthophotoherstellung.

### **8.2.4 Orthophotoherstellung und Kontrolle**

Mit Hilfe der bestimmten Orientierungsfunktionen, der inneren Orientierung des ATM, der Scanneraufnahmen und des digitalen Geländemodells wurde die Orthophotoherstellung mit dem Programm DOP des I.P.F. gemäß Abschnitt 5.2 durchgeführt. Auch die Steuerung von DOP erfolgte bevorzugt mittels cmd-files im Stapelbetrieb.

Wichtig war bei der indirekter Sensororientierung die flächendeckende Kontrolle des Resultats der Orthophotoherstellung, weil bei nicht ganz optimaler Passinformationsverteilung beim Messflug 1997 manche Bereiche mit mangelhafter Qualität nur bei der Orthophotokontrolle aufgedeckt werden können. Bei integrierter Sensororientierung sollten bei einwandfreien GPS/INS-Daten Stichproben zur Kontrolle der Qualität der Orthophotos ausreichend sein. Jedoch aufgrund von „Driftphänomenen“ in den GPS/INS-Daten des Messfluges 2000 mussten auch hier flächigere Kontrollen der Orthophotos durchgeführt werden, um zu prüfen, ob die im Rahmen der integrierten Sensororientierung bestimmten Korrekturpolynome die Driftphänomene entsprechend korrigieren konnten.

Für die Orthophotokontrolle wurde das Programm SCOP++ des I.P.F. verwendet, von dessen vielfältigen Möglichkeiten zur Geländemodellbearbeitung im Rahmen der Orthophotokontrolle lediglich die Visualisierungsmöglichkeiten von Rasterbildern verwendet wurden. Speziell die Möglichkeit, ein Orthophoto mit der Raster-MZK zu überlagern, wobei der Kartenhintergrund der MZK transparent gesetzt werden konnte, war sehr nützlich. So konnte das Orthophoto ähnlich wie mit einem Vektor-Overlay gemeinsam mit den Situationsdaten der MZK dargestellt werden, wie auch die Abbildungen in den folgenden beiden Abschnitten zeigen.

### **8.3 Georeferenzierung des Messfluges 1997 – indirekte Sensororientierung**

Nachdem in den letzten beiden Abschnitten das verfügbare Datenmaterial und der prinzipielle Arbeitsablauf beschrieben worden sind, soll in diesem Abschnitt die Bestimmung der Orientierungsfunktionen mittels Passpunkte und Passlinien gezeigt werden. Die erforderliche Passinformation ist abhängig von der Anzahl der zu bestimmenden Knotenpunkte zur Modellierung der Orientierungsfunktion eines Flugstreifens, die Knotenanzahl ist wiederum abhängig von der Flugdynamik, und diese ist nicht vorhersagbar und kann von Flug zu Flug, von Flugstreifen zu Flugstreifen und auch innerhalb eines Flugstreifens stark variieren. Daher ist die Ableitung von generell gültigen Faustformeln, in welchem Fall wo, welche und wie viel Passinformationen notwendig sind, praktisch nicht möglich.

Im folgenden werden am Beispiel des Messfluges 1997 und mit der bei diesem Projekt verfügbaren Passinformationen exemplarische Varianten berechnet und diskutiert, wobei zunächst in den in Abschnitt 8.3.1 gezeigten Beispielen überhaupt keine direkten Beobachtungen der äußeren Orientierungsparametern verwendet werden und in Abschnitt 8.3.2 die im Zusatzdatenbereich der ATM-Aufnahmen aufgezeichneten Stellungsbeobachtungen (mit Einschränkungen) genutzt werden. In Abschnitt 8.3.3 folgt eine Zusammenfassung der Bearbeitung des Messfluges 1997.

Die gezeigten Beispiele stammen aus dem Flugstreifen 7 und betreffen den Scanbereich 2700 bis 2900 bzw. den Scanbereich um 3100 am Ende des Abschnitts 8.3.1 und in Abschnitt 8.3.2. Streifen 7 hat insgesamt über 6200 Scans; in das Bearbeitungsgebiet von 10 km Nord-Süd-Ausdehnung fällt der Scanbereich 360-3910, also 3550 Scans. Abb. 8-10 zeigt eine Übersicht der ATM-Aufnahme von Streifen 7 mit den gemessenen Passpunkten und Passlinien, wobei der Übersichtlichkeit halber in Abb. 8-10 a) nur die Passpunkte, in Abb. 8-10 b) nur die Passlinien und in Abb. 8-10 c) Passpunkte und Passlinien gemeinsam dargestellt sind.

Insgesamt sind in diesem Flugstreifen 320 Passpunkte und 138 Passlinien mit durchschnittlich jeweils 40 Linienpunkten gemessen worden. Dies erscheint sicherlich sehr viel, jedoch muss man bedenken, dass hier keine GPS/INS-Beobachtungen zur Unterstützung der Sensororientierung vorlagen, und weiters lag die Fragestellung primär in der bestmöglichen Lösung des Problems und erst sekundär in wirtschaftlichen Überlegungen. Wir werden aber im Folgenden erkennen, dass diese Fülle an Passinformationen zur Bestimmung der notwendigen Knotenpunkte der Orientierungsfunktion gar nicht so viel „zu viel“ ist.

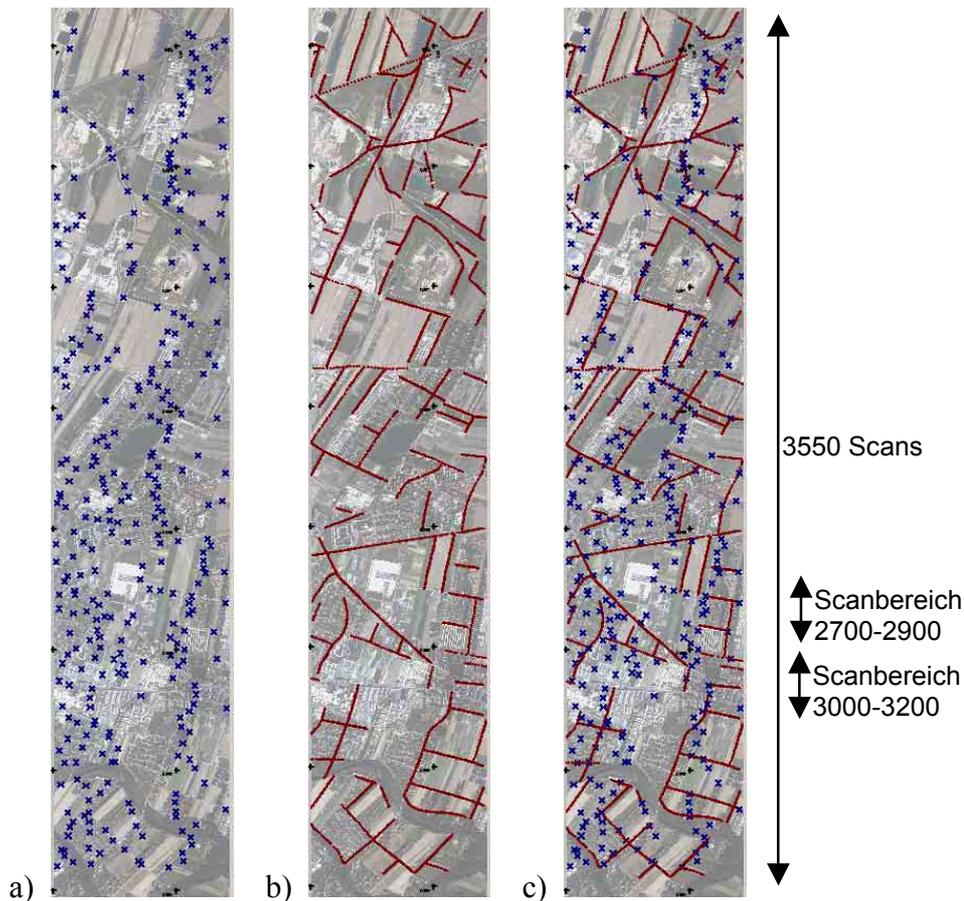


Abb. 8-10: Streifen 7 des Messfluges 1997 mit verfügbaren Passpunkten (a), Passlinien (b) und gemeinsame Darstellung der Passpunkte und Passlinien (c)

### 8.3.1 Bearbeitung des Messfluges 1997 ohne Zusatzinformationen

Zunächst soll untersucht werden, ob es möglich ist, ohne irgendwelche Beobachtungen von Parametern der äußeren Orientierung entlang der Flugbahn eine indirekte Sensororientierung durchzuführen. Aufgrund der hohen Korrelation zwischen manchen Orientierungsparametern können nicht alle sechs Parameter in der Ausgleichung bestimmt werden. Es müssen also Annahmen, fiktive Beobachtungen, für manche Orientierungsparameter getroffen werden. Für Pitch ( $pi$ ) wurde aufgrund der hohen Korrelation mit der Verschiebung in Flugrichtung die fiktive Beobachtung  $pi = 0$  eingeführt. Aufgrund des aktivierten automatischen Rollwinkelgleichs wurde für Roll ( $ro$ ) ebenfalls die fiktive Beobachtung  $ro = 0$  angenommen.

Für die Gewichtung der Beobachtungen wurden folgende Annahmen getroffen: Die Genauigkeit der Bildkoordinatenmessungen  $sig_{x,y}$  wurde mit  $sig_{x,y} = 0.5$  Pixel (dies entspricht am Boden ca. 1.5 m) geschätzt. Die Genauigkeit der Passpunkte  $sig_{X,Y,Z}$  und Passlinien  $sig_{GST,SPL}$  wurde mit 0.3 m so hoch angesetzt, dass die Passinformationen praktisch als Konstante eingeführt wurden. Diese hohe Gewichtung der Passinformationen ist nicht immer mit der tatsächlichen Genauigkeit der Passpunkte und -linien zu erklären, denn die Definitionsgenauigkeit beispielsweise einer Straßenachse ist wohl kaum besser als 1 m anzusehen. Diese hohe Gewichtung stammt aus der Intention, dass sich so alle Widersprüche in den Verbesserungsvektoren in der Scanneraufnahme ausdrücken und somit leichter einem bestimmten Scanbereich der Orientierungsfunktion zuzuordnen sind. Der Nachteil, dass dadurch eventuelle grobe Fehler in den Passinformationen fälschlicherweise den Bildmessungen zugeschoben werden, wurde in Kauf genommen.

Die Frage der Gewichtung der fiktiven Beobachtungen ist nicht einfach zu lösen. In Unterstützung durch einige empirische Tests wurde schließlich die Genauigkeit für Pitch  $sig_{pi} = 0.05$  gon (entspricht ca. 0.75 Pixel am Boden) angesetzt, dies entspricht in etwa der Genauigkeit der Bildkoordinatenmessungen. Die Genauigkeit für Roll wurde auf  $sig_{ro} = 0.2$  gon (entspricht ca. 3.5 Pixel am Boden) gesetzt, wodurch Roll primär aus den indirekten Beobachtungen (Bildkoordinatenmessungen und Passinformationen) bestimmt wird, und die fiktiven Roll-Beobachtungen praktisch nur in durch Passinformationen schwach bestimmten Intervallen eine tragende Rolle bekommen. Mit dieser schwachen Gewichtung kommt auch zum Ausdruck, dass die automatische Rollwinkelkorrektur offensichtlich den Rollwinkel nicht hundertprozentig auf Null korrigieren konnte und dass – möglicherweise durch Systemträgheiten - doch Rest-Rollwinkelbeträge in den ATM-Aufnahmen enthalten sind. Die a priori Genauigkeitsannahmen sind in Tab. 8-4 übersichtlich zusammengefasst und gelten für alle in diesem Abschnitt gezeigten Beispiele.

fiktive Beobachtung Roll $ro$	0.0 gon	
Genauigkeit der fiktiven Beobachtung Roll $sig_{ro}$	$\pm 0.2$ gon	$\sim 3.5$ Pixel
fiktive Beobachtung Roll $pi$	0.0 gon	
Genauigkeit der fiktiven Beobachtung Pitch $sig_{pi}$	$\pm 0.05$ gon	$\sim 0.75$ Pixel
Genauigkeit Bildkoordinaten $sig_{x,y}$	$\pm 0.5$ Pixel	
Genauigkeit Passpunkte $sig_{X,Y,Z}$	$\pm 0.3$ m	$\sim 0.1$ Pixel
Genauigkeit Passlinien $sig_{GST,SPL}$	$\pm 0.3$ m	$\sim 0.1$ Pixel
Mittlerer Gewichtseinheitsfehler $sig_0$ a priori bezogen auf Bildkoordinaten	$\pm 0.5$ Pixel	

Tab. 8-4: Annahmen für a priori Genauigkeiten und fiktive Beobachtungen

Das erste Problem bei der Bestimmung der Orientierungsfunktion ist die Verteilung der Knotenpunkte, die aufgrund der konstanten Parametrisierung vom Benutzer vorgegeben werden muss. Ohne konkretes Wissen über die Dynamik entlang der Flugbahn bietet sich die Verteilung in gleichmäßigen Abständen an, wobei zunächst ein relativ großer Knotenabstand (z. B. ein Knoten alle 200 Scans) gewählt wird. Unter der Annahme bzw. - unter begleitender Kontrolle der Messungen - in dem Wissen, dass große Residuen nicht auf grobe Fehler, sondern auf eine zu schlecht modellierte Orientierungsfunktion hindeuten, kann in Intervallen mit großen Residuen ein weiterer Knotenpunkt eingefügt werden und die Ausgleichung wiederholt werden. Dies setzt natürlich voraus, dass genügend Redundanz für die Analyse der Residuen vorhanden ist und überdies genügend Passinformationen für die Bestimmung des zusätzlichen Knotens verfügbar sind. In Bereichen, in denen die Passinformationen knapp

werden, jedoch ein weiterer Knotenpunkt erforderlich ist, kann eventuell durch Verschieben der Knotenpunkte eine engere Knotenverteilung bei noch ausreichenden Passinformationen gefunden werden. Auf diese Weise kann in einem iterativen Prozess die Orientierungsfunktion des Flugstreifens gefunden werden.

### 8.3.1.1 Bestimmung der Orientierungsfunktion unter Verwendung von Passpunkten

Die eben besprochene Vorgehensweise soll nun im Detail am Streifen 7 des Messfluges 1997 gezeigt werden, wobei in den Abbildungen immer der Scanbereich von Scan 2700 bis Scan 2900 dargestellt ist. Zunächst werden nur Passpunkte und noch keine Passlinien verwendet.

#### Orientierungsfunktion mit Hilfe von Passpunkten – Knotenabstand 200 Scans (Kurzbezeichnung der Variante „PP-200scan“):

Bei einem durchschnittlichen Knotenpunktabstand  $\Delta K$  von 200 Scans (in den Randintervallen kann der Knotenpunktabstand etwas vom Durchschnitt abweichen) sind 19 Knotenpunkte  $K$  im gesamten Streifen 7 aktiviert, daraus folgt gemäß Abschnitt 6.7, dass mindestens 60 Passpunkte (PP) zur Bestimmung der Knotenpunkte notwendig sind. Wie einleitend in diesem Abschnitt erläutert, wurden ca. 320 Passpunkte in diesem Streifen gemessen und Abb. 8-10 zeigt, dass die Punkte recht gleichmäßig über den Streifen verteilt sind, sodass es bei diesem ersten Schritt keine Bedenken hinsichtlich etwaiger Unbestimmbarkeit von Knotenpunkten gibt.

Also:

Anzahl der Knotenpunkte $K$	19
Knotenpunktabstand $\Delta K$	200 Scans
minimal notwendige Anzahl PP	60
verfügbare PP	320
durchschnittliche verfügbare Überbestimmung	430%

Die wichtigsten Ausgleichungsergebnisse des gesamten Streifens sind (in Pixel):

$sig_0$ a posteriori bezogen auf Bildkoordinaten	1.51
$resres_x$	1.62
$resres_y$	1.08
$resmax_x$	6.98
$resmax_y$	5.89

Mit  $resres_{x,y}$  ..... durchschnittliches Residuum der Bildkoordinaten  
 $resmax_{x,y}$  ... maximales Residuum der Bildkoordinaten

Schon aus den numerischen Ergebnissen kann man sagen, dass die Ergebnisse der Ausgleichung noch nicht zufriedenstellend sind. In dem Wissen aus der Projektbearbeitung, dass die Passpunktmessungen praktisch keine groben Fehler aufweisen, sind die schlechten Ausgleichungsergebnisse auf eine noch zu schlechte Modellierung der Orientierungsfunktion für den Flugstreifen 7 zurückzuführen.

Zur graphischen Darstellung der Ergebnisse zeigt Abb. 8-11 die Residuenvektoren in der Scanneraufnahme im betrachteten Detailbereich, und Abb. 8-12 zeigt Detailausschnitte aus dem resultierenden Orthophoto am linken und rechten Streifenrand überlagert mit der MZK.

Die Residuenvektoren sind gegenüber dem Plotmaßstab der Bildkoordinaten der Scanneraufnahme um den Faktor 10 vergrößert dargestellt. Rote Vektoren sind größer als 1.75 Pixel, also größer 3.5 mal der geschätzten a priori Genauigkeit der Bildkoordinaten von 0.5 Pixel (siehe Tab. 8-4). Gelbe Vektoren sind kleiner als 1.75 Pixel aber größer als 0.9 Pixel, also 1.8 mal die a priori Genauigkeit. Und schließlich sind die grünen Vektoren kleiner als 0.9 Pixel. Sind die a priori Genauigkeitsannahmen plausibel und die Modellannahmen (Knotenanzahl und Verteilung) gut genug, dann sollten die Restfehler in den Bildkoordinatenmessungen normal verteilt sein, das heißt, es sollte viele kleine, grüne Vektoren geben, einige gelbe Vektoren und ganz wenige bis gar keine rote Vektoren.

Abb. 8-11 entspricht noch nicht dieser Forderung, ca. 75% der Vektoren sind rot, und bis auf ein oder zwei Ausnahmen sind die restlichen Vektoren alle gelb. Die Interpretation des numerischen Ergebnisses, dass die Modellierung der Orientierungsfunktion noch ungenügend ist, ist in dem betrachteten Detailbereich auch anhand der graphisch dargestellten Residuenvektoren gut nachvollziehbar.

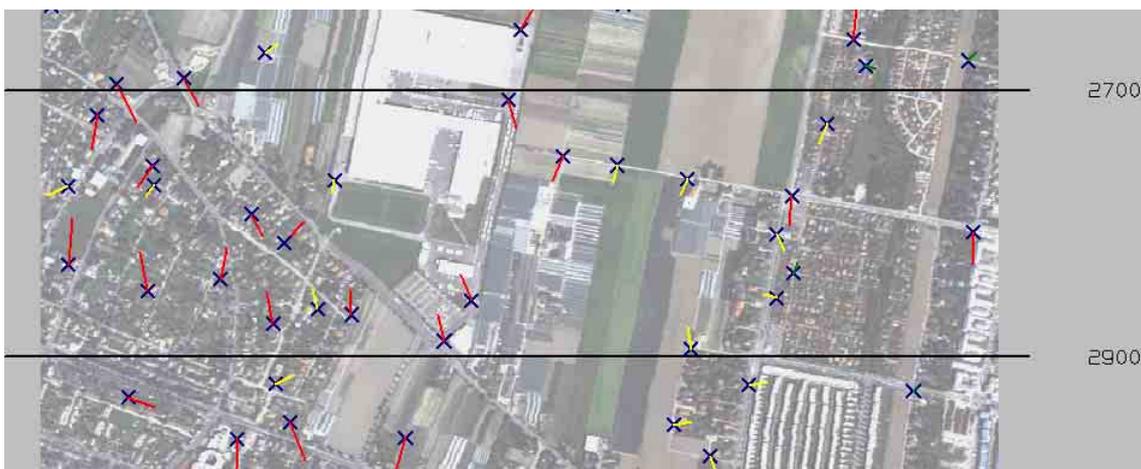


Abb. 8-11: „PP-200scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900: Residuenplot in der Scanneraufnahme, die durchgezogenen Linien repräsentieren Scans mit einem aktivierten Knotenpunkt in der Orientierungsfunktion. Vergrößerungsfaktor der Vektoren ist gleich 10, rote Vektoren  $> 1.75$  Pixel,  $1.75$  Pixel  $\geq$  gelbe Vektoren  $> 0.9$  Pixel, grüne Vektoren  $\leq 0.9$  Pixel.

Die Orthophotoausschnitte in Abb. 8-12 bestätigen die bisherigen Aussagen, und auch in diesen Ausschnitten sind deutliche Versetzungen gegenüber der MZK bemerkbar, wie auch durch die eingezeichneten Pfeile gekennzeichnet ist. Zu beachten ist, dass die Verzerrungen im Orthophoto auch in diesem vergleichsweise kleinen Bereich eine beachtliche Vielfalt an verschiedenen Richtungen aufweisen.

Da als Ursache für die zu großen Residuen und die Versetzungen im Orthophoto die noch zu unflexible und daher zu schlechte Modellierung der Orientierungsfunktion erkannt wurde, wird in einem nächsten Schritt der Knotenabstand auf 100 Scans halbiert.



Abb. 8-12: „PP-200scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900:  
 Orthophotoausschnitte vom linken und rechten Streifenrand mit  
 überlagerter MZK. Die Pfeile deuten Problemstellen im Orthophoto und  
 die Richtung der Versetzungen an.

### Orientierungsfunktion mit Hilfe von Passpunkten – Knotenabstand 100 Scans (Kurzbezeichnung der Variante „PP-100scan“):

Anzahl der Knotenpunkte $K$	36
Knotenpunktabstand $\Delta K$	100 Scans
minimal notwendige Anzahl PP	110
verfügbare PP	320
durchschnittliche verfügbare Überbestimmung	190%

Bei Verdichtung der Knotenpunkte auf Abstände von durchschnittlich 100 Scans sind schon 36 Knotenpunkte für den gesamten Streifen zu bestimmen, und auch die erforderliche Passpunktanzahl steigt entsprechend. Es sind jedoch bis auf das nördliche Randintervall (darin sind nur 4 Passpunkte enthalten) noch immer durchschnittlich 9 Passpunkte in jedem Knotenpunktintervall, sodass auch bei diesem Schritt noch keine allzu großen Bedenken hinsichtlich der Bestimmbarkeit der Knotenpunkte oder etwaige ungünstige Punktverteilungen auftauchen.

Die wichtigsten Ausgleichungsergebnisse des gesamten Streifens sind (in Pixel):

$sig_0$ a posteriori bezogen auf Bildkoordinaten	1.06
$resres_x$	1.04
$resres_y$	0.74
$resmax_x$	-5.26
$resmax_y$	-3.17

Mit  $resres_{x,y}$  ..... durchschnittliches Residuum der Bildkoordinaten  
 $resmax_{x,y}$  ... maximales Residuum der Bildkoordinaten

Die Ausgleichungsergebnisse haben sich deutlich verbessert, sind aber noch immer nicht zufriedenstellend. Die durchschnittlichen Residuen sollten sich in der Größenordnung der a priori Genauigkeitsannahmen von 0.5 Pixel bewegen; sie sind nun noch etwa doppelt so groß. Das gleiche gilt für den mittleren Gewichtseinheitsfehler  $sig_0$  a posteriori.

Die zugehörigen Residuenvektoren im betrachteten Detailbereich in Abb. 8-13 sind nun deutlich kleiner, es gibt nur noch wenige Vektoren im roten Bereich, jedoch noch sehr viele Vektoren im gelben Bereich und praktisch keine Vektoren im grünen Bereich. Die Forderung, viele grüne, wenig gelbe und noch weniger bis gar keine roten Vektoren ist eindeutig nicht erfüllt; die Modellierung der Orientierungsfunktion ist also noch immer nicht genügend genau.

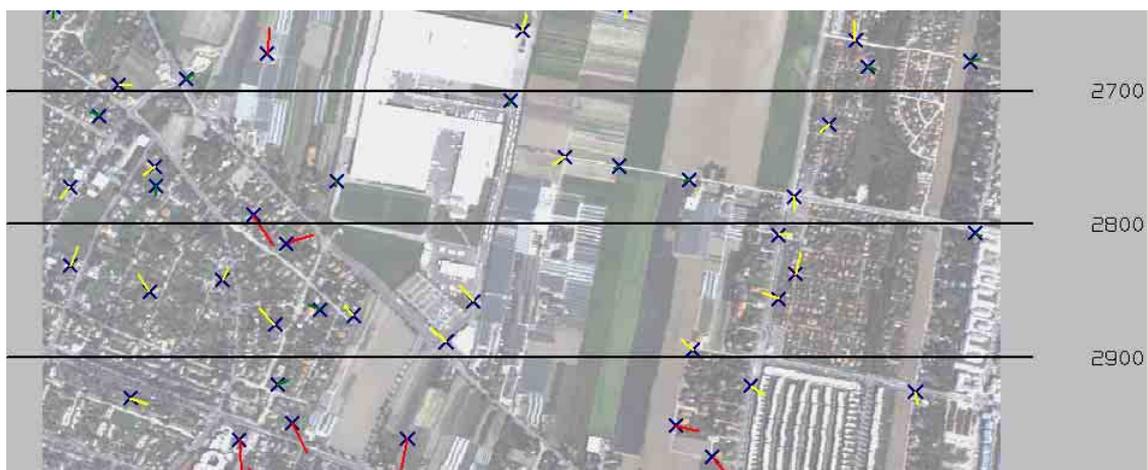


Abb. 8-13: „PP-100scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900: Residuenplot in der Scanneraufnahme, die durchgezogenen Linien repräsentieren Scans mit einem aktivierten Knotenpunkt in der Orientierungsfunktion. Vergrößerungsfaktor der Vektoren ist gleich 10, rote Vektoren  $> 1.75$  Pixel,  $1.75 \text{ Pixel} \geq$  gelbe Vektoren  $> 0.9$  Pixel, grüne Vektoren  $\leq 0.9$  Pixel.

Die Orthophotoausschnitte in Abb. 8-14 zeigen ein korrespondierendes Bild: eine deutliche Verbesserung, aber noch immer nicht zufriedenstellend.

Zur besseren Modellierung der Orientierungsfunktion wird in einem weiteren Schritt noch einmal der Knotenpunktabstand verkleinert.



Abb. 8-14: „PP-100scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900: Orthophotoausschnitte vom linken und rechten Streifenrand mit überlagerter MZX. Die Pfeile deuten Problemstellen im Orthophoto und die Richtung der Versetzungen an.

**Orientierungsfunktion mit Hilfe von Passpunkten – Knotenabstand 50-100 Scans:  
(Kurzbezeichnung der Variante „PP-50scan“):**

Anzahl der Knotenpunkte $K$	51
Knotenpunktabstand $\Delta K$	50-100 Scans
minimal notwendige Anzahl PP	160
verfügbare PP	320
durchschnittliche verfügbare Überbestimmung	100%

Bei Verdichtung der Knotenpunkte auf Abstände von 50-100 Scans sind 51 Knotenpunkte zu bestimmen. Es konnten nun nicht mehr alle Knotenpunktintervalle halbiert werden, sondern nur mehr in etwa die Hälfte der Intervalle, weil teilweise die nötige Passpunktanzahl zur Bestimmung eines weiteren Knotens gefehlt oder weil die Punkte sehr schlecht verteilt waren. Das Verhalten der Residuenvektoren und der Versetzungen im Orthophoto ist für diese Bereiche mit Knotenpunktabstand  $\Delta K = 100$  Scans ganz ähnlich zur bereits oben gezeigten Variante „PP-100scan“ und wird hier nicht noch einmal detailliert diskutiert.

Wenn der Knotenpunktabstand über den gesamten Streifen auf  $\Delta K = 50$  Scans reduziert würde (wie es bei ausreichend guter Verteilung der Passpunkten auch gemacht worden wäre), wären etwa 70 Knotenpunkte zu bestimmen und die erforderliche minimale Passpunktanzahl würde auf 210 Passpunkte ansteigen. Die durchschnittliche verfügbare Überbestimmung würde sich schon auf 50% reduzieren, was der Minimalanforderung für eine Analyse der Residuen Nahe kommen würde (eine gleichmäßige und günstige Verteilung der Passpunkte

vorausgesetzt). In diesem Rechenbeispiel sieht man, dass die ursprünglich als sehr hoch empfundene Passpunktanzahl von 320 Punkten für einen Flugstreifen gar nicht „zu viel“ ist, wenn so aufgrund der Flugdynamik viele Knotenpunkte zu bestimmen sind.

Die wichtigsten Ausgleichungsergebnisse des gesamten Streifens sind (in Pixel):

$sig_0$ a posteriori bezogen auf Bildkoordinaten	0.74
$resres_x$	0.56
$resres_y$	0.62
$resmax_x$	2.33
$resmax_y$	-2.23

Mit  $resres_{x,y}$  ..... durchschnittliches Residuum der Bildkoordinaten

$resmax_{x,y}$  ... maximales Residuum der Bildkoordinaten

Die numerischen Ausgleichungsergebnisse sind nun schon deutlich besser und entsprechen schon näherungsweise den Erwartungen. Jedoch in dem Wissen, dass manche Knotenpunktintervalle halbiert hätten werden sollen, aber nicht halbiert werden konnten, sind die Ergebnisse für den gesamten Streifen noch nicht ganz zufriedenstellend. Es wird auch jetzt noch mehr bewusst, dass die Aussagekraft der Gesamtstatistik für den Flugstreifen begrenzt ist und nichts über einzelne Intervalle aussagt; dies bedeutet, dass alle Knotenpunktintervalle mit geeigneten Analysemethoden (z. B. Residuenplot) gesondert zu prüfen sind.

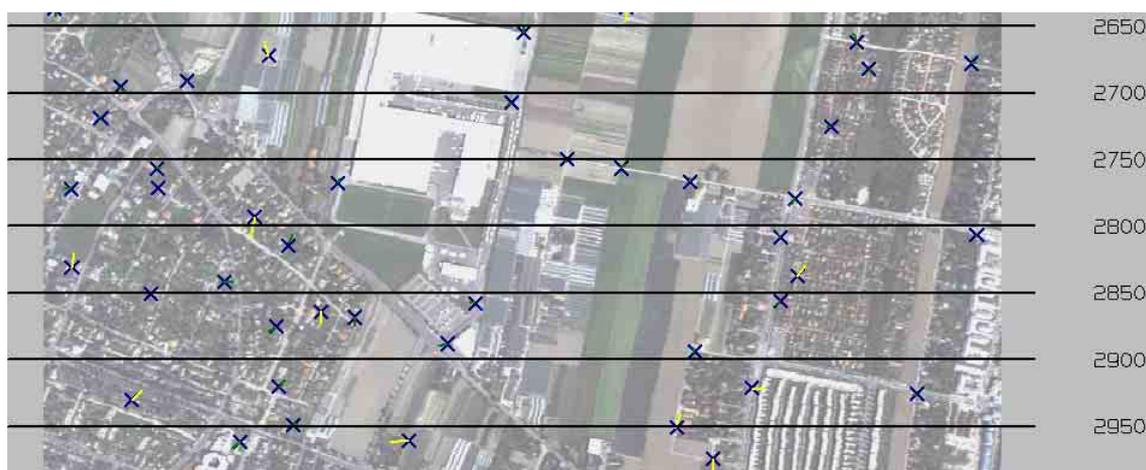


Abb. 8-15: „PP-50scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900: Residuenplot in der Scanneraufnahme, die durchgezogenen Linien repräsentieren Scans mit einem aktivierten Knotenpunkt in der Orientierungsfunktion. Vergrößerungsfaktor der Vektoren ist gleich 10, rote Vektoren  $> 1.75$  Pixel,  $1.75$  Pixel  $\geq$  gelbe Vektoren  $> 0.9$  Pixel, grüne Vektoren  $\leq 0.9$  Pixel.

Die Residuenvektoren in Abb. 8-15 vom betrachteten Detailbereich, in den zusätzliche Knotenpunkte eingefügt werden konnten, entsprechen sehr gut den Erwartungen, die meisten Vektoren sind im grünen Bereich, es gibt noch ein paar gelbe Vektoren, aber gar keine roten Vektoren mehr. Zumindest für diesen betrachteten Scanbereich, konnte die Modellierung der Orientierungsfunktion offenbar gut erfolgen, obwohl in drei Knotenpunktintervallen (2700-2750, 2750-2800 und 2850-2900) der rechte Streifenrand hinsichtlich Passpunkten etwas unterbesetzt ist, und dort erst eine endgültige Aussage anhand des Orthophotos getätigt

werden kann. Die Orthophotoausschnitte in Abb. 8-16 zeigen kaum Versetzungen mehr, und das Ergebnis ist in diesem Detailbereich zufriedenstellend.



Abb. 8-16: „PP-50scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900: Orthophotoausschnitte vom linken und rechten Streifenrand mit überlagerter MZK; es sind kaum Versetzungen mehr zu erkennen.

### 8.3.1.2 Bestimmung der Orientierungsfunktion unter Verwendung von wenigen Passpunkten mit Unterstützung von Passlinien

Wie bei Variante „PP-50scan“ im vorhergehenden Abschnitt 8.3.1.1 erläutert wurde, war der im Detail gezeigte Scanbereich ein positives Beispiel für genügend verfügbare Passpunkte. Dies war aber nicht für den gesamten Streifen so. Es soll daher nun gezeigt werden, wie die drei Varianten „PP-200scan“, „PP-100scan“ und „PP-50scan“ bei Verwendung von weniger Passpunkten, dafür aber mit Unterstützung der verfügbaren Passlinien aussehen. Dazu wurde die Passpunktanzahl für den gesamten Streifen von 320 Passpunkte auf etwa 60 Passpunkte, die ziemlich gleichmäßig verteilt sind, reduziert und alle verfügbaren Linien aktiviert (die Kurzbezeichnung der Varianten in diesem Abschnitt beginnt daher mit „Lin“). Die nun verfügbare Passpunktanzahl reicht nur zur (praktisch eindeutigen) Bestimmung von maximal 20 Knotenpunkten; dies entspricht in diesem Projekt einem Knotenpunktabstand von 200 Scans. Um den direkten Vergleich mit den bisher gezeigten Ergebnissen zu gewährleisten, werden in der Folge wieder die numerischen Ergebnisse des gesamten Streifens angegeben und die Detailausschnitte vom Scanbereich 2700-2900 gezeigt. Die Anzahl und Verteilung der Knotenpunkte ist in den nachfolgend gezeigten Varianten „Lin-200scan“ und „Lin-100scan“ gleich wie in den Varianten „PP-200scan“ und „PP-100scan“ des vorhergehenden Abschnitts 8.3.1.1 bei der Verwendung von Passpunkten. Bei Variante „Lin-50scan“ wurde der Knotenpunktabstand auf 50 Scans für den gesamten Streifen gesetzt.

**Orientierungsfunktion mit Hilfe von wenigen Passpunkten unterstützt durch Passlinien  
– Knotenabstand 200 Scans:  
(Kurzbezeichnung der Variante „Lin-200scan“):**

Es folgen zunächst in unkommentierter Weise die Tabellen und Abbildungen, die Diskussion dieses Schrittes folgt nach den Orthophotoausschnitten.

Anzahl der Knotenpunkte $K$	19
Knotenpunktabstand $\Delta K$	200 Scans
minimal notwendige Anzahl PP <sup>*)</sup>	60
Verfügbare PP	60
Passlinien verfügbar	ja

<sup>\*)</sup> Minimale Anzahl von gleichmäßig und gut verteilten Passpunkten, die notwendig wäre, um die Orientierungsfunktion alleine mit Passpunkten zu bestimmen

Die wichtigsten Ausgleichungsergebnisse des gesamten Streifens sind (in Pixel):

$sig_0$ a posteriori bezogen auf Bildkoordinaten	1.00
$resres_x$	0.80
$resres_y$	0.83
$resmax_x$	-6.27
$resmax_y$	4.16

Mit  $resres_{x,y}$  ..... durchschnittliches Residuum der Bildkoordinaten  
 $resmax_{x,y}$  ... maximales Residuum der Bildkoordinaten

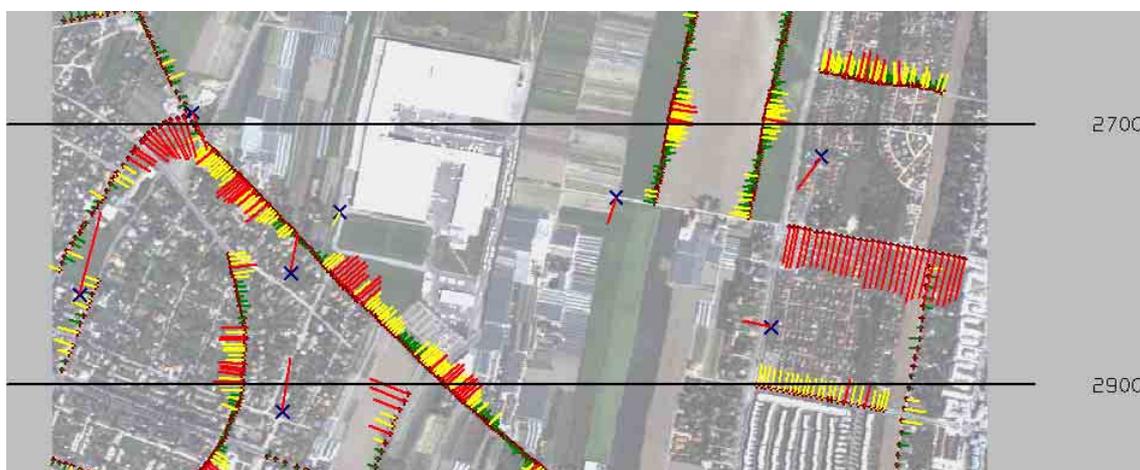


Abb. 8-17: „Lin-200scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900: Residuenplot in der Scanneraufnahme, die durchgezogenen Linien repräsentieren Scans mit einem aktivierten Knotenpunkt in der Orientierungsfunktion. Vergrößerungsfaktor der Vektoren ist gleich 10, rote Vektoren  $> 1.75$  Pixel,  $1.75 \text{ Pixel} \geq$  gelbe Vektoren  $> 0.9$  Pixel, grüne Vektoren  $\leq 0.9$  Pixel.



Abb. 8-18: „Lin-200scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900: Orthophotoausschnitte vom linken und rechten Streifenrand mit überlagerter MZK. Die Pfeile deuten Problemstellen im Orthophoto und die Richtung der Versetzungen an.

Wie ausgehend vom Beispiel „PP-200scan“ schon zu erwarten war, ist das Ergebnis dieser Variante „Lin-200scan“ weder numerisch noch graphisch zufrieden stellend. Die durchschnittlichen Residuen und der mittlere Gewichtseinheitsfehler sind zwar kleiner als bei der Variante „PP-200scan“, jedoch ist dies einfach durch die Vielzahl der hinzukommenden Linienpunkte zu erklären, die den Gesamtdurchschnitt verbessern. Die Residuenvektoren in Abb. 8-17 sprechen ein sehr deutliches Bild. Es ist zu bemerken, dass die Residuen der Linienpunkte alle senkrecht auf die Linie stehen, d.h. dass in Richtung der Linie kein Widerspruch aufgedeckt werden kann, sondern nur senkrecht zum Linienverlauf. Dies bedeutet weiters, dass Linien auch immer nur einen Beitrag quer zu ihrem Verlauf zur Bestimmung der Orientierungsfunktion liefern können. Die Orthophotoausschnitte in Abb. 8-18 zeigen ein entsprechendes, nicht zufriedenstellendes Ergebnis.

**Orientierungsfunktion mit Hilfe von wenigen Passpunkten unterstützt durch Passlinien  
– Knotenabstand 100 Scans:  
(Kurzbezeichnung der Variante „Lin-100scan“):**

Anzahl der Knotenpunkte $K$	36
Knotenpunktabstand $\Delta K$	100 Scans
minimal notwendige Anzahl PP <sup>*)</sup>	110
Verfügbare PP	60
Passlinien verfügbar	ja

<sup>\*)</sup> Minimale Anzahl von gleichmäßig und gut verteilten Passpunkten, die notwendig wäre, um die Orientierungsfunktion alleine mit Passpunkten zu bestimmen

Die wichtigsten Ausgleichungsergebnisse des gesamten Streifens sind (in Pixel):

$sig_0$ a posteriori bezogen auf Bildkoordinaten	0.63
$resres_x$	0.45
$resres_y$	0.54
$resmax_x$	-7.38
$resmax_y$	-4.03

Mit  $resres_{x,y}$  ..... durchschnittliches Residuum der Bildkoordinaten  
 $resmax_{x,y}$  ... maximales Residuum der Bildkoordinaten

Nun sind über den gesamten Streifen schon mehr Knotenpunkte aktiviert, als mit Hilfe der 60 aktiven Passpunkte bestimmbar sind. Demnach ist die Verwendung der Passlinien in diesem Schritt schon essentiell. Im betrachteten Detailbereich fallen in die beiden Intervalle noch gerade jeweils drei Passpunkte, sodass in diesem Bereich eine Bestimmung der Knotenpunkte gerade noch möglich wäre, aber eine Analyse der Residuenvektoren wäre aufgrund fehlender Überbestimmung nicht mehr möglich, und kann jetzt nur aufgrund der verfügbaren Passlinien durchgeführt werden. Das numerische Ergebnis ist erwartungsgemäß bei Verdichtung der Knotenpunkte besser geworden. Auch die graphische Darstellung der Residuen im Detailbereich in Abb. 8-19 und die Orthophotoausschnitte in Abb. 8-20 zeigen klare Verbesserungen. Jedoch genauso, wie bei Variante „PP-100scan“ ist das Ergebnis noch nicht zufriedenstellend.

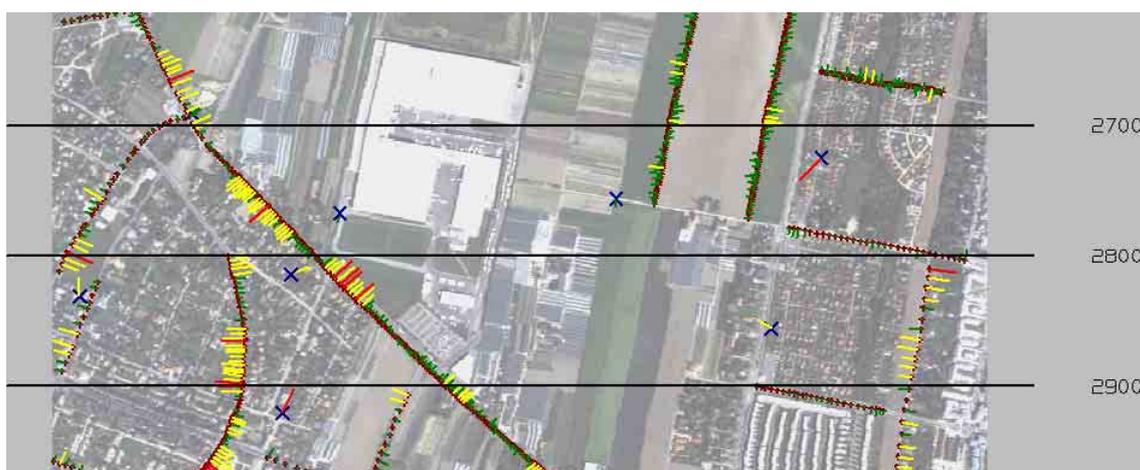


Abb. 8-19: „Lin-100scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900: Residuenplot in der Scanneraufnahme, die durchgezogenen Linien repräsentieren Scans mit einem aktivierten Knotenpunkt in der Orientierungsfunktion. Vergrößerungsfaktor der Vektoren ist gleich 10, rote Vektoren  $> 1.75$  Pixel,  $1.75 \text{ Pixel} \geq$  gelbe Vektoren  $> 0.9$  Pixel, grüne Vektoren  $\leq 0.9$  Pixel.



Abb. 8-20: „Lin-100scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900:  
Orthophotoausschnitte vom linken und rechten Streifenrand mit  
überlagerter MZK. Die Pfeile deuten Problemstellen im Orthophoto und  
die Richtung der Versetzungen an.

**Orientierungsfunktion mit Hilfe von wenigen Passpunkten unterstützt durch Passlinien  
– Knotenabstand 50 Scans:  
(Kurzbezeichnung der Variante „Lin-50scan“):**

Anzahl der Knotenpunkte $K$	71
Knotenpunktabstand $\Delta K$	50 Scans
minimal notwendige Anzahl PP <sup>*)</sup>	215
Verfügbare PP	60
Passlinien verfügbar	ja

<sup>\*)</sup> Minimale Anzahl von gleichmäßig und gut verteilten Passpunkten, die notwendig wäre, um die Orientierungsfunktion alleine mit Passpunkten zu bestimmen

Die wichtigsten Ausgleichsergebnisse des gesamten Streifens sind (in Pixel):

$sig_0$ a posteriori bezogen auf Bildkoordinaten	0.46
$resres_x$	0.30
$resres_y$	0.40
$resmax_x$	-2.66
$resmax_y$	2.27

Mit  $resres_{x,y}$  ..... durchschnittliches Residuum der Bildkoordinaten  
 $resmax_{x,y}$  ... maximales Residuum der Bildkoordinaten

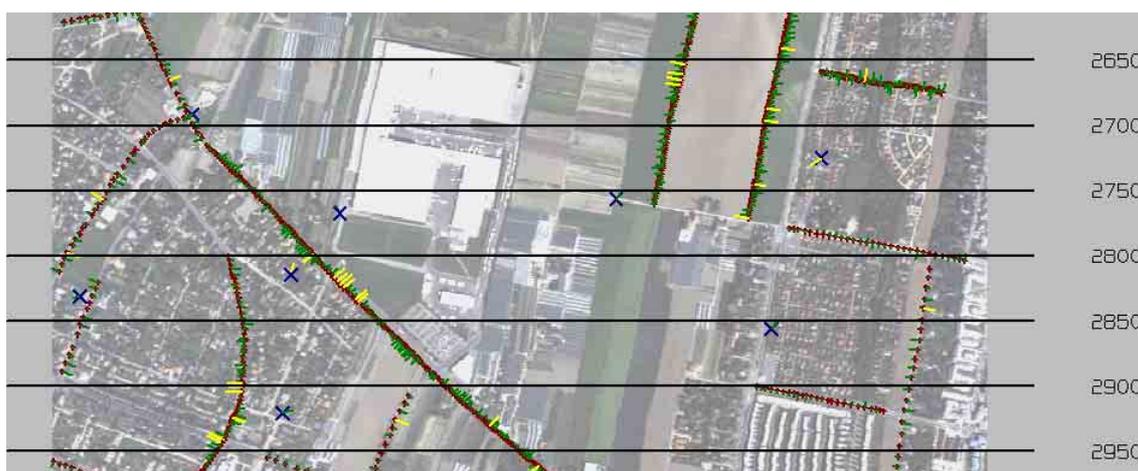


Abb. 8-21: „Lin-50scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900: Residuenplot in der Scanneraufnahme, die durchgezogenen Linien repräsentieren Scans mit einem aktivierten Knotenpunkt in der Orientierungsfunktion. Vergrößerungsfaktor der Vektoren ist gleich 10, rote Vektoren  $> 1.75$  Pixel,  $1.75 \text{ Pixel} \geq$  gelbe Vektoren  $> 0.9$  Pixel, grüne Vektoren  $\leq 0.9$  Pixel.



Abb. 8-22: „Lin-50scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900: Orthophotoausschnitte vom linken und rechten Streifenrand mit überlagerter MZK. Die Pfeile deuten noch Rest-Problemstellen im Orthophoto und die Richtung der Versetzungen an.

Die erreichten numerischen Ergebnisse entsprechen nun sehr schön den Erwartungen und lassen hoffen, dass auch das Orthophoto eine gute Qualität aufweist. Die Residuenvektoren in

Abb. 8-21 zeigen keine Problemstellen mehr auf, und die Orthophotoausschnitte in Abb. 8-22 sind auch großteils zufriedenstellend, jedoch sind bei genauer Betrachtung noch einige Versetzungen parallel zur Flugrichtung festzustellen. Ein neuerlicher Blick auf die Residuenvektoren und speziell die Prüfung der Verteilung der verfügbaren Passinformationen zeigt, dass in den zugehörigen Bereichen kaum Passpunkte vorhanden sind und die Passlinien näherungsweise parallel zur Flugrichtung verlaufen. Dies ist offensichtlich zu wenig, um für die betroffenen Intervalle in der Orientierungsfunktion die Verschiebung in Flugrichtung bzw. Yaw optimal bestimmen zu können. Die Rest-Versetzungen im Orthophoto sind auf diese Bereiche lokal beschränkt und nehmen (zufälligerweise) einen Betrag an, der an der Grenze zur Tolerierbarkeit ist. Wie das Ergebnis aussieht, wenn im betrachteten Detailbereich gar keine Passpunkte vorhanden sind, wird im folgenden Abschnitt 8.3.1.3 gezeigt.

Die Kontrolle des Orthophotos des gesamten Streifens hat auch noch weitere Knotenpunktintervalle zutage gebracht, in denen ebenfalls die reduzierten Passpunkte gemeinsam mit den verfügbaren Linieninformationen nicht zur zuverlässigen Bestimmung der Orientierungsfunktion ausreichte. Damit wird deutlich, dass die Verteilung der Passpunkte und die Verteilung inklusive Richtung der Passlinien wesentlich für die Qualität der Bestimmung der Orientierungsfunktion und damit des Orthophotos sind.

### **8.3.1.3 Bestimmung der Orientierungsfunktion im Detailbereich ausschließlich mit Hilfe der vorhandenen Passlinien**

Wie im vorigen Abschnitt angekündigt, sind nun versuchsweise für den betrachteten Detailbereich zwischen Scan 2700 und Scan 2900 sämtliche Passpunkte deaktiviert. Die Kurzbezeichnung für diese Variante lautet „nurLin-50scan“.

Die Knotenpunkte mussten in diesem Beispiel ausschließlich mit den vorhandenen Linieninformationen bestimmt werden. Der Residuenplot in Abb. 8-23 zeigt ein unauffälliges Bild, jedoch bei Betrachtung der Linienverläufe wird klar, dass der Knotenpunkt im Scan 2850 nur quer zur Flugrichtung bestimmt werden kann, aber die Verschiebung in Flugrichtung bzw. Yaw sind unbestimmt, denn alle Linien laufen in diesem Bereich näherungsweise parallel zur Flugrichtung, einzig die Linie in der Mitte des Streifen läuft ein bisschen schräg, was aber zu wenig Stützinformation speziell für Yaw liefert. Die Orthophotoausschnitte in Abb. 8-24 bestätigen dies, genau in dem lokal eingeschränkten Bereich um Scan 2850 gibt es im Orthophoto auf beiden Seiten eine massive gegenläufige und auf Yaw-Probleme hindeutende Verschiebung parallel zur Flugrichtung. In den benachbarten Intervallen ist das Orthophoto aber wieder korrekt.

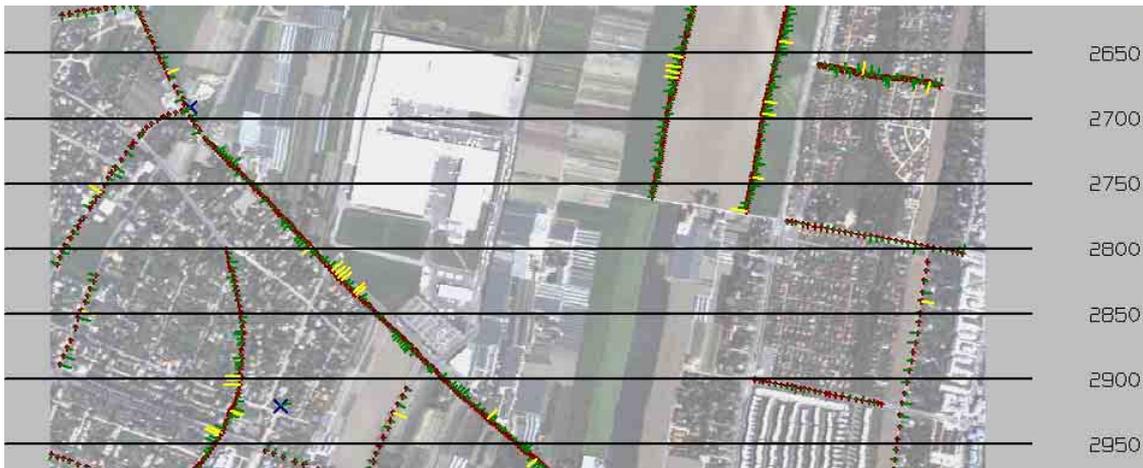


Abb. 8-23: „nurLin-50scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900: Residuenplot in der Scanneraufnahme, die durchgezogenen Linien repräsentieren Scans mit einem aktivierten Knotenpunkt in der Orientierungsfunktion. Vergrößerungsfaktor der Vektoren ist gleich 10, rote Vektoren  $> 1.75$  Pixel,  $1.75 \text{ Pixel} \geq$  gelbe Vektoren  $> 0.9$  Pixel, grüne Vektoren  $\leq 0.9$  Pixel.



Abb. 8-24: „nurLin-50scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900: Orthophotoausschnitte mit überlagelter MZK. Die Pfeile deuten Problemstellen im Orthophoto und die Richtung der Versetzungen an.

### 8.3.1.4 Bestimmung der Orientierungsfunktion unter Verwendung aller verfügbaren Passinformationen

Zum Abschluss dieser Reihe von Beispielen sei nun auch noch das Ergebnis gezeigt, das man erhält, wenn alle verfügbaren Passpunkte und Passlinien zur Bestimmung der Orientierungsfunktion verwendet werden. Dieses Ergebnis stellt sozusagen die „Referenz“ zu den bisher gezeigten Ergebnissen dar. Die Kurzbezeichnung dieser Variante ist „Ref-50scan“.

Anzahl der Knotenpunkte $K$	71
Knotenpunktabstand $\Delta K$	50 Scans
minimal notwendige Anzahl PP <sup>*)</sup>	215
Verfügbare PP	320
Passlinien verfügbar	ja

<sup>\*)</sup> Minimale Anzahl von gleichmäßig und gut verteilten Passpunkten, die notwendig wäre, um die Orientierungsfunktion alleine mit Passpunkten zu bestimmen

Die wichtigsten Ausgleichungsergebnisse des gesamten Streifens sind (in Pixel):

$sig_0$ a posteriori bezogen auf Bildkoordinaten	0.48
$resres_x$	0.33
$resres_y$	0.41
$resmax_x$	-2.63
$resmax_y$	-2.76

Mit  $resres_{x,y}$  ..... durchschnittliches Residuum der Bildkoordinaten

$resmax_{x,y}$  ... maximales Residuum der Bildkoordinaten

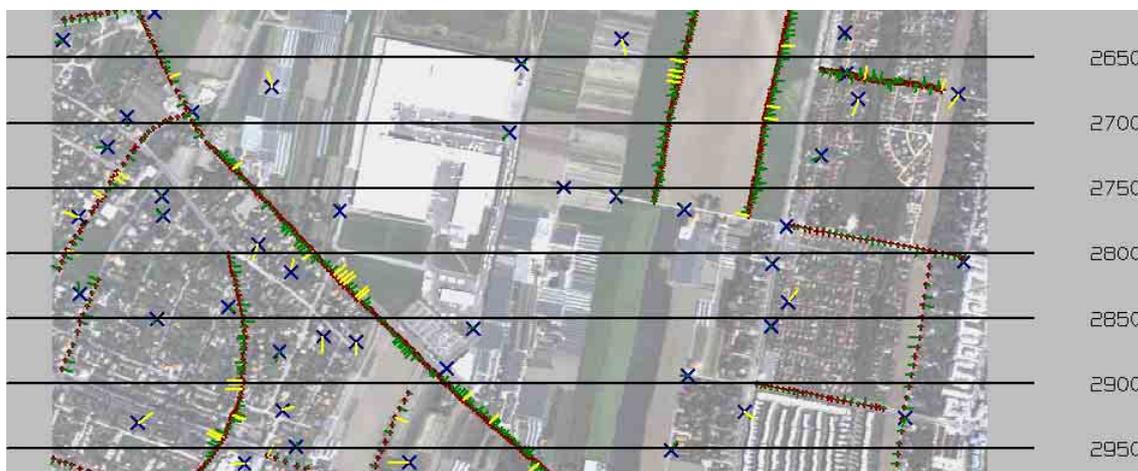


Abb. 8-25: „Ref-50scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900: Residuenplot in der Scanneraufnahme, die durchgezogenen Linien repräsentieren Scans mit einem aktivierten Knotenpunkt in der Orientierungsfunktion. Vergrößerungsfaktor der Vektoren ist gleich 10, rote Vektoren  $> 1.75$  Pixel,  $1.75$  Pixel  $\geq$  gelbe Vektoren  $> 0.9$  Pixel, grüne Vektoren  $\leq 0.9$  Pixel.

Aus numerischer Sicht ist praktisch kein Unterschied zu dem Ergebnis in Abschnitt 8.3.1.2, Variante „Lin-50scan“ zu erkennen. Der mittlere Gewichtseinheitsfehler und die durchschnittlichen Residuen sind bei der Variante „Ref-50scan“ im Bereich von einem halben Pixel (auf die Scanneraufnahme bezogen). Die flächendeckende Kontrolle ergab, dass das

Orthophoto in weiten Bereichen (ca. 95 % des Scanbereichs) zufriedenstellend ist; auch im bisher betrachteten Detailbereich sind praktisch keine Versetzungen mehr zu erkennen (Abb. 8-26).



Abb. 8-26: „Ref-50scan“: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich 2700-2900: Orthophotoausschnitte vom linken und rechten Streifenrand mit überlagerter MZK; bestes erreichtes Ergebnis im betrachteten Detailbereich.

Es gibt aber im Flugstreifen 7 noch immer einen Bereich um Scan 3100, in dem kein genaues Orthophoto erreicht werden konnte. Abb. 8-27 zeigt die verfügbaren Passinformationen in diesem Bereich und die Residuenvektoren nach der Ausgleichung mit gleichverteilten Knotenpunkten in einem Abstand von 50 Scans. Abb. 8-28 zeigt die zugehörigen Orthophotoausschnitte, wobei im Ausschnitt vom linken Streifenrand vor allem Residuen parallel zur Flugrichtung und im Ausschnitt vom rechten Streifenrand große Residuen quer zur Flugrichtung auftreten.

Versuche, die offensichtlich notwendige hohe Anzahl von Knotenpunkten in diesem Bereich möglichst optimal an die verfügbaren Passinformationen anzupassen (also die Knotenpunktverteilung entlang der Orientierungsfunktion zu variieren), brachte am linken Streifenrand Verbesserungen, jedoch am rechten Streifenrand konnten keine wesentlichen Verbesserungen erreicht werden. Mögliche Erklärungen für das nicht optimale Orthophotoergebnis sind einerseits die mangelnden Passinformationen am rechten Streifenrand und/oder möglicherweise gab es während des Fluges in diesem Bereich eine überdurchschnittlich hohe Flugdynamik. Können in so einem Fall keine weiteren Passinformationen oder Informationen zum Flugverlauf (wie in Abschnitt 8.3.2 noch gezeigt wird) beigezogen werden, dann muss man sich für diesen lokal begrenzten Bereich mit einer schlechteren Qualität im Orthophoto abfinden.



Abb. 8-27: „Ref-50scan“-Problembereich: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich um 3100: Residuenplot in der Scanneraufnahme, die durchgezogenen Linien repräsentieren Scans mit einem aktivierten Knotenpunkt in der Orientierungsfunktion. Vergrößerungsfaktor der Vektoren ist gleich 10, rote Vektoren  $> 1.75$  Pixel,  $1.75 \text{ Pixel} \geq$  gelbe Vektoren  $> 0.9$  Pixel, grüne Vektoren  $\leq 0.9$  Pixel.

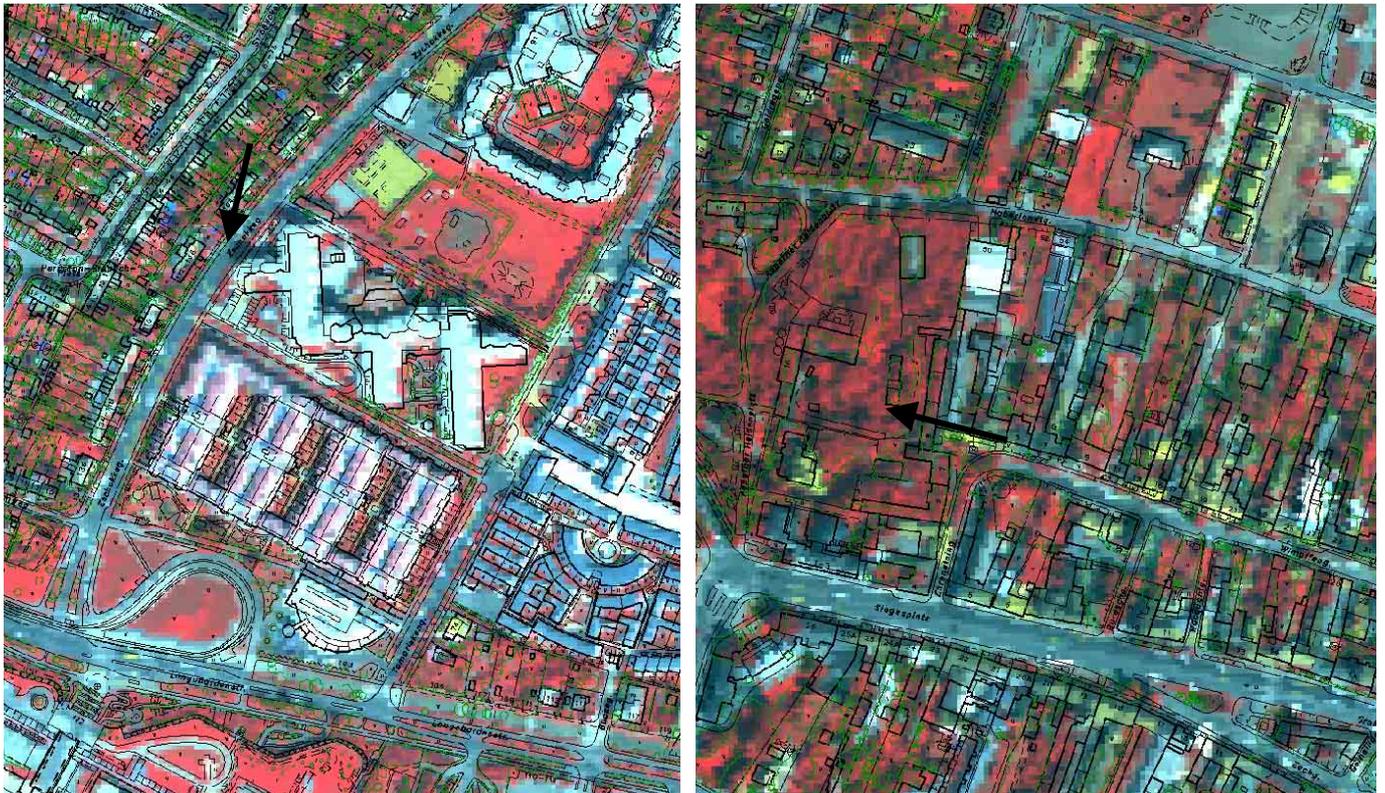


Abb. 8-28: „Ref-50scan“-Problembereich: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich um 3100: Orthophotoausschnitte vom linken und rechten Streifenrand mit überlagerter MZK. Die Pfeile deuten Problemstellen im Orthophoto und die Richtung der Versetzungen an. (vgl. pixelgenaues Orthophoto in Abb. 8-30 rechts)

### 8.3.2 Bearbeitung des Messfluges 1997 unter der Verwendung der verfügbaren Zusatzinformationen

Die Housekeeping-Daten der ATM-Aufnahmen des Messfluges 1997 enthalten Stellungsbeobachtungen von Roll (Abgriff des ATM-Rollkreisels), Pitch und Yaw (Flugzeugkreisels-Abgriffe), was als teilweise Vorwegnahme von GPS/INS-Beobachtungen entlang der Flugbahn betrachtet werden kann. Im folgenden werden die Bezeichnungen ATM-Roll, ATM-Pitch und ATM-Yaw für diese Stellungsbeobachtungen verwendet. Da ATM-Pitch und ATM-Yaw Abgriffe eines Flugzeugkreisels darstellen, müssen die beobachteten Werte nicht automatisch auch für den ATM anwendbar sein. Soweit aus Informationen zum Flug zu entnehmen war, blieb jedoch die relative Lage zwischen Flugzeug und ATM während der Streifenaufnahme konstant, sodass ATM-Roll und ATM-Pitch mit einer wahrscheinlich notwendigen Stand-Korrektur grundsätzlich für die Sensororientierung verwendet werden können. Die ATM-Roll-Beobachtungen als Abgriffe des ATM-Rollkreisels sind eigentlich nicht zu verwenden, weil die automatische Rollwinkelkorrektur während der Aufnahme aktiviert war und somit fiktive Beobachtungen Roll = 0 die Aufnahmesituation besser beschreiben sollten. Wenn jedoch die automatische Rollwinkelkorrektur während der Aufnahme nicht vollständig bzw. erst verzögert durchgeführt wird (wie zumindest für einige Bereiche der Aufnahmen vermutet wird), so können auch die mitregistrierten Rollwinkelbeobachtungen des ATM-Rollkreisels nützlich sein. Grundsätzlich sollte bei genauen und zuverlässigen Stellungsbeobachtungen eine große Einsparung der notwendigen Passinformation möglich sein, weil im Rahmen der Ausgleichung nur noch die drei Positionsparameter entlang der Flugbahn bestimmt werden müssen.

Problematisch bei der Verwendung der ATM-Stellungsbeobachtungen des Messfluges 1997 war, dass keine genauen Angaben oder Erfahrungswerte über ihre Genauigkeit vorlagen. Außerdem war unklar, ob überhaupt und wie gut die ATM-Rollwinkelbeobachtungen verwertbar wären. Grundsätzlich sind zwei Varianten der Nutzung der ATM-Stellungsbeobachtungen denkbar: i) Verwendung von ATM-Pitch und ATM-Yaw sowie fiktive Beobachtungen Roll = 0 und ii) Verwendung von ATM-Pitch und ATM-Yaw sowie ATM-Roll. Interessanterweise ergaben einige empirische Tests keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen beiden Varianten. Die sicherlich betragsmäßig zu großen ATM-Roll-Beobachtungen wurden während der Ausgleichung durch entsprechende, mit Roll korrelierte Verschiebungen quer zur Flugrichtung kompensiert. Dadurch ergibt sich zwar eine physikalisch unplausible Flugbahn, jedoch das Ergebnis am Boden bleibt davon größtenteils unberührt.

Die Genauigkeiten wurden schließlich so angenommen, dass der aus der Genauigkeitsannahme resultierende Bogen am Boden oder Streifenrand etwa 2-3 Pixel erreicht. Konkret wurde für ATM-Pitch  $sig_{ATM-pi} = 0.1$  gon, für ATM-Yaw  $sig_{ATM-ya} = 0.5$  gon und für ATM-Roll bzw. für die fiktive Rollbeobachtung  $sig_{ATM-ro} = sig_{fiktiv-ro} = 0.2$  gon gesetzt. Bestätigt wurde diese Genauigkeitsannahme durch eine graphische Darstellung der ATM-Stellungsbeobachtungen, welche – vor allem für Roll - ein Rauschen in der Größenordnung von 0.1-0.2 gon zeigte.

Demnach ist die Genauigkeit der ATM-Stellungsbeobachtungen für Pitch und Yaw offensichtlich nicht ausreichend, um auch bei reduzierten Passinformationen pixelgenaue Orthophotos zu erhalten. Das gleiche gilt sowohl für die fiktiven Beobachtungen Roll = 0 als auch die ATM-Roll-Beobachtungen. Mit diesen schwachen Genauigkeiten der ATM-

Stellungsbeobachtungen und gleichzeitiger Forderung eines pixelgenauen Orthophotos kann keine massive Einsparung an Passinformationen erwartet werden. Die zusätzlichen Beobachtungen können aber eine gewisse Unterstützung in der Ausgleichung sein. Weiters können sie als Indikator für die Knotenverteilung entlang der Flugbahn – vor allem in Problembereichen – herangezogen werden.

Es soll nun noch einmal der am Ende des Abschnitts 8.3.1.4 gezeigte Problembereich des Streifens 7 betrachtet werden und mit Hilfe der ATM-Stellungsbeobachtungen versucht werden, für diesen Bereich ein besseres Ergebnis zu erzielen. Dazu wurden folgende Varianten berechnet:

- Variante 1: Knotenpunktabstand 50 Scans; fiktive Beobachtung Roll = 0; ATM-Pitch und ATM-Yaw.
- Variante 2: Knotenpunktabstand variiert; fiktive Beobachtung Roll = 0; ATM-Pitch und ATM-Yaw.
- Variante 3: Knotenpunktabstand 50 Scans; ATM-Roll, ATM-Pitch und ATM-Yaw.
- Variante 4: Knotenpunktabstand variiert; ATM-Roll, ATM-Pitch und ATM-Yaw.

Für die Variation der Knotenpunktabstände dienten die Verteilung der verfügbaren Passinformationen und eine graphische Darstellung der ATM-Stellungsparameter. Abb. 8-29 zeigt zunächst den Residuenplot der schließlich besten Variante 4. Die durchgezogenen Querlinien im Residuenplot zeigen Scans mit einem Knotenpunkt in der Orientierungsfunktion, welche bei Variante 4 (ebenso wie bei Variante 2) nicht mehr gleichmäßig verteilt sind. Die Knotenpunkte der Varianten 1 und 3 sind gleichmäßig in einem Abstand von 50 Scans verteilt (gleiche Verteilung wie in Abb. 8-27 ersichtlich).

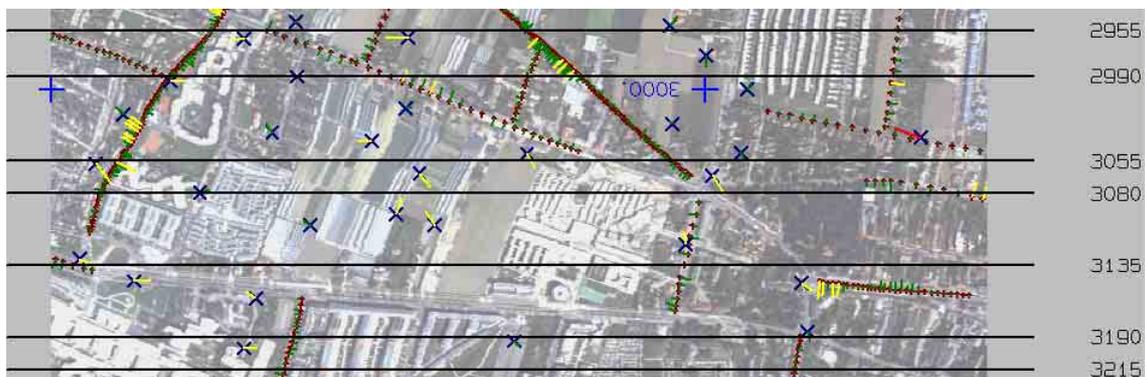


Abb. 8-29: „Ref-50scan“-Problembereich-Variante 4: Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich um 3100: Residuenplot in der Scanneraufnahme, die durchgezogenen Linien repräsentieren Scans mit einem aktivierten Knotenpunkt in der Orientierungsfunktion. Vergrößerungsfaktor der Vektoren ist gleich 10, rote Vektoren > 1.75 Pixel, 1.75 Pixel  $\geq$  gelbe Vektoren > 0.9 Pixel, grüne Vektoren  $\leq$  0.9 Pixel.

Zur Prüfung des Ergebnisses im Problembereich am rechten Streifenrand ist der Residuenplot aufgrund fehlender Passinformation in diesem Bereich nicht geeignet. Das Ergebnis kann in diesem Fall nur im Orthophoto kontrolliert werden. Variante 1 und 2 zeigen keinen wesentlichen Unterschied zu dem am Ende des Abschnitts 8.3.1.4 in Abb. 8-28 gezeigten

Ergebnisses (auf eine eigene Abbildung wurde daher verzichtet). Es sind also in Variante 1 und 2 nach wie vor massive Versetzungen quer zur Flugrichtung enthalten, was auf Probleme bei der korrekten Bestimmung des Rollwinkels oder/und der Flughöhe hinweist. Offensichtlich ist in diesem Bereich die fiktive Rollwinkelbeobachtung  $\text{Roll} = 0$  nicht die optimale Lösung.

Abb. 8-30 zeigt die zu Variante 3 und 4 zugehörigen Orthophotoausschnitte jeweils nur vom (problemreicheren) rechten Streifenrand. Bei diesen beiden Varianten wurden die ATM-Roll-Beobachtungen verwendet; in diesem Problembereich passen diese Beobachtungen offenbar besser zum tatsächlichen Flugverlauf als die fiktiven Nullbeobachtungen. Variante 3 mit den gleichabständigen Knotenpunkten zeigt schon ein recht brauchbares Ergebnis. Lediglich eine leichte Verschiebung in Flugrichtung kann bei genauer Betrachtung noch entdeckt werden. Variante 4 schließlich zeigt das für diesen Problembereich beste erreichte Ergebnis, in dem im betrachteten Orthophotoausschnitt praktisch keine Versetzungen mehr erkennbar sind.



Abb. 8-30: „Ref-50scan“-Problembereich - Variante 3 (links) und 4 (rechts):  
Messflug 1997, Streifen 7, Scanbereich um 3100: Orthophotoausschnitte vom rechten Streifenrand mit überlagerter MZK; der Pfeil deutet eine Rest-Problemstelle im Orthophoto und die Richtung der Versetzungen an.

Es wären hierzu noch einige Untersuchungen zu den ATM-Stellungsbeobachtungen denkbar (z. B. Entwicklung von „flexiblen“ Gewichtungsmethoden für ATM-Stellungsbeobachtungen entlang eines Flugstreifens), jedoch in Hinblick darauf, dass diese Systemkonfiguration nur eine momentane Zwischenlösung bis zum damals schon absehbaren standardmäßigen Einsatz von integrierten GPS/INS-Systemen darstellte, wurden keine weiteren Untersuchungen durchgeführt.

### 8.3.3 Zusammenfassung der Bearbeitung des Messfluges 1997

Die beiden Abschnitte 8.3.1 und 8.3.2 haben gezeigt, dass die indirekte Sensororientierung von Flugzeugscanneraufnahmen ohne direkte bzw. mit direkten Beobachtungen von Teilmengen der Orientierungsparameter entlang der Flugbahn möglich ist. Voraussetzung dafür ist jedoch, dass genügend und gut verteilte Passinformationen für jeden (!) notwendigen Knotenpunkt verfügbar sind. Pro Knotenpunkt sind mindestens drei Passpunkte oder entsprechende Linieninformationen erforderlich.

Direkte Beobachtungen zumindest von Teilmengen der sechs Orientierungsparameter können in der Ausgleichung in ORIENT als Beobachtungen der Knotenpunkte der Orientierungsfunktionen eingeführt werden. Bei entsprechender Genauigkeit dieser Beobachtungen ist eine Einsparung an minimal notwendigen Passinformationen je Knotenpunktintervall möglich. Die direkten Messdaten für Roll, Pitch und Yaw des Messfluges 1997 waren jedoch für nähere, praktische Untersuchungen diesbezüglich nicht gut genug.

Die Knotenpunktverteilung in der Orientierungsfunktion eines Flugstreifens kann ohne Informationen aus direkten Messdaten nur in einem iterativen Prozess gefunden werden, indem mit einer gleichmäßigen Verteilung und relativ großen Knotenpunktabständen begonnen wird und bei Bedarf einzelne Knotenpunktintervalle verdichtet werden. Eine Optimierung an den tatsächlichen Flugverlauf ist in diesem Fall nicht möglich, nur die Verteilung der verfügbaren (Boden-) Passinformationen kann berücksichtigt werden. Wenn von den Stellungsparametern Roll, Pitch, Yaw reale Messdaten vorhanden sind, dann können diese Informationen für die Optimierung der Knotenverteilung genutzt werden.

In der Praxis kann es selbst im Stadtgebiet schwer sein, genügend Passpunkte zur Bestimmung der Orientierungsfunktionen von Scanneraufnahmen bereit zu stellen. Passlinien können Passpunkte sehr gut ergänzen. Bei Linien ist jedoch zu beachten, dass Linien nur senkrecht zum Linienverlauf wirken und Linienpunkte in Linienrichtung nicht gut bestimmt sind. Daher kann eine Passlinie einen Passpunkt nicht vollständig ersetzen (außer es handelt sich um eine Kurve mit entsprechend vielen signifikanten Tangenten). Weiters ist der Linienverlauf aller verfügbaren Passlinien mit zu berücksichtigen, um zu erkennen, ob für die Bestimmung des jeweiligen Knotenpunktes genügend Passinformationen (Punkte und Linien) vorhanden sind. Z. B. tragen näherungsweise parallel zur Flugrichtung verlaufende Linien nur zur Bestimmung von Roll, der Verschiebung quer zur Flugrichtung und der Flughöhe bei, aber kaum zu den anderen Orientierungselementen. Im Gegenzug dazu tragen näherungsweise senkrecht zur Flugrichtung verlaufende Linien nur wenig zur Bestimmung der Verschiebung quer zur Flugrichtung, der Flughöhe und von Roll bei. Näherungsweise  $45^\circ$  zur Flugrichtung verlaufende Linien (am besten paarweise, eine Linie  $+45^\circ$  und eine zweite Linie  $-45^\circ$  gegenüber der Flugrichtung verlaufend) bringen sicherlich die beste Stützung in der Ausgleichung.

Als sehr positiv bei den Linien ist hervorzuheben, dass durch die mögliche hohe Dichte der gemessenen Linienpunkte (Punktabstand nur wenige Pixel) die Redundanz und Zuverlässigkeit der Bestimmung der jeweiligen, durch die Linie bestimmbaren Orientierungsparameter stark erhöht wird. Vollständiges Ersetzen von Punkten durch Linien wäre aber nur durch ein den Knotenpunktabständen entsprechend dichtes Netz an in verschiedene Richtungen verlaufenden Linien möglich, was in der Praxis sicher nur sehr schwer zu erreichen ist.

Hinsichtlich der praktischen Durchführung der Punkt- bzw. Linienmessung und Handhabung in der Ausgleichung sind folgende Aspekte anzuführen: Punkte sind unkompliziert, sie sind einfach zu messen, und man benötigt keine spezielle Software für die Messung oder zur Ausgleichung. Aber bei größerer Pixelgröße (im aktuellen Anwendungsbeispiel  $3 \times 3 \text{ m}^2$ ) sind gut definierte Punkte in großer Anzahl häufig nicht einfach zu finden (vor allem in ländlichen Gebieten). Die Linienmessung ist zweifellos aufwendiger sowohl bei der Messung als auch bei der Handhabung in der Ausgleichung. Die manuelle Linienmessung erfordert viele Einzelpunktmessungen, zur semi-automatischen Linienmessung ist eine spezielle Software notwendig. Dafür sind Linien bei der Interpretation einfacher als Punkte, z. B. eine Ackergrenze oder die Mitte eines Weges ist auch bei größeren Pixelgrößen gut identifizierbar und messbar. Bevor Passlinien zur Ausgleichung der Orientierungsfunktionen verwendet werden können, müssen die Formparameter der Passlinien in einer eigenen Vorausgleichung bestimmt werden.

In Summe ist keine Aussage möglich, ob Punkte oder Linien (polynomiale Kurven oder 3D-Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen) „besser geeignet“ sind; beide Kategorien von Passinformationen haben Vor- und Nachteile. In der Praxis wird bei einer indirekten Sensororientierung von Flugzeugscanneraufnahmen sehr wahrscheinlich nur die Kombination von Punkten und Linien die Möglichkeit bieten, flächendeckend genügend Passinformationen bereitzustellen.

Stehen in einem Knotenpunktintervall nicht genügend (direkte oder indirekte) Passinformationen zur Verfügung, muss in diesem Bereich mit Qualitätseinbußen im Orthophoto gerechnet werden. Oder anders ausgedrückt, von der Qualität in einem Knotenpunktintervall kann nicht automatisch auf die Qualität in einem anderen Intervall geschlossen werden. Dies bedeutet für die Qualitätskontrolle, dass eine flächendeckende Kontrolle notwendig ist und etwaige „Stichprobenkontrollen“ nicht ausreichend sind.

Die indirekte Sensororientierung von Flugzeugscanneraufnahmen ist somit zwar grundsätzlich möglich, aber durch einen extrem hohen Aufwand an flächendeckenden, gut verteilten Passinformationen gekennzeichnet. In der Regel ist durch die inzwischen standardmäßig eingesetzten GPS/INS-Systeme die indirekte Sensororientierung für aktuelle Datensätze nicht mehr notwendig. In seltenen Spezialfällen kann eine indirekte Sensororientierung auch für aktuelle Datensätze noch von Interesse sein, z. B. im Fall von GPS/INS-(Teil-)Systemausfällen während des Flugeinsatzes und gleichzeitiger Unmöglichkeit der Flugwiederholung (Aufnahme eines kurzzeitigen Phänomens). Ein heutzutage wahrscheinlicheres Einsatzgebiet der indirekten Sensororientierung ist deren Anwendung bei historisch wertvollen Flugzeugscanneraufnahmen, die noch ohne GPS/INS-Systeme aufgenommen wurden, und nun z. B. für Zeitreihen nutzbar gemacht werden sollen.

Abb. 8-31 zeigt zum Abschluss dieses Abschnitts einen Übersichtsplot der mittels indirekter Sensororientierung georeferenzierten ATM-Aufnahmen des Messfluges 1997.

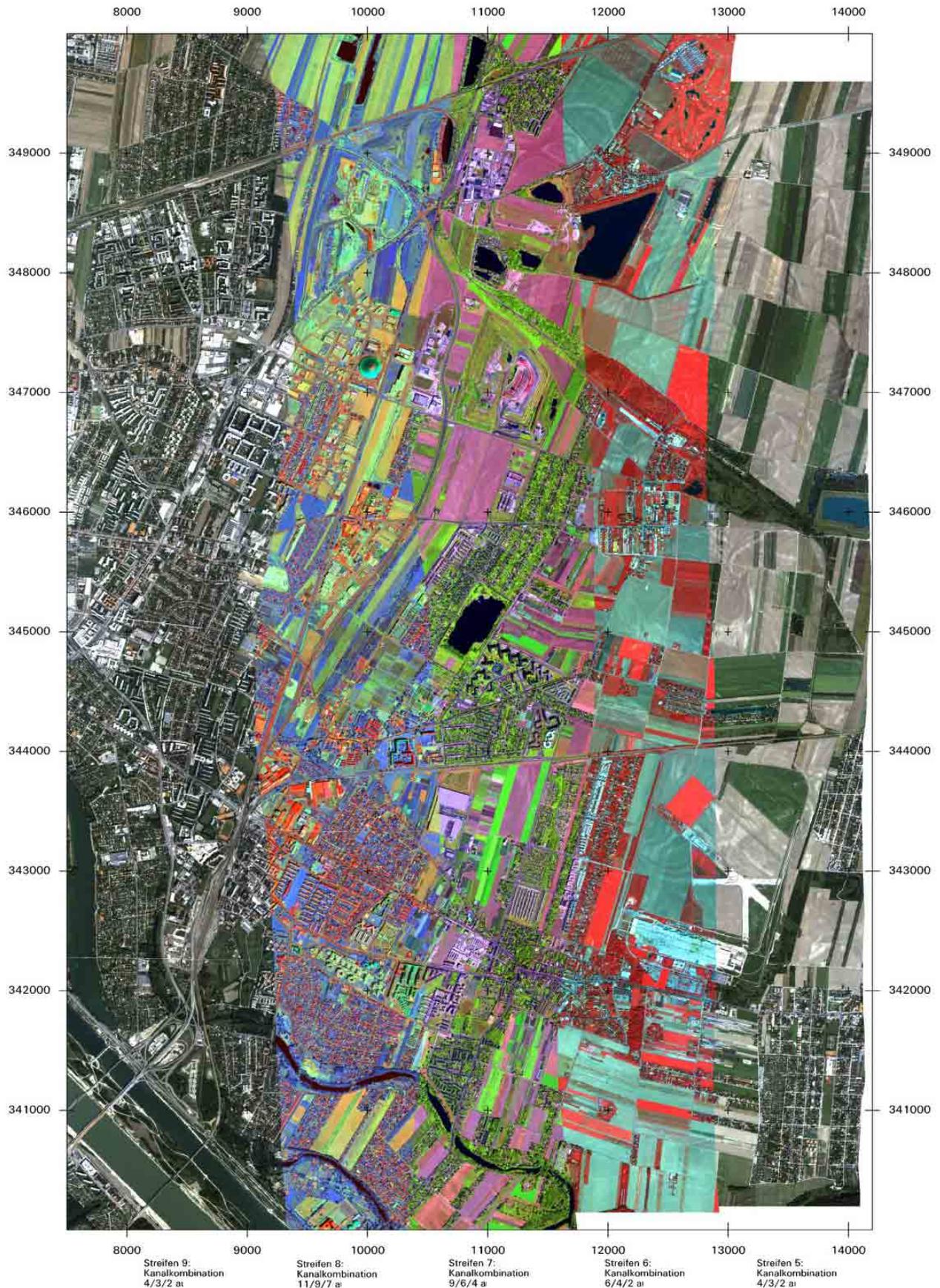


Abb. 8-31: Übersichtsplot der georeferenzierten Flugzeugscanneraufnahmen in verschiedenen Kanalkombinationen des Messfluges 1997. Die jeweiligen westlicheren Flugstreifen überlappen die östlicheren Nachbarstreifen.

## 8.4 Georeferenzierung des Messfluges 2000 – integrierte Sensororientierung

Beim Messflug 2000 wurde der ATM gemeinsam mit einem GPS/INS-System eingesetzt, was eine enorme Erleichterung für die Aufgabe der Georeferenzierung darstellt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der gesamte Datensatz von Wien mit insgesamt 24 Flugstreifen bearbeitet. Je nach Qualität der registrierten und prozessierten GPS/INS-Beobachtungen können verschiedene Strategien der Georeferenzierung mit jeweils steigenden Aufwand notwendig sein: Im günstigsten Fall kann eine sofortige Nutzung der GPS/INS-Beobachtungen in einer direkten Georeferenzierung erfolgen, oder es wird eine integrierte Sensororientierung mit einfacher Datumsbestimmung für den gesamten Block bzw. für jeden Flugstreifen durchgeführt, oder in ungünstigeren Fällen kann eine integrierte Sensororientierung mit verfeinerter Driftmodellierung für jeden Flugstreifen oder sogar Teilen von Flugstreifen notwendig sein. Wie sich bei der Bearbeitung des Messfluges 2000 herausstellte, war eine integrierte Sensororientierung mit verfeinerter Driftmodellierung für etwa 50% der Flugstreifen notwendig.

Bei der direkten Sensororientierung besteht das Risiko eventueller Datumsprobleme in den GPS/INS-Beobachtungen, welche erst im Orthophoto mittels entsprechender Kontrollinformation aufgedeckt werden können. Da beim Messflug 2000 die Transformation der GPS/INS-Positionen vom Bezugssystem WGS84 ins österreichische System GK-M34 mit österreichweiten mittleren Parametern durchgeführt wurde, ist von vorneherein zu erwarten, dass eine direkte Sensororientierung nicht die gewünschte Genauigkeit liefert und zumindest noch Datumsverschiebungen im Orthophoto enthalten sind. Es wurde zwar trotzdem versuchsweise eine direkte Sensororientierung durchgeführt, der Schwerpunkt in diesem Abschnitt liegt aber in der Diskussion der integrierten Sensororientierung dieses Datensatzes.

Zur Datumskorrektur wurden mit Hilfe der GPS/INS-Beobachtungen Streifen-GPS/INS-Modelle für alle Flugstreifen definiert, also in sich starre Beobachtungsmodelle für die Orientierungsfunktionen der Flugstreifen (vgl. Abschnitt 6.7.2.1). In einem ersten Schritt wurden die Streifen-GPS/INS-Modelle zu einem Modell für den gesamten Flugblock zusammengefasst, und es wurde eine Datumskorrektur für dieses Block-GPS/INS-Modell bestimmt. Da die Georeferenzierung nicht zufriedenstellende Ergebnisse lieferte, wurden in einem nächsten Schritt Datumskorrekturen für jedes einzelne Streifen-GPS/INS-Modell bestimmt. Es stellte sich heraus, dass auch dieser einfache Fall keine zufriedenstellenden Genauigkeiten im Orthophoto lieferte. Bei der Kontrolle der Orthophotos wiesen einige Flugstreifen eine homogene und ausgezeichnete Qualität von Restklaffungen im Orthophoto von <1 Pixel auf, während in anderen Flugstreifen in bestimmten Bereichen deutlich systematische Restklaffungen von bis zu 4-5 Pixel festgestellt wurden. Die Klassifizierung der insgesamt 24 Flugstreifen des Blockes in „Gut-Streifen“ und „Problemstreifen“ ergab fast 50% Problemstreifen. Als Ursache für dieses unterschiedliche Verhalten der Restklaffungen in den Orthophotos konnten nur „Inhomogenitäten“ oder „Driftphänomene“ innerhalb der GPS/INS-Beobachtungen angenommen werden, wie in Abschnitt 8.4.1 anhand der in Abb. 8-32 dargestellten Diagramme der GPS/INS-Beobachtungen noch näher erläutert wird.

Zur Korrektur (oder zumindest zur Dämpfung) dieser Driftphänomene wurden mehrere Strategien getestet (vgl. auch Abschnitt 6.7.2.1):

1. Bestimmung von Korrekturpolynomen für die Streifen-GPS/INS-Modelle der betroffenen Flugstreifen
2. Unterteilen der Streifen-GPS/INS-Modelle in mehrere Teilmodelle und Bestimmung von Korrekturpolynomen für alle Teilmodelle
3. In Ergänzung zu 1. und 2. wurde der Einsatz von DGM-Höhenpasspunkten zur Reduktion der zur Bestimmung der Korrekturpolynome notwendigen Vollpasspunkte getestet.

In den folgenden Abschnitten 8.4.1 und 8.4.2 werden anhand von zwei Teilblöcken zu jeweils drei Flugstreifen die Ergebnisse der unterschiedlichen Strategien diskutiert.

Für die a priori Genauigkeiten der Beobachtungen in der Ausgleichung wurden folgende, in Tab. 8-5 zusammengefasste Annahmen getroffen:

Genauigkeit Bildkoordinaten $sig_{x,y}$	$\pm 0.33$ Pixel
Genauigkeit Passpunkte in Lage $sig_{PP-X,PP-Y}$	$\pm 1.0$ m
Genauigkeit Passpunkte in Höhe $sig_{PP-Z}$	$\pm 1.5$ m
Genauigkeit GPS/INS-Roll und Pitch $sig_{ro,pi}$	$\pm 0.005$ gon
Genauigkeit GPS/INS-Yaw $sig_{ya}$	$\pm 0.05$ gon
Genauigkeit GPS/INS-Positionen $sig_{X,Y,Z}$	$\pm 0.1$ m
Mittlerer Gewichtseinheitsfehler $sig_0$ a priori bezogen auf Bildkoordinaten	$\pm 0.33$ Pixel

Tab. 8-5: Annahmen für a priori Genauigkeiten

Die Bildkoordinatenmessungen und die Passpunktkoordinaten sind in etwa gleich gewichtet. Die Genauigkeiten für die GPS/INS-Beobachtungen sind relativ genau angenommen; dies bringt zum Ausdruck, dass die relative Genauigkeit als sehr hoch angesehen wird. Die GPS/INS-Beobachtungen definieren so ein quasi starres Modell, das mit Hilfe von Passinformationen noch absolut einzupassen ist (Verschiebung, Drehung und Driftmodellierung erfolgt über die zusätzlichen Korrekturpolynome im Rahmen der Ausgleichung). Darüber hinaus wurden bei den Streifen-GPS/INS-Modellen wegen der hohen Korrelation von Roll und Pitch mit der Verschiebung quer bzw. in Flugrichtung für die Korrekturpolynomterme der Ordnung Null für Roll und Pitch fiktive Beobachtungen gleich Null und einer Genauigkeit von  $\pm 0.05$  gon eingeführt. Bei Ansetzen eines Block-GPS/INS-Modells ist diese hohe Korrelation nicht mehr gegeben (streifenweise abwechselnde Flugrichtung Nord→Süd und Süd→Nord), und damit sind in diesem Fall auch die zusätzlichen fiktiven Beobachtungen nicht notwendig.

Die GPS/INS-Beobachtungen dienen (in der zur Zeit der Projektbearbeitung verfügbaren Implementierung in ORIENT<sup>1</sup>) als direkte Beobachtungen der Knotenpunkte der Orientierungsfunktionen der Flugstreifen. Die Frequenz der GPS/INS-Beobachtungen ist mit 50 Hz doppelt so hoch wie die Aufnahmefrequenz des ATM mit 25 Hz. Somit sind sogar zwei GPS/INS-Beobachtungen pro Scan verfügbar. Da so viele Knotenpunkte die Normalgleichungsmatrix stark vergrößern und demzufolge die Rechenzeit sehr erhöhen würden, wurde die Anzahl der Knotenpunkte reduziert. Dabei soll der Knotenpunktstand einerseits möglichst groß sein, um Rechenzeit einzusparen, aber er muss andererseits klein

<sup>1</sup> Diesbezüglich gibt es inzwischen schon Weiterentwicklungen in ORIENT.

genug sein, um keine wesentliche Information der GPS/INS-Beobachtungen zu verlieren. In einem Kompromiss aus diesen beiden Aspekten wurde der Knotenpunktabstand auf 10 Scans gesetzt.

### 8.4.1 Ergebnisse des Teilblocks aus Streifen 11, 12, 13

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse verschiedener Varianten des Teilblocks aus den Flugstreifen 11, 12 und 13 (im folgenden kurz als S11, S12 und S13 bezeichnet) gezeigt. Die Flugstreifen S11 und S13 konnten bei der streifenweisen Einpassung mit Streifen-GPS/INS-Modellen als Gut-Streifen (Orthophoto-Restklaffungen  $<1$  Pixel) klassifiziert werden, wogegen der Streifen S12 als Problemstreifen mit deutlichen Restklaffungen im Orthophoto klassifiziert werden musste.

Abb. 8-32 zeigt Diagramme der GPS/INS-Beobachtungen (Positions- und Stellungsbeobachtungen) der Streifen S11, S12 und S13. Während bei den Stellungsbeobachtungen und den Positionsbeobachtungen längs und quer der Flugrichtung nichts auffälliges bemerkt werden kann, ist eine nähere Betrachtung der Diagrammkurven für die Z-Beobachtungen interessant. Die Z-Beobachtungen des Problemstreifens S12 weichen vom Mittelwert in der Größenordnung von  $\pm 20$  m ab, während bei den anderen Flugstreifen nur eine maximale Abweichung von  $\pm 5$  m in der Höhenkomponente zu sehen ist. Ein ähnliches auffälliges Verhalten der Z-Beobachtungen trat bei allen Problemstreifen auf, wie z. B. auch in den Diagrammen für den zweiten, in Abschnitt 8.4.2 detailliert diskutierten Problemstreifen S17 in Abb. 8-40 ersichtlich ist.

Die Flughöhe kann während der Streifenaufnahme üblicherweise sehr gut auf wenige Meter konstant gehalten werden, größere Abweichungen von der mittleren Flughöhe und plötzliche „Knicke“, wie sie bei S17 in Abb. 8-40 ersichtlich sind, sind nicht plausibel. Weiters gestützt auf die Erkenntnis, dass genau die Orthophotos der Streifen mit den auffälligen Z-Beobachtungen eine mangelhafte Qualität aufweisen, muss auf Unstimmigkeiten bzw. "Driftphänomene"<sup>1</sup> in den GPS/INS-Beobachtungen geschlossen werden.

Die genaue Ursache für diese Driftphänomene in den GPS/INS-Beobachtungen konnte nicht herausgefunden werden. Auch die GPS/INS-Prozessierung gab nach Auskunft der flugausführenden Stelle keinen Hinweis auf Problemstreifen. Da ca. 50% der Flugstreifen in Ordnung waren, ist ein grundsätzlicher Systemdesignfehler oder gänzlich Versagen einer Systemkomponente auszuschließen. Eine mögliche Erklärung könnte sein, dass während der Aufnahme der Problemstreifen Signalunterbrechungen aufgetreten sind, die während der Prozessierung nicht aufgefallen sind. Eine neuerliche, verfeinerte GPS/INS-Prozessierung unter Einbeziehung von GPS-Bodenreferenzstationen war leider nachträglich nicht mehr möglich. Somit mussten die aufgetretenen Driftphänomene mit entsprechenden Strategien im Rahmen einer integrierten Sensororientierung modelliert und korrigiert bzw. zumindest gedämpft werden.

---

<sup>1</sup> Die Bezeichnung „Drift“ ist zur Beschreibung des gezeigten Verhaltens nicht sehr gut geeignet. Um dies auszudrücken und in Ermangelung eines passenderen Ausdrucks wird dieses Verhalten als „Driftphänomen“ bezeichnet.

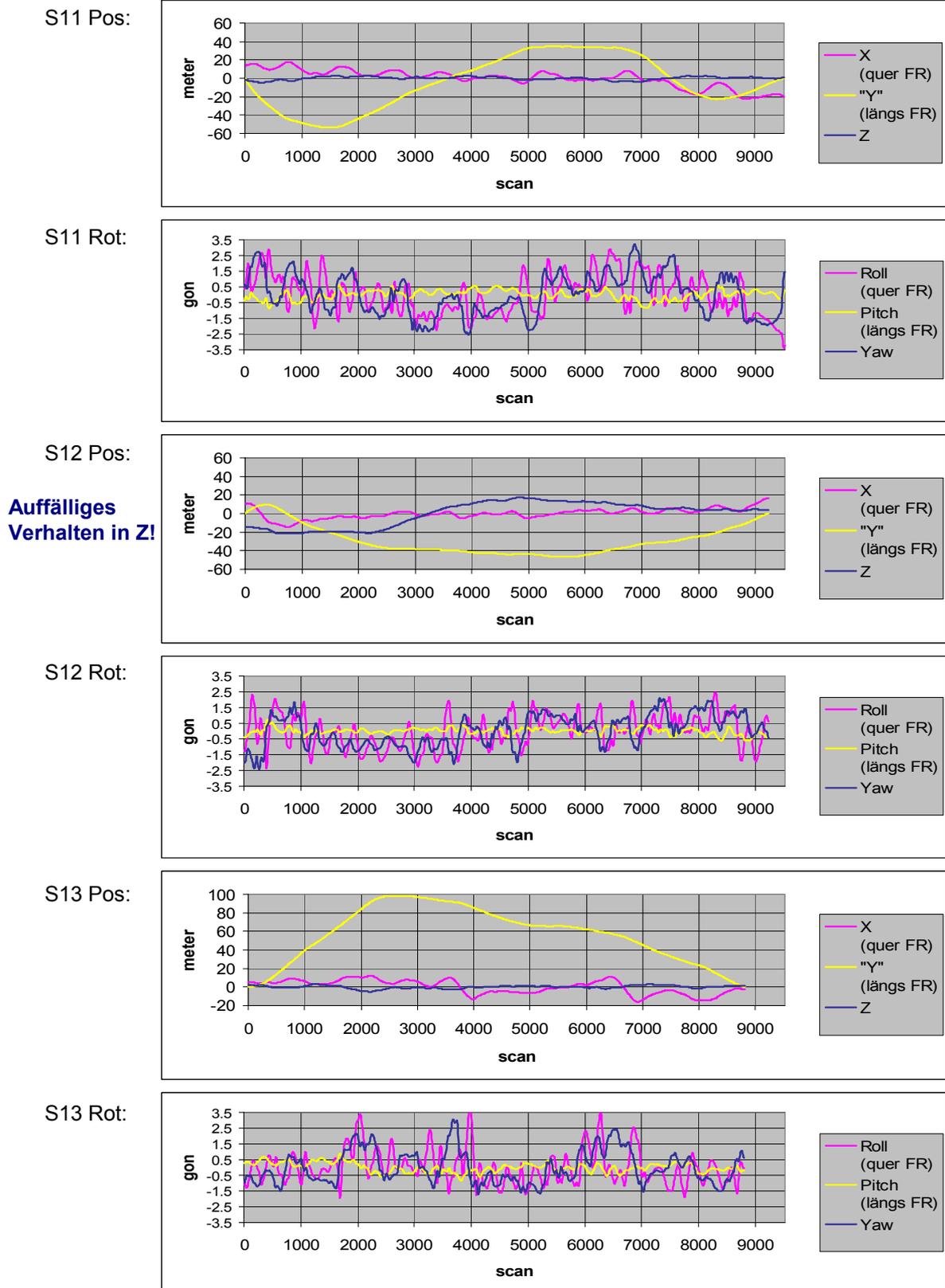


Abb. 8-32: Diagramme der GPS/INS-Daten der Flugstreifen S11, S12 und S13 des Messfluges Wien 2000: **Pos**: GPS/INS-Positionen / **Rot** (Rotationen): GPS/INS-Stellungsbeobachtungen / **FR**: Flugrichtung / **X, Z, Roll, Pitch, Yaw**: reduziert um den jeweiligen Mittelwert / **"Y"**: Abweichung von der gleichförmigen Bewegung in Flugrichtung

Die ATM-Aufnahmen des Teilblockes S13-S12-S11 (Streifenanordnung von West nach Ost) bestehen jeweils aus ca. 9000 Scans. In jedem Flugstreifen wurden ca. 80-90 gleichmäßig verteilte Passpunkte bestimmt. Entlang des Überlappungsbereichs jeweils benachbarter Flugstreifen befinden sich durchschnittlich 60 Verknüpfungspunkte, von denen in diesem Bereich die meisten auf der Geländeoberfläche liegen. Abb. 8-33 zeigt die vorhandenen Pass- und Verknüpfungspunkte in der südlichen Hälfte (ca. 4000 Scans) der drei Streifen des Teilblockes. Jene Passpunkte, die bei verschiedenen Varianten in der Ausgleichung nicht zur Bestimmung der Unbekannten teilnahmen, wurden als Kontrollpunkte verwendet.

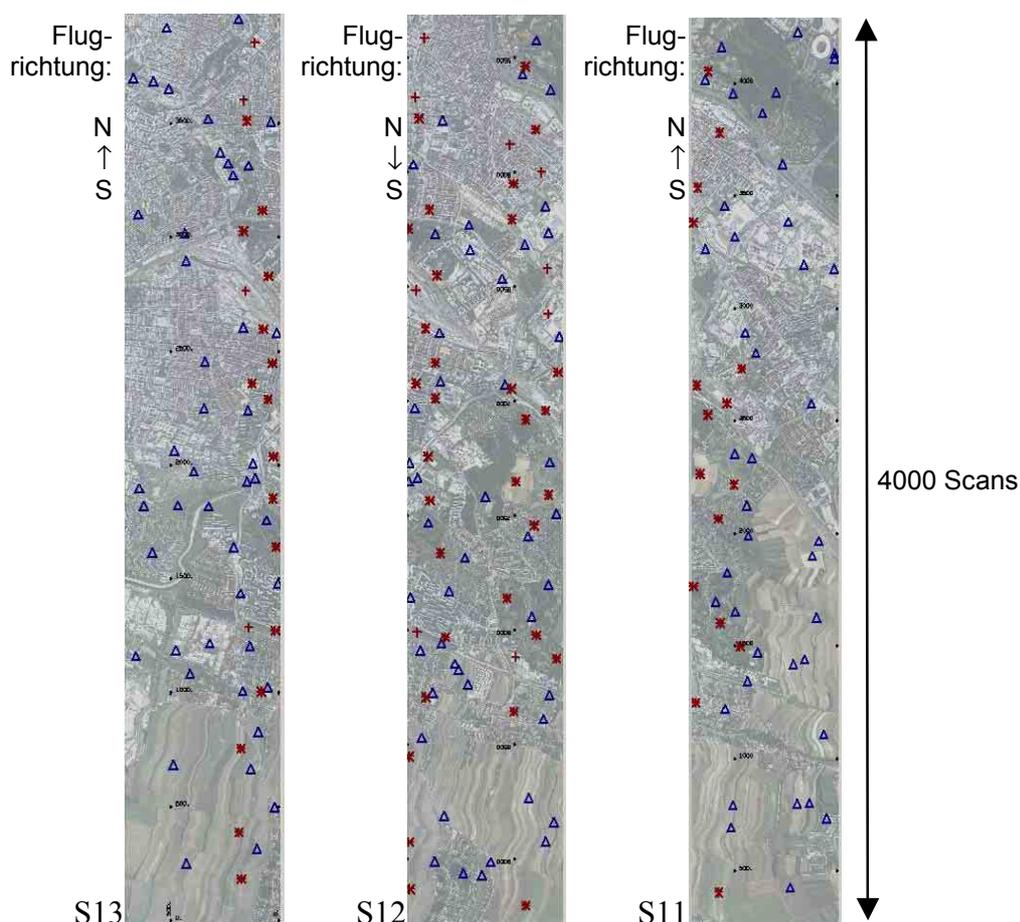


Abb. 8-33: Ausschnitt von ca. 4000 Scans am südlichen Streifenende von Streifen S13, S12 und S11 des Messfluges 2000 mit verfügbaren Passpunkten ( $\Delta$ ) und Verknüpfungspunkten, die auf der Geländeoberfläche liegen (\*) bzw. nicht auf der Geländeoberfläche liegen (+).

In Tab. 8-6 sind die Ergebnisse verschiedener Varianten der Sensororientierung des Teilblockes S13-S12-S11 mit dem mittleren Gewichtseinheitsfehler a posteriori ( $\sigma_0$ ) und den mittleren Diskrepanzen im jeweiligen Scannerstreifen (rms in Pixel) an den nicht in der Ausgleichung beteiligten Kontrollpunkten zusammengefasst.

Variante DS – "Direkte Sensororientierung":

Die großen mittleren Diskrepanzen bestätigen, dass die GPS/INS-Daten im Falle des Messfluges 2000 auf jeden Fall noch einer Datumskorrektur bedürfen. Dies war aufgrund der groben Transformationsparameter vom WGS84 in das österreichische System GK-M34 zu erwarten. In Anbetracht der groben Transformation ist ein direkter Vergleich mit den anderen Varianten nicht sinnvoll; daher wird diese Zeile in Tab. 8-6 etwas gedämpft dargestellt.

						Streifen 13					Streifen 12					Streifen 11				
Variante	PP	G	HP	$\sigma_0$	% $\sigma_0$	Anz	rms l	rms q	% l	% q	Anz	rms l	rms q	% l	% q	Anz	rms l	rms q	% l	% q
DS						81	3.10	3.34	556	500	90	6.11	5.90	901	284	83	3.61	3.53	683	549
BlockE	2b	0		0.47	103	65	0.72	0.86	130	129	76	0.67	1.63	99	78	71	0.47	1.02	88	159
<b>StrE</b>	<b>2b</b>	<b>0</b>		<b>0.45</b>	<b>100</b>	<b>65</b>	<b>0.56</b>	<b>0.67</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>76</b>	<b>0.68</b>	<b>2.08</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>71</b>	<b>0.53</b>	<b>0.64</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
StrE-P1	2b	4	ja	0.30	66	65	0.55	0.69	99	103	76	0.51	0.81	76	39	71	0.54	0.65	103	102
StrE-P2	4b	4	ja	0.30	66	55	0.56	0.62	101	93	68	0.47	0.76	70	37	63	0.51	0.65	97	101
StrE-P3	4b	4		0.27	59	55	0.56	0.61	101	91	68	0.48	1.03	70	50	63	0.52	0.67	98	105
StrE-S1	2b	2	ja	0.27	60	65	0.55	0.66	99	99	76	0.51	0.68	75	33	71	0.55	0.65	103	101
StrE-S2	4b	2	ja	0.27	60	55	0.56	0.60	101	90	68	0.47	0.63	69	30	63	0.51	0.65	97	101
StrE-S3	4b	2		0.26	58	55	0.56	0.60	100	90	68	0.47	0.66	69	32	63	0.51	0.68	97	105
StrE-Pall	all	4	ja	0.31	68	81	0.45	0.53	81	79	90	0.40	0.65	60	31	83	0.39	0.58	75	90
StrE-Sall	all	2	ja	0.29	64	81	0.45	0.53	81	79	90	0.39	0.52	58	25	83	0.39	0.58	75	90

Tab. 8-6: Vergleich verschiedener Varianten der Sensororientierung des Teilblocks bestehend aus S13, S12 und S11 des Messfluges Wien 2000: **Variante**: Kurzbezeichnung der Variante / **PP**: Passpunktconfiguration: **2b** - Zwei "Bänder" von Passpunkten am südlichen und nördlichen Streifenende, insgesamt 32 Passpunkte; **4b** – wie 2b plus zwei weitere "Bänder" von Passpunkten im Bereich der "Bruchstellen" der GPS/IMU-Daten in S12, insgesamt 50 Passpunkte; **all** – alle verfügbaren Passpunkte nehmen in der Ausgleichung teil / **G**: maximaler Grad der Korrekturpolynome / **HP**: für Verknüpfungspunkte, die auf der Geländeoberfläche liegen, nimmt die aus dem Geländemodell ermittelte Geländehöhe als Höhenpassinformation in der Ausgleichung teil (ja) bzw. nicht teil (kein Eintrag) /  **$\sigma_0$** : mittlerer Gewichtseinheitsfehler a posteriori / **Anz**: Anzahl der Kontrollpunkte im Streifen bzw. bei Varianten StrE-Pall und StrE-Sall die Anzahl der Passpunkte / **rms**: mittlere Diskrepanzen an den Kontrollpunkten in Pixel (für StrE-Pall und StrE-Sall: mittlere Diskrepanzen an den Passpunkten) / **l**: längs Flugrichtung / **q**: quer zur Flugrichtung

Variante BlockE – "BlockEinpassung":

Ein GPS/INS-Modell für den gesamten Block wird über zwei Passpunktbander, je eines am nördlichen und südlichen Streifenende, und unter der Verwendung der vorhandenen Verknüpfungspunkte eingepasst. Die mittleren Diskrepanzen quer zur Flugrichtung für den Problemstreifen S12 sind vor allem quer zur Flugrichtung deutlich schlechter als bei den benachbarten „Gut-Streifen“ S13 und S11. Aber auch bei den Gut-Streifen entsprechen die mittleren Diskrepanzen in den Kontrollpunkten noch nicht den Erwartungen, die in Anlehnung an die a priori Genauigkeitsannahmen in der Größenordnung von etwas unter einem halben Pixel liegen. Vor allem die mittlere Diskrepanz in S11 quer zur Flugrichtung rms-q = 1 Pixel erscheint noch zu hoch.

Variante StrE – "StreifenEinpassung" (100%-Referenz):

In dieser Variante ist für jeden Streifen ein eigenes GPS/INS-Modell definiert, welches über zwei Passpunktbander am nördlichen und südlichen Streifenende und unter Verwendung der vorhandenen Verknüpfungspunkte eingepasst wird. S13 und S11 weisen nun eine sehr gute und bei beiden Streifen ähnliche Genauigkeit auf. S12 tritt in dieser Variante noch deutlicher

als Problemstreifen hervor, die mittleren Diskrepanzen quer zur Flugrichtung sind um den Faktor 3 schlechter als bei den benachbarten Gut-Streifen. Die Diskrepanzenvektoren von S12 (siehe Abb. 8-34) geben deutliche Hinweise auf Probleme in der Z-Komponente des GPS/INS-Modells für S12, da die Vektoren sowohl am westlichen als auch am östlichen Streifenrand zur Streifenmitte weisen (vgl. Wirkungsfigur in Abb. 7-6). Die Diskrepanzenvektoren der Gut-Streifen S13 und S11 zeigen dagegen ein zufälliges Verhalten, und die Beträge dieser Diskrepanzenvektoren sind im Mittel bei etwa einem halben Pixel.

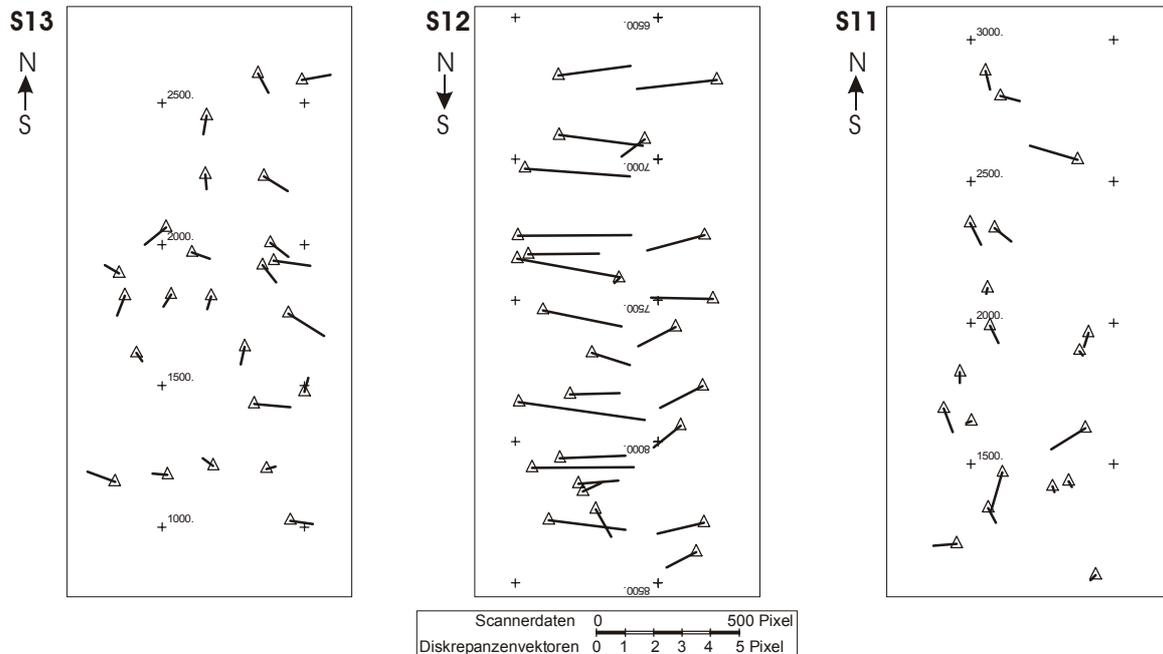


Abb. 8-34: Variante **StrE**: Diskrepanzenvektoren (in Pixel) der Kontrollpunkte in S13-S12-S11 im südlichen Bereich des Teilblockes (Scan-Bereich von S12: Scan 6500-Scan 8500).

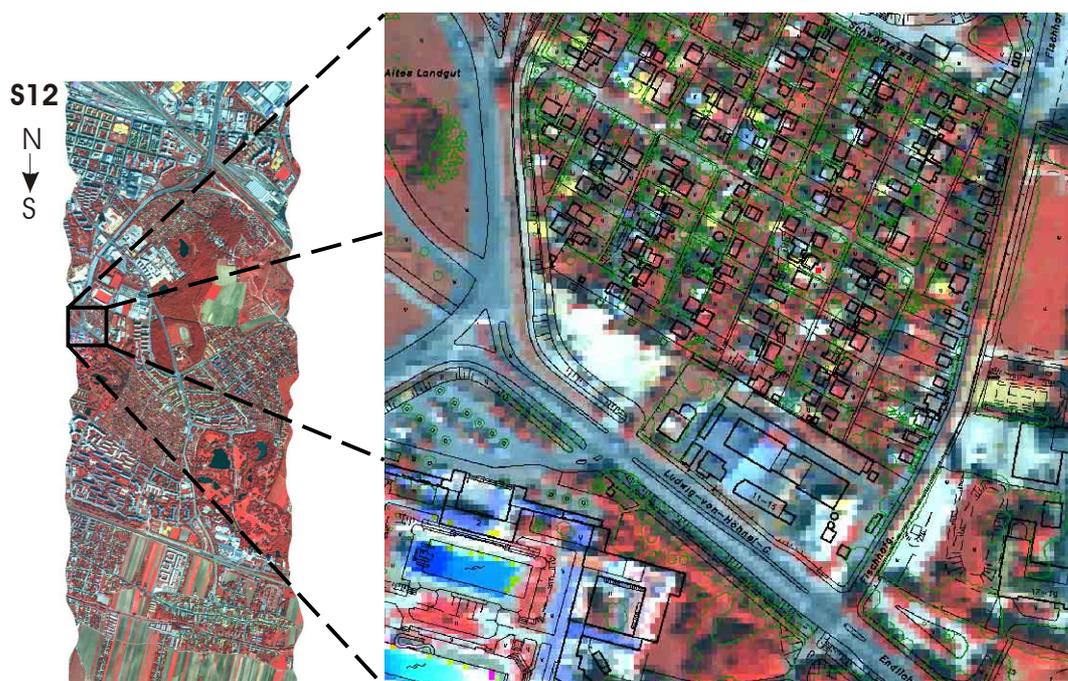


Abb. 8-35: Variante **StrE** - Orthophotoausschnitt aus S12: Scan-Bereich von Scan 6500 bis 8500 (links); Detailausschnitt überlagert mit MZK (rechts).

Abb. 8-35 zeigt den zugehörigen Orthophotoausschnitt aus S12 und einen Detailausschnitt überlagert mit den Referenzdaten der MZK; es sind deutlich Abweichungen von einigen Pixeln zu erkennen. Die Orthophotos von S11 und S13 beinhalten keine groben Abweichungen.

Varianten StrE-P1/P2/P3 – "StreifenEinpassung mit Korrekturpolynom für das GPS/INS-Modell von S12":

In diesen Varianten ist wie bei der Variante StrE für jeden Streifen ein eigenes GPS/INS-Modell definiert. Zur Korrektur der Driftphänomene bei S12 wird ein Korrekturpolynom entlang des gesamten Streifens angesetzt. Bei der ersten Variante wurde sukzessive der Grad des Korrekturpolynoms bis zum Grad vier gesteigert, bis eine bestmöglich Korrektur der Driftphänomene erreicht werden konnte. Eine weitere Erhöhung des Polynomgrades zeigte keine zusätzlichen Verbesserungen. Für die anderen Varianten wurde der Polynomgrad übernommen, um einen direkten Vergleich der Varianten zu ermöglichen. Die Varianten P1, P2 und P3 unterscheiden sich hinsichtlich der verwendeten Anzahl und Anordnung der Passpunkte und hinsichtlich der Verwendung der Verknüpfungspunkte auf der Geländeoberfläche als DGM-Höhenpasspunkte.

So wurden bei Variante StrE-P1 nur zwei Passpunktbänder am südlichen und nördlichen Blockrand zur Einpassung verwendet. Da aber klarerweise zur Bestimmung des Korrekturpolynoms weitere Passinformationen notwendig sind, wurden alle verfügbaren DGM-Höhenpasspunkte verwendet.

Variante StrE-P2 unterscheidet sich von StrE-P1 nur dadurch, dass zwei weitere Passpunktbänder im Bereich von S12 um Scan 2400 und Scan 4900 (dies sind die in Diagramm in Abb. 8-32 erkennbaren „Knick-Bereiche“ des GPS/INS-Modells) eingeführt wurden.

Bei Variante StrE-P3 wurden ebenfalls vier Passpunktbänder verwendet, jedoch auf die DGM-Höhenpasspunkte verzichtet.

Die numerischen Ergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung aller drei Varianten gegenüber der Variante StrE (ohne Korrekturpolynom). StrE-P1 und StrE-P2 sind praktisch ident. Dies deutet darauf hin, dass in diesem Fall die (teuren) Passpunktbänder im Streifeninneren keinen zusätzlichen Vorteil gegenüber den (billigen) DGM-Höhenpasspunkten liefern. Der Vergleich zu Variante StrE zeigt eine Verbesserung der mittleren Diskrepanzen längs der Flugrichtung um 25-30% und quer zur Flugrichtung sogar um über 60%. Die Diskrepanzen der Gut-Streifen S11 und S13 bleiben (erwartungsgemäß) in etwa gleich.

Die Variante StrE-P3 zeigt zwar eine Verbesserung hinsichtlich StrE, jedoch wieder eine Verschlechterung in Vergleich mit den Varianten StrE-P1 und StrE-P2. Dies lässt darauf schließen, dass die zusätzlichen Passpunktbänder an zwei diskreten Bereichen im Streifeninneren die kontinuierlich entlang des Streifens verteilten DGM-Höhenpasspunkte nicht ersetzen können. Durch die fehlende Stützung durch die DGM-Höhenpasspunkte kommt es zu einem unkontrollierten Ausschlagen zwischen den Passpunktbändern.

Abb. 8-36 zeigt von diesen drei Varianten die Diskrepanzenvektoren der Kontrollpunkte von S12 im Scanbereich von Scan 6500 bis Scan 8500.

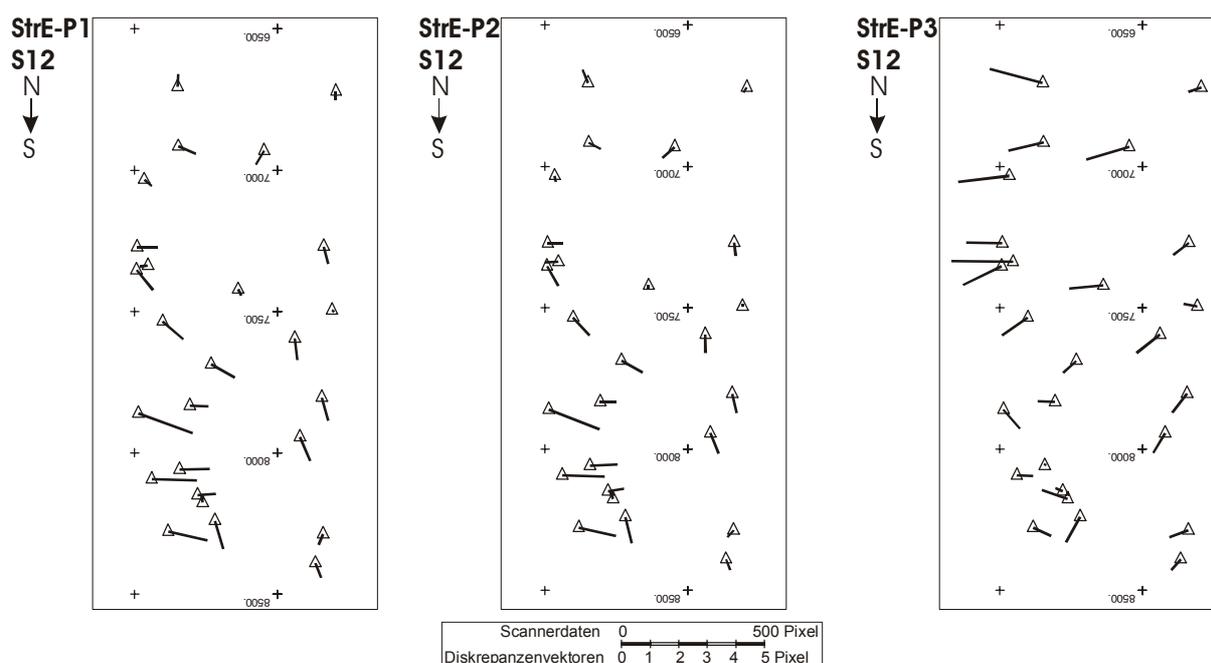


Abb. 8-36: Diskrepanzenvektoren (in Pixel) der Kontrollpunkte in S12 im südlichen Bereich des Teilblockes (Scan-Bereich: Scan 6500-Scan 8500): Varianten StrE-P1 (links), StrE-P2 (mitte), StrE-P3 (rechts).

Varianten StrE-S1/S2/S3 – "StreifenEinpassung und Unterteilung („Splitten“) des GPS/INS-Models von S12":

In diesen Varianten ist wie bei den bisherigen Varianten für die Gut-Streifen S11 und S13 ein eigenes GPS/INS-Modell definiert. Das GPS/INS-Modell von S12 ist zur Korrektur der Driftphänomene in drei Teile unterteilt, wobei eine kleine Überlappung der Teilmodelle für einen stetigen Übergang sorgt. Für jedes dieser Teilmodelle wird in der Ausgleichung ein eigenes Korrekturpolynom maximal vom Grad 2 bestimmt. Aus dem Diagramm in Abb. 8-32 ist ersichtlich, dass sich zwei Stellen gut als „Bruchstelle“ für die Unterteilung des GPS/INS-Modells eignen. Die erste Bruchstelle wurde im Bereich um Scan 2400 eingeführt und die zweite im Bereich um Scan 4900.

Die Varianten StrE-S1/S2/S3 unterscheiden sich wieder in der Anzahl und Anordnung der verwendeten Passpunkte und in der Verwendung der DGM-Höhenpasspunkte.

Variante StrE-S1 basiert auf lediglich zwei Passpunktbandern am südlichen und nördlichen Streifenende und der Verwendung aller verfügbaren DGM-Höhenpasspunkte.

Variante StrE-S2 basiert auf vier Passpunktbandern (am südlichen und nördlichen Streifenende und an den Bruchstellen des GPS/INS-Modells) und ebenfalls auf der Verwendung aller verfügbaren DGM-Höhenpasspunkte.

Bei Variante StrE-S3 wurden ebenfalls vier Passpunktbandern verwendet, jedoch wurden keine DGM-Höhenpasspunkte, sondern lediglich „normale“ Verknüpfungspunkte inkludiert.

Alle drei Varianten liefern ähnliche Ergebnisse. Verglichen mit den Varianten StrE-P1/P2/P3 schneiden die Varianten StrE-S1/S2/S3 noch etwas besser ab. Die mittleren Diskrepanzen in den Kontrollpunkten quer zur Flugrichtung wurden nun sogar bis zu 70% verbessert. Abb. 8-37 zeigt von diesen drei Varianten die Diskrepanzenvektoren der Kontrollpunkte von S12 im Scanbereich von Scan 6500 bis Scan 8500. Es sind kaum Unterschiede zwischen den Varianten zu erkennen, praktisch alle Vektoren sind dem Betrage nach kleiner als 1 Pixel, und insgesamt zeigen die Vektoren ein zufälliges Verhalten. Abb. 8-38 zeigt einen Orthophotoausschnitt aus S12 und einen Detailausschnitt überlagert mit den Referenzdaten der MZK, wobei nun keine Restklaffungen mehr zu erkennen sind.

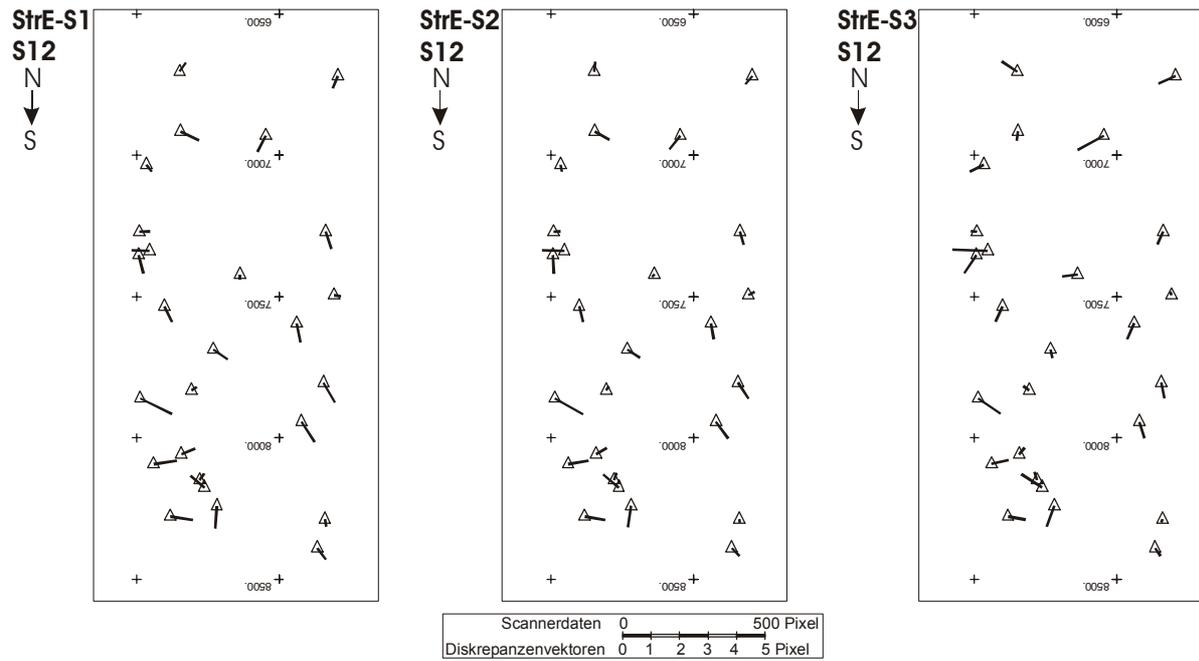


Abb. 8-37: Diskrepanzenvektoren (in Pixel) der Kontrollpunkte in S12 im südlichen Bereich des Teilblockes (Scan-Bereich: Scan 6500-Scan 8500): Varianten StrE-S1 (links), StrE-S2 (mitte), StrE-S3 (rechts).

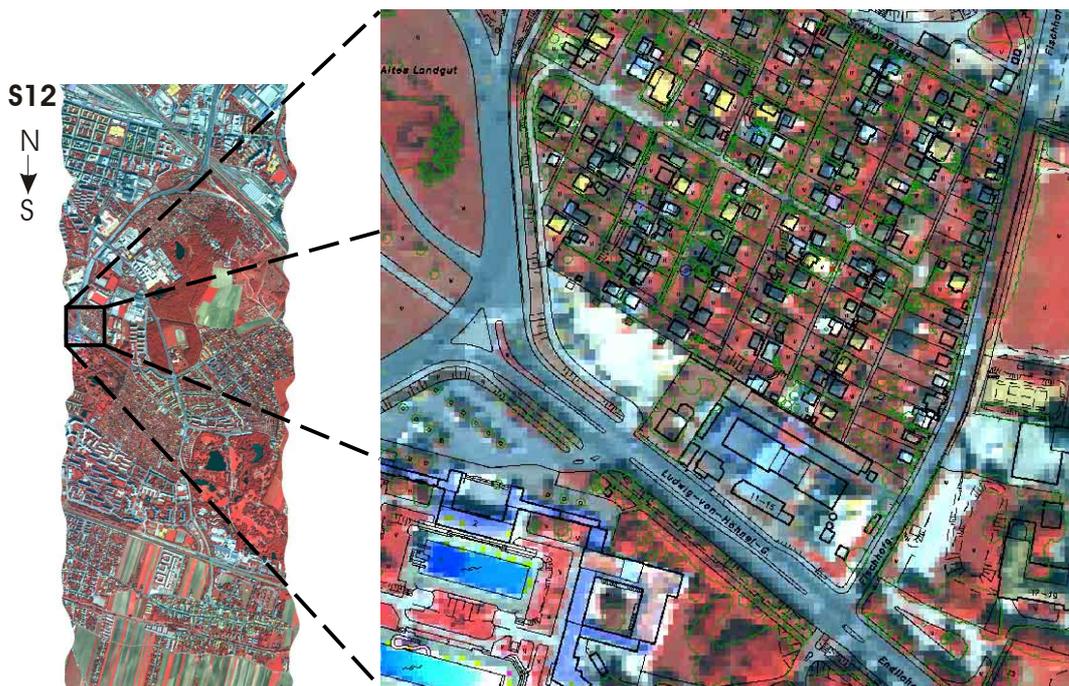


Abb. 8-38: Variante **StrE-S3** - Orthophotoausschnitt aus S12: Scan-Bereich von Scan 6500 bis 8500 (links); Detailausschnitt überlagert mit MZK (rechts).

Varianten StrE-Pall/Sall:

Diese beiden Varianten entsprechen den Varianten StrE-P1/P2/P3 bzw. StrE-S1/S2/S3 hinsichtlich ihrer Definition der Korrekturpolynome und der Unterteilung des GPS/INS-Modells, jedoch wurden alle verfügbaren Passpunkte und alle DGM-Höhenpasspunkte in der Ausgleichung verwendet, womit es hier keine Kontrollpunkte gibt<sup>1</sup>. Die in Tab. 8-6 angeführten „Diskrepanzen“ sind die mittleren Diskrepanzen in den Passpunkten zwischen den Bildkoordinatenmessungen in den Scanneraufnahmen und der Rückprojektion der in der MZK gemessenen Passpunktkoordinaten in die Scanneraufnahmen. In diesen Varianten erfolgt die bestmögliche Anpassung der Scannerdaten an alle vorhandenen Bodenpassinformationen.

Zusammenfassung der Ergebnisse des Subblocks S13-S12-S11:

Durch Modellierung der Driftphänomene in S12 mit Hilfe eines Korrekturpolynoms bzw. durch Unterteilung des GPS/INS-Modells von S12 in mehrere Teile und Bestimmen von eigenen Korrekturpolynomen niederen Grades für die Teilmodelle konnten beeindruckende Verbesserungen in der Sensororientierung erzielt werden. Die mittleren Gewichtseinheitsfehler verbesserten sich um etwa 30-40%, und vor allem in den Diskrepanzen quer zur Flugrichtung konnten Verbesserungen bis zu 70% erreicht werden. Nach der Driftmodellierung sind die mittleren Diskrepanzen auch quer zur Flugrichtung aller drei Streifen homogen. DGM-Höhenpasspunkte können (zumindest in diesem Fall) einen nützlichen Beitrag leisten und helfen, teure Vollpasspunkte einzusparen.

Die Varianten mit Unterteilung des GPS/INS-Modells von S12 in drei Teilmodelle liefert noch etwas bessere Ergebnisse als die Varianten mit einem einzigen Korrekturpolynom für den gesamten Streifen. Dies wird auch durch Abb. 8-39 bestätigt, welche die GPS/INS-Z-Beobachtungen und die Drift-korrigierten GPS/INS-Z-Werte für S12 zeigt. Die GPS/INS-Werte nach der Driftkorrektur bei der Variante mit Unterteilung des GPS/INS-Modells zeigen einen noch ruhigeren Verlauf als bei der Variante mit einem Korrekturpolynom für den gesamten Streifen.

Der Vorteil des Korrekturpolynoms über den gesamten Streifen liegt in der bequemerer Handhabung, ein wesentlicher Nachteil liegt in der Gefahr, dass Polynome mit höheren Graden zum Ausschlagen neigen und damit unangenehme Nebeneffekte auftreten können. Eine Folge von Teilmodellen mit jeweils eigenen Korrekturpolynomen niederen Grades ist hier sicher die „ungefährlichere“ Lösung, wenn auch weniger gut automatisierbar. Welche Strategie der Driftkorrektur schließlich gewählt wird, ist immer im konkreten Einzelfall zu entscheiden.

---

<sup>1</sup> Es sei angemerkt, dass eine Ausgleichung ohne unabhängige Kontrollpunkte grundsätzlich die Gefahr birgt, dass Fehler in den Definitionen der Korrekturpolynome oder zu schwache Stützung durch Passinformationen unaufgedeckt bleiben. Z. B. zeigt die Anpassung von Polynomen höheren Grades unter Umständen sehr kleine Residuen in den Passpunkten, jedoch zwischen den Passpunkten kann es zu unkontrollierten Ausschwingungen kommen, welche nur durch Kontrollpunkte (bzw. erst sehr spät bei der Orthophotokontrolle) aufgedeckt werden können. Dies konnte im vorliegenden Beispiel durch Verwenden identer Definitionen der Korrekturpolynome (mit nicht allzu hohen Polynomgraden) wie in den schon vorher besprochenen Varianten mit Kontrollpunkten ausgeschlossen werden.

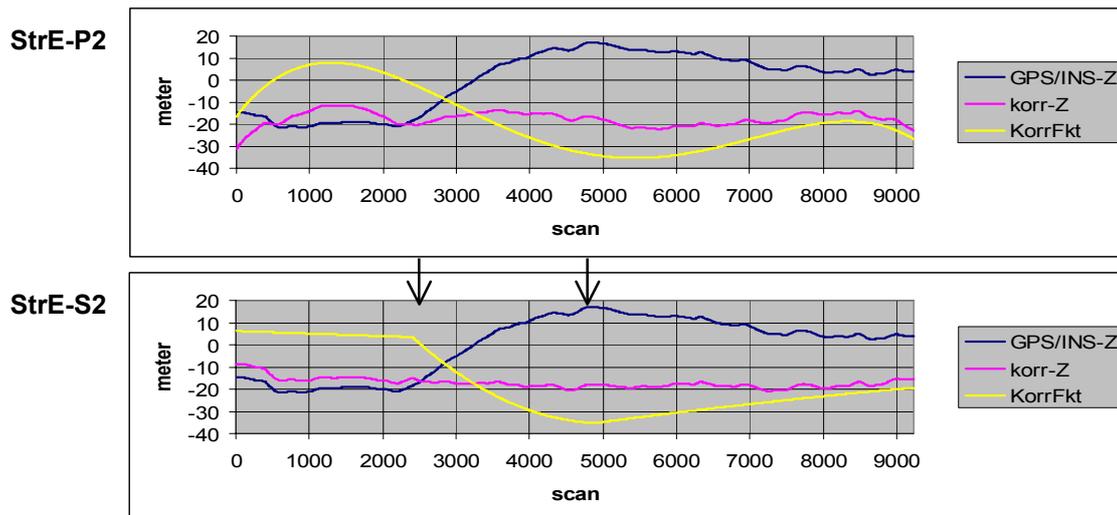


Abb. 8-39: Z-Korrektur durch Driftmodellierung für S12 für Variante StrE-P2 (oben) und Variante StrE-S2 (unten): **GPS/INS-Z**: originale GPS/INS-Z-Werte reduziert auf Mittelwert / **KorrFkt**: Korrekturfunktion / **korr-Z**: Z-Werte nach Anbringen der Korrekturfunktion; ↓: Bruchstellen für die Unterteilung des GPS/INS-Modells.

## 8.4.2 Ergebnisse des Teilblocks aus Streifen 16, 17, 18

Im folgenden werden die Ergebnisse verschiedener Varianten des Teilblocks bestehend aus den Streifen 16, 17, und 18 (kurz als S16, S17 und S18 bezeichnet) gezeigt. Ähnlich wie beim Teilblock S13-S12-S11 (Abschnitt 8.4.1) wurden die äußeren beiden Streifen S16 und S18 als Gut-Streifen klassifiziert und der mittlere Streifen S17 als Problemstreifen. Abb. 8-40 zeigt die Diagramme der GPS/INS-Beobachtungen. Die nähere Betrachtung der Z-Beobachtungen von S17 zeigt ein sehr auffälliges, wellenförmiges Verhalten mit sogar zwei markanten Knicken (um Scan 900 und 2250). Da bei der tatsächlichen Flugbewegung die Höhenkomponente sehr wahrscheinlich auf wenige Meter konstant gehalten werden konnte, ist nun eine geeignete Strategie zur Korrektur dieser Driftphänomene anzuwenden. Es ist offensichtlich, dass zur zufriedenstellenden Korrektur dieser Driftphänomene kein Korrekturpolynom höheren Grades für den gesamten Streifen gefunden werden kann. Es bieten sich nur die Unterteilung des GPS/INS-Modells in mehrere Teile und Anwendung von Korrekturpolynomen niederen Grades für die einzelnen Teile an.

Die ATM-Aufnahmen des Teilblocks S18-S17-S16 (Streifenanordnung von West nach Ost) bestehen jeweils aus ca. 7000 Scans. In jedem Streifen wurden ca. 60-70 gleichmäßig verteilte Passpunkte bestimmt, und entlang des Überlappungsbereichs zweier benachbarter Streifen wurden über 200 Verknüpfungspunkte gemessen, von denen auch eine Vielzahl auf der Geländeoberfläche liegen und somit als DGM-Höhenpasspunkte verwendet werden können. Abb. 8-41 zeigt eine Übersicht der verfügbaren Messungen in der südlichen Hälfte des Teilblocks. Jene Passpunkte, die bei den verschiedenen Varianten in der Ausgleichung nicht teilnahmen, wurden als Kontrollpunkte verwendet.

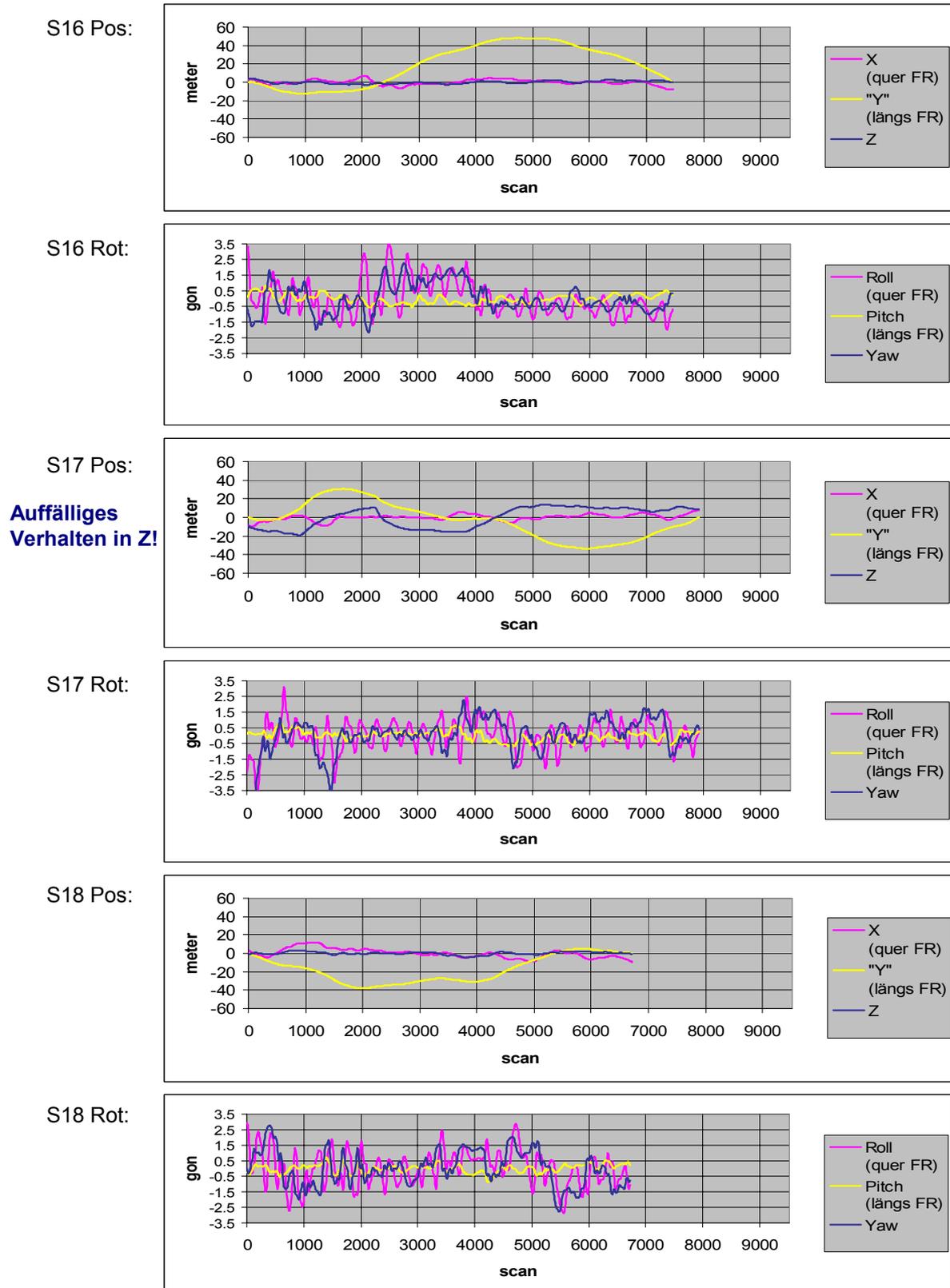


Abb. 8-40: Diagramme der GPS/INS-Daten der Flugstreifen S16, S17 und S18 des Messfluges Wien 2000: **Pos**: GPS/INS-Positionen / **Rot** (Rotationen): GPS/INS-Stellungsbeobachtungen / **FR**: Flugrichtung / **X, Z, Roll, Pitch, Yaw**: reduziert um den jeweiligen Mittelwert / **"Y"**: Abweichung von der gleichförmigen Bewegung in Flugrichtung

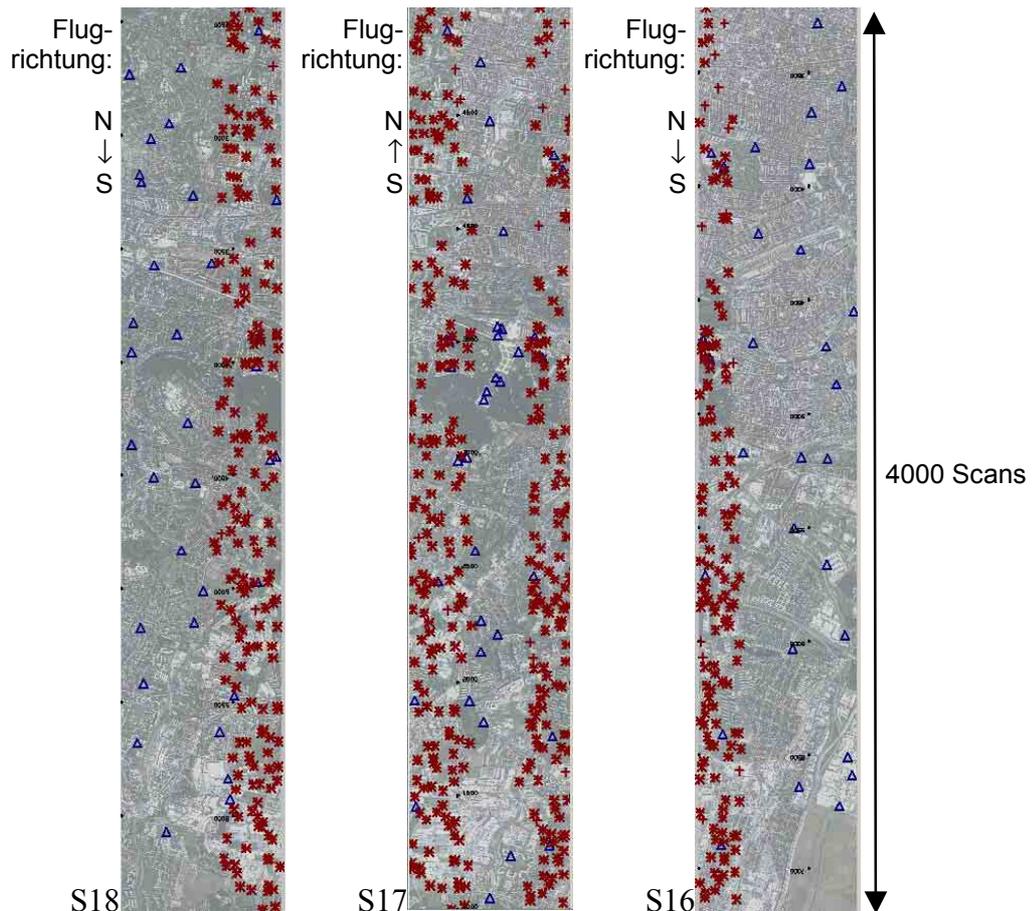


Abb. 8-41: Ausschnitt von ca. 4000 Scans am südlichen Streifenende von Streifen S18-S17-S16 des Messfluges 2000 mit verfügbaren Passpunkten ( $\Delta$ ) und Verknüpfungspunkten, die auf der Geländeoberfläche liegen (\*) bzw. nicht auf der Geländeoberfläche liegen (+).

In Tab. 8-7 sind die Ergebnisse der verschiedenen Varianten der Sensororientierung des nun betrachteten Teilblocks S18-S17-S16 mit dem mittleren Gewichtseinheitsfehler a posteriori ( $\sigma_0$ ) und den mittleren Diskrepanzen im jeweiligen Scannerstreifen (rms in Pixel) an den nicht in der Ausgleichung beteiligten Kontrollpunkten zusammengefasst. Die Bezeichnung der Varianten erfolgte analog zum bereits besprochenen Teilblock S13-S12-S11 im vorhergehenden Abschnitt.

Variante BlockE – "BlockEinpassung":

Ein GPS/INS-Modell für den gesamten Block wird über zwei Passpunktbander, je eines am nördlichen und südlichen Streifenende, und unter der Verwendung der vorhandenen Verknüpfungspunkte eingepasst. Die mittleren Diskrepanzen quer zur Flugrichtung für den Problemstreifen S17 sind deutlich schlechter als bei den benachbarten „Gut-Streifen“ S18 und S16.

Variante	PP	G	HP	$\sigma_0$	% $\sigma_0$	Streifen 18					Streifen 17					Streifen 16				
						Anz	rms l	rms q	% l	% q	Anz	rms l	rms q	% l	% q	Anz	rms l	rms q	% l	% q
BlockE	2b	0		0.63	102	34	0.66	0.67	116	109	42	1.52	1.33	99	98	43	0.78	0.57	138	110
<b>StrE</b>	<b>2b</b>	<b>0</b>		<b>0.62</b>	<b>100</b>	<b>34</b>	<b>0.57</b>	<b>0.62</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>42</b>	<b>1.54</b>	<b>1.36</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>43</b>	<b>0.56</b>	<b>0.52</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
StrE-S	2b	2	ja	0.32	52	34	0.43	0.57	75	92	42	0.55	0.52	36	38	43	0.42	0.50	75	96
StrE-Sall	all	2	ja	0.31	51	54	0.34	0.55	60	88	59	0.42	0.51	28	38	58	0.35	0.48	62	92

Tab. 8-7: Vergleich verschiedener Varianten der Sensororientierung des Teilblocks bestehend aus S18, S17 und S16 des Messfluges Wien 2000: **Variante**: Kurzbezeichnung der Variante / **PP**: Passpunktconfiguration: **2b** - Zwei "Bänder" von Passpunkten am südlichen und nördlichen Streifenende, insgesamt 32 Passpunkte; **all** – alle verfügbaren Passpunkte nehmen in der Ausgleichung teil / **G**: maximaler Grad der Korrekturpolynome / **HP**: für Verknüpfungspunkte, die auf der Geländeoberfläche liegen, nimmt die aus dem Geländemodell ermittelte Geländehöhe als Höhenpassinformation in der Ausgleichung teil (ja) bzw. nicht teil (kein Eintrag) /  $\sigma_0$ : mittlerer Gewichtseinheitsfehler a posteriori / **Anz**: Anzahl der Kontrollpunkte im Streifen bzw. bei Variante StrE-Sall die Anzahl der Passpunkte / **rms**: mittlere Diskrepanzen an den Kontrollpunkten in Pixel (für Variante StrE-Sall mittlere Diskrepanzen an den Passpunkten) / **l**: längs Flugrichtung / **q**: quer zur Flugrichtung

Variante StrE – "StreifenEinpassung" (100%-Referenz):

In dieser Variante ist für jeden Streifen ein eigenes GPS/INS-Modell definiert, welches über zwei Passpunktbander am nördlichen und südlichen Streifenende und unter Verwendung der vorhandenen Verknüpfungspunkte eingepasst wird. S18 und S16 weisen nun eine etwas bessere Genauigkeit auf. Bei S17 hat sich in dieser Variante keine wesentliche Veränderung zur Variante BlockE eingestellt. Die mittleren Diskrepanzen von S17 sind sowohl in Flugrichtung als auch quer zur Flugrichtung um den Faktor 2-3 schlechter als bei den benachbarten Gut-Streifen. Abb. 8-42 zeigt die Diskrepanzenvektoren in den Kontrollpunkten in den benachbarten Ausschnitten der drei Streifen im offensichtlichen Problembereich von S17 von Scan 2000 bis Scan 5000. Während die Diskrepanzenvektoren in den Gutstreifen ein zufälliges und hinsichtlich der Länge der Vektoren zufriedenstellendes Bild zeigen, sind die Diskrepanzenvektoren in S17 deutlich größer (bis zu 5-6 Pixel), und sie weisen eindeutige Systematiken auf. Der in Abb. 8-44 mitte dargestellte Orthophotoausschnitt aus diesem Bereich zeigt ebenfalls große Versetzungen des Orthophotos gegenüber der MZK.

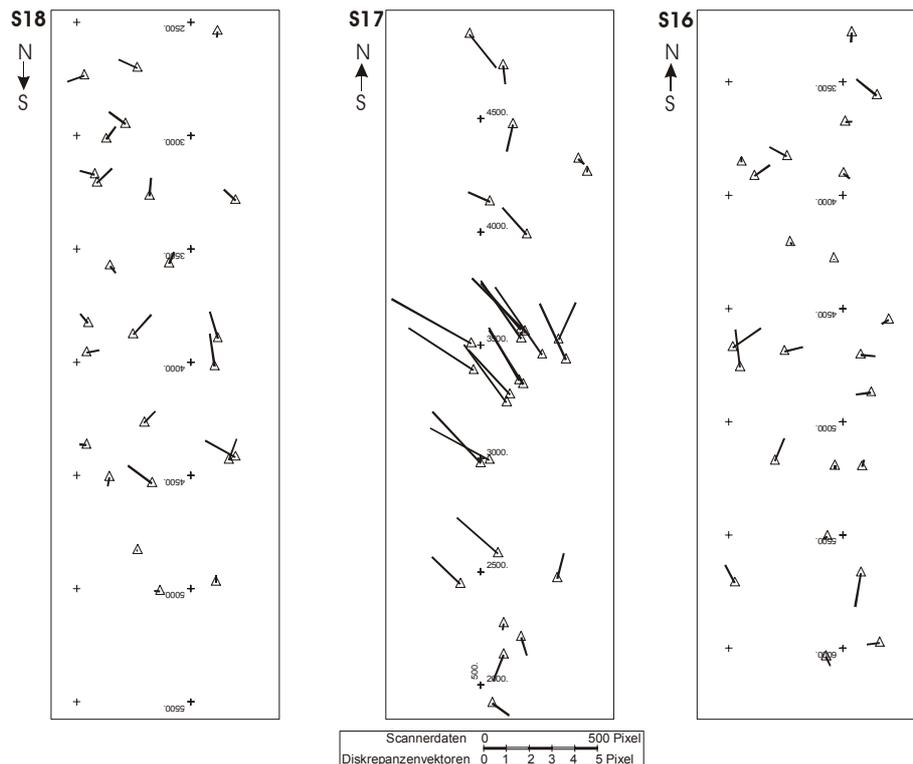


Abb. 8-42: Variante **StrE**: Diskrepanzvektoren (in Pixel) der Kontrollpunkte in S18-S17-S16 im südlichen Bereich des Teilblockes (Scan-Bereich von S17: Scan 2000-Scan 5000).

Variante StrE-S – "StreifenEinpassung und Unterteilung („Splitten“) des GPS/INS-Modells von S17“:

In dieser Variante ist für die Gut-Streifen S18 und S16 ein eigenes GPS/INS-Modell definiert. Das GPS/INS-Modell von S17 ist zur Korrektur der Driftphänomene in sechs Teile unterteilt, wobei eine kleine Überlappung der Teilmodelle für einen stetigen Übergang sorgt. Für jedes dieser Teilmodelle wird in der Ausgleichung ein eigenes Korrekturpolynom maximal vom Grad 2 bestimmt. Aus dem Diagramm von S17 in Abb. 8-40 ist ersichtlich, dass sich die folgenden Stellen gut als „Bruchstellen“ für die Unterteilung des GPS/INS-Modells eignen: um Scan 900, 2250, 3000, 3900 und 4900.

Variante StrE-S basiert auf lediglich zwei Passpunktbandern am südlichen und nördlichen Streifenende und der Verwendung aller möglichen DGM-Höhenpasspunkte.

Der mittlere Gewichtseinheitsfehler a posteriori verbessert sich um 50% und die Diskrepanzen in den Kontrollpunkten längs und quer zur Flugrichtung wurden um über 60% verbessert. Die mittleren Diskrepanzen aller drei Streifen sind nun sowohl längs als auch quer zur Flugrichtung etwa gleich groß und liegen bei einem halben Pixel.

Sowohl die Diskrepanzvektoren in Abb. 8-43 als auch der Orthophotoausschnitt in Abb. 8-44 rechts zeigen ein sehr zufriedenstellendes Bild.

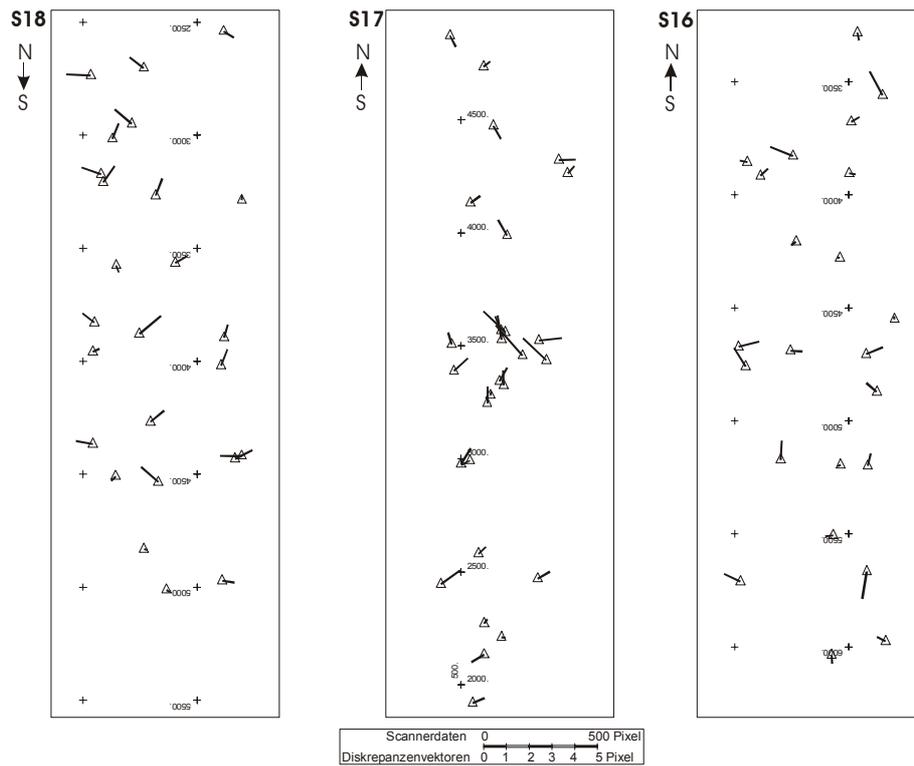


Abb. 8-43: Variante **StrE-S**: Diskrepanzvektoren (in Pixel) der Kontrollpunkte in S18-S17-S16 im südlichen Bereich des Teilblockes (Scan-Bereich von S17: Scan 2000-Scan 5000).

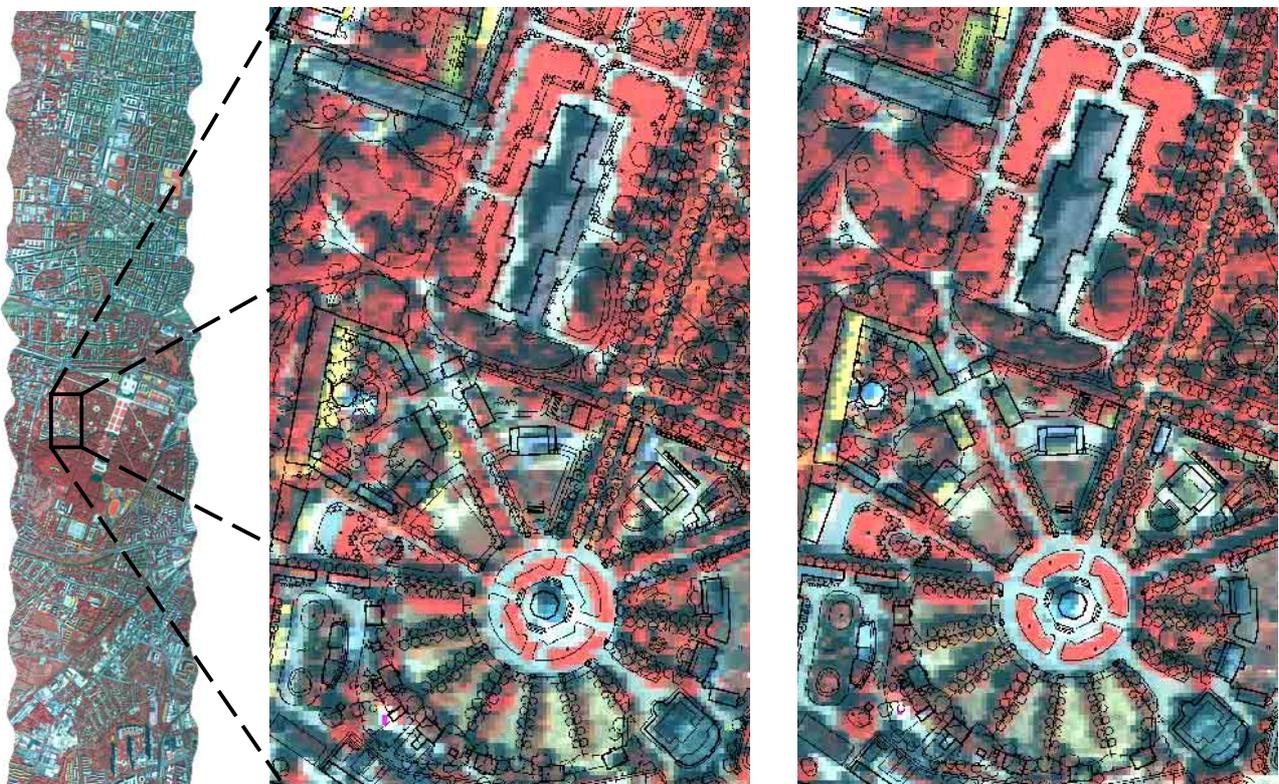


Abb. 8-44: Orthophotoausschnitt aus S17:  
 links: Scan-Bereich von Scan 2000 bis 5000  
 mitte: Detailausschnitt überlagert mit MZK Variante **StrE**  
 rechts: Detailausschnitt überlagert mit MZK Variante **StrE-S**.

Variante StrE-Sall:

Diese Variante entspricht hinsichtlich der Unterteilung des GPS/INS-Modells und der Definition der Korrekturpolynome der Variante StrE-S. Jedoch wurden alle verfügbaren Passpunkte und alle DGM-Höhenpasspunkte in der Ausgleichung verwendet, womit es keine Kontrollpunkte in dieser Variante gibt<sup>1</sup>. Die in Tab. 8-7 angeführten „Diskrepanzen“ sind die mittleren Diskrepanzen in den Passpunkten zwischen den Bildkoordinatenmessungen in den Scanneraufnahmen und der Rückprojektion der in der MZK gemessenen Passpunktkoordinaten in die Scanneraufnahmen. In dieser Variante erfolgt die bestmögliche Anpassung der Scannerdaten an alle vorhandenen Bodenpassinformationen.

Vergleicht man nun die Ergebnisse der Varianten StrE-S und StrE-Sall, so erkennt man keine nennenswerten Verbesserungen. Es ist also in diesem Fall sehr gut gelungen, (teure) Vollpasspunkte durch (billigere) DGM-Höhenpasspunkte zu ersetzen.

Abb. 8-45 zeigt die originalen GPS/INS-Z-Beobachtungen und die Drift-korrigierten GPS/INS-Z-Werte für S17. Das Diagramm der korrigierten GPS/INS-Z-Werte zeigt eine maximale Variation der Höhe von der mittleren Flughöhe von nur mehr wenigen Metern. Und abgesehen von einer kleinen Spitze um Scan 2250 erscheint der korrigierte GPS/INS-Z-Graph für eine kontinuierliche Flugbewegung plausibel.

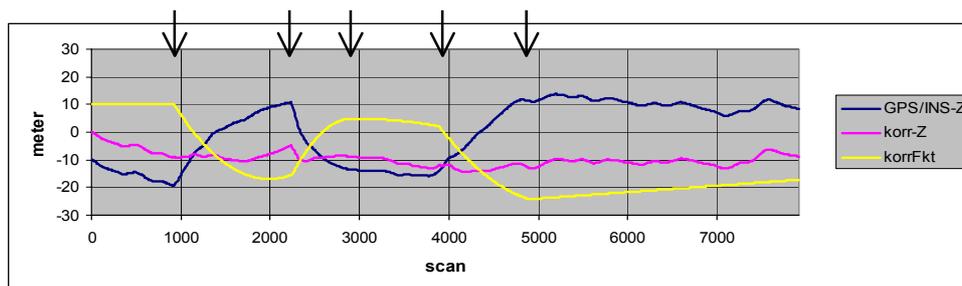


Abb. 8-45: Z-Korrektur durch Driftmodellierung für S17 in Variante **StrE-S**;  
**GPS/INS-Z**: originale GPS/INS-Z-Werte reduziert auf Mittelwert;  
**KorrFkt**: Korrekturfunktion; **korr-Z**: Z-Werte nach Anbringen der  
 Korrekturfunktion; ↓: Bruchstellen für die Unterteilung des GPS/INS-  
 Modells.

<sup>1</sup> Es gilt hier die gleiche Anmerkung wie in der Fußnote bei Variante *StrE-Pall/Sall* in Abschnitt 8.4.1; diese wird der Bequemlichkeit halber wiederholt:

Es sei angemerkt, dass eine Ausgleichung ohne unabhängige Kontrollpunkte grundsätzlich die Gefahr birgt, dass Fehler in den Definitionen der Korrekturpolynome oder zu schwache Stützung durch Passinformationen unaufgedeckt bleiben. Z. B. zeigt die Anpassung von Polynomen höheren Grades unter Umständen sehr kleine Residuen in den Passpunkten, jedoch zwischen den Passpunkten kann es zu unkontrollierten Ausschwingungen kommen, welche nur durch Kontrollpunkte (bzw. erst sehr spät bei der Orthophotokontrolle) aufgedeckt werden können. Dies konnte im vorliegenden Beispiel durch Verwenden identer Definitionen der Korrekturpolynome (mit nicht allzu hohen Polynomgraden) wie in den schon vorher besprochenen Varianten mit Kontrollpunkten ausgeschlossen werden.

### 8.4.3 Zusammenfassung der Bearbeitung von Messflug 2000

In den Abschnitten 8.4.1 und 8.4.2 wurden zwei verschiedene Strategien zur Korrektur der aufgetretenen Driftphänomene detailliert gezeigt:

- a) Definition eines Korrekturpolynoms entlang des gesamten Streifens
- b) Unterteilung der GPS/INS-Modelle und Definition von eigenen Korrekturpolynomen für jedes Teilmodell

Während die Korrektur der Driftphänomene des Streifens S12, wie in Abschnitt 8.4.1 gezeigt, mit beiden Strategien a) oder b) erfolgen konnte, so war bei den Driftphänomenen des Streifens S17 (siehe Abschnitt 8.4.2) nur Strategie b) anzuwenden. Strategie a) beinhaltet den Vorteil der bequemerer Handhabung und einer gewissen Automatisierbarkeit jedoch den Nachteil der Gefahr von Ausschwingungen bei höheren Polynomgraden. Strategie b), für welche grundsätzlich nur Korrekturpolynome niederen Grades verwendet werden, stellt zwar die aufwändigere aber auch ungefährlichere Lösung dar. Außerdem konnte gezeigt werden, dass (billigere) DGM-Höhenpasspunkte einen wertvollen Beitrag leisten können und zum Teil (teure) Vollpasspunkte ersetzen können.

Basierend auf den Erkenntnissen der beiden Teilblöcke konnten alle weiteren Problemstreifen des Messfluges 2000 mit zufriedenstellender Genauigkeit (Restklaffungen kleiner 1 Pixel) georeferenziert werden. Es wurde bevorzugt die Strategie der Unterteilung der GPS/INS-Modelle der Problemstreifen und Bestimmung von Korrekturpolynomen niederen Grades angewendet. Tab. 8-8 zeigt eine Übersicht aller Flugstreifen des Messfluges 2000 mit der Anzahl der verwendeten GPS/INS-Modelle und den maximalen Grad der Korrekturpolynome für die GPS/INS-Modelle.

Flugstr.	Anzahl der (Teil-)Modelle	Max. Grad	Flugstr.	Anzahl der (Teil-)Modelle	Max. Grad
1	1	0	13	1	0
2	1	0	14	3	2
3	3	1	15	3	2
4	5	1	16	1	0
5	5	1	17	6	2
6	5	1	18	1	0
7	1	0	19	3	2
8	4	1	20	1	0
9	1	0	21	4	1
10	5	2	22	1	0
11	1	0	23	1	0
12	3	2	24	2	2

Tab. 8-8: Übersicht der Flugstreifen des Messfluges 2000 mit der Anzahl der GPS/INS-Modelle für den jeweiligen Flugstreifen und den maximalen Grad der verwendeten Korrekturpolynome.

Abb. 8-46 zeigt schließlich einen Übersichtsplot der georeferenzierten ATM-Daten des Messfluges 2000 von ganz Wien in verschiedenen Kanalkombinationen.

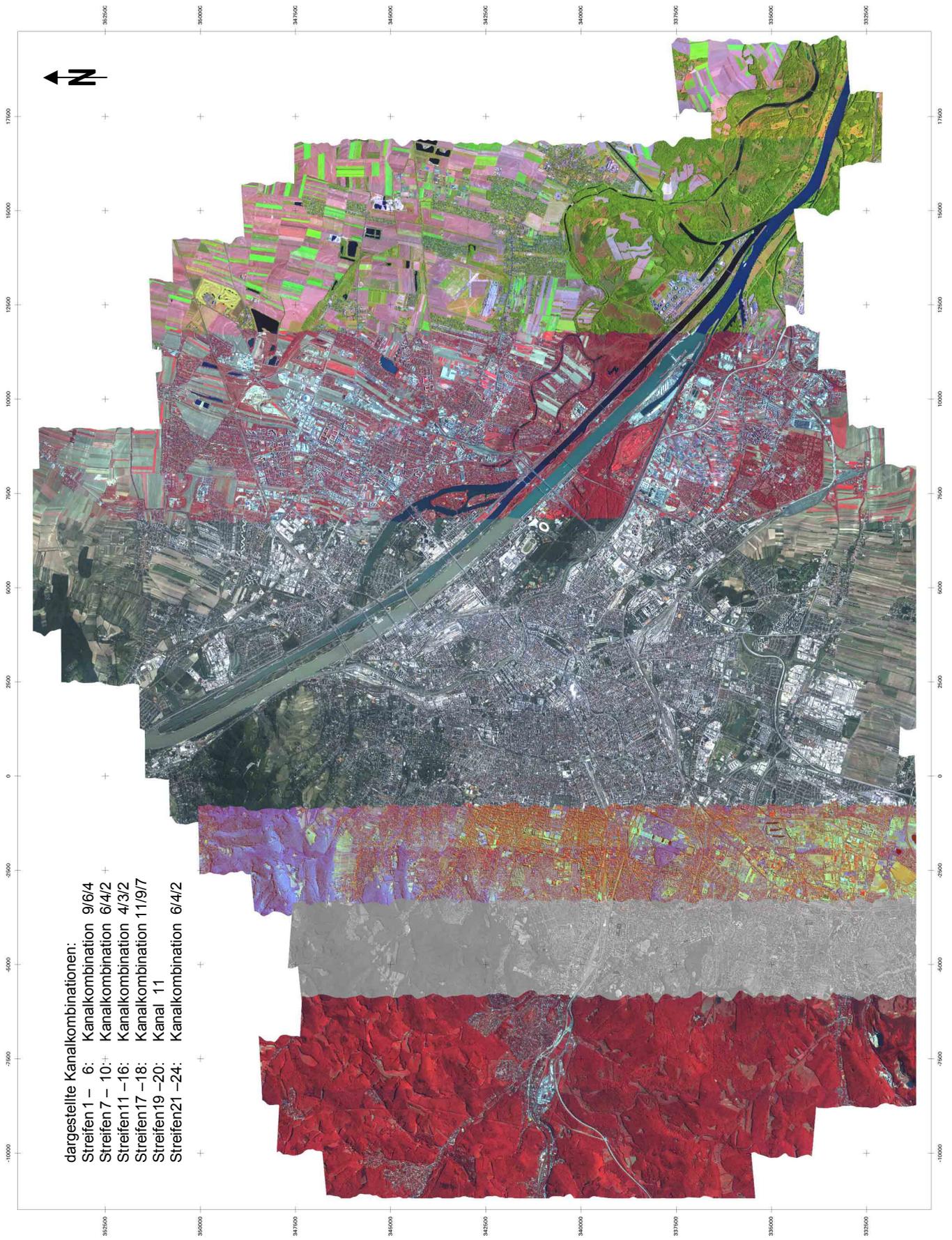


Abb. 8-46: Übersichtsplot der georeferenzierten ATM-Daten des Messfluges 2000: Streifenanordnung von Ost nach West Streifen 1 bis Streifen 24.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Mittelpunkt dieser Arbeit stand die Präsentation einer mächtigen Methode der Georeferenzierung von multispektralen Scanneraufnahmen und ihre praktische Erprobung. Selbst bei den – aus heutiger Sicht – sehr unzureichenden Datensätzen der Messflüge Wien 1997 und Wien 2000 mit dem multispektralen Rotationsscanner Daedalus AADS 1268 (Airborne Thematic Mapper) konnte eine sehr gute Qualität der Georeferenzierung erreicht werden.

Der am I.P.F. der TU Wien entwickelte und im hybriden Ausgleichsprogramm ORIENT implementierte Ansatz zur Sensororientierung von multispektralen Flugzeugscanneraufnahmen basiert auf zusammengesetzten kubischen Polynomen, welche zur Modellierung der zeitlichen Variation der äußeren Orientierung herangezogen werden. Die sechsdimensionale Orientierungsfunktion einer Scanneraufnahme besteht somit aus Segmenten, die in den Knotenpunkten mit zumindest erster stetiger Ableitung zusammenstoßen. Die Bestimmung der sechsdimensionalen Orientierungsfunktionen von Scanneraufnahmen kann indirekt über Bodenpassinformationen oder direkt mittels GPS/INS-Beobachtungen erfolgen. Eine Kombination der beiden Methoden wird als integrierte Sensororientierung bezeichnet.

Bei Flugmissionen mit multispektralen Scannersystemen ist heutzutage der kombinierte Einsatz mit GPS/INS-Systemen zur direkten Registrierung der äußeren Orientierungsparameter Stand der Technik, sodass heute praktisch nur mehr eine direkte oder integrierte Sensororientierung durchgeführt wird. Ältere multispektrale Scanneraufnahmen wurden jedoch noch ohne GPS/INS-Unterstützung aufgezeichnet, wobei zum Teil zumindest Teilmengen der Orientierungsparameter (z. B. Beobachtungen der Stellungsparameter mit Hilfe von Flugzeugkreisel oder einer kreiselstabilisierten Plattform) registriert werden konnten. Die Sensororientierung von Scanneraufnahmen ohne GPS/INS-Unterstützung muss indirekt erfolgen, was die ausreichende Verfügbarkeit von Passinformationen voraussetzt und generell einen hohen Aufwand darstellt, der sich nur für historisch wichtige Daten (z. B. für Zeitreihen) lohnt.

Der Messflug 1997 wurde noch ohne GPS/INS-Unterstützung durchgeführt; es musste daher eine indirekte Sensororientierung durchgeführt werden. Die Verfügbarkeit von ausreichend vielen und gut verteilten Passpunkten ist selbst im städtischen Gebiet nicht immer gewährleistet, daher ist speziell bei der indirekten Sensororientierung die Einbeziehung von linienförmigen Passelementen, die sich als Gerade, Polynome oder als 3D-Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen mathematisch modellieren lassen, hilfreich. Es ist zu beachten, dass zur Bestimmung jedes einzelnen Knotenpunktes einer Orientierungsfunktion ausreichend und gut verteilte Passinformationen zur Verfügung stehen müssen. In Segmenten, in denen nicht ausreichend Passinformationen bereit gestellt werden können, muss mit Qualitätseinbußen gerechnet werden, die im Orthophoto zutage treten. Unter Verwendung sowohl von Punkten als auch von linienförmigen Elementen als Passinformationen ist es gelungen, diesen Datensatz mit hoher Genauigkeit zu georeferenzieren.

Für den Messflug 2000, bei dem schon ein GPS/INS-System zum Einsatz kam, wurde eine integrierte Sensororientierung durchgeführt. In ORIENT werden dazu die GPS/INS-Beobachtungen als „Beobachtungsmodelle“ der Orientierungsfunktionen der Flugstreifen eingeführt. Mit Hilfe von Passpunkten werden diese GPS/INS-Beobachtungsmodelle bestmöglich ins Landessystem eingepasst. Im Idealfall reichen ein paar wenige Passpunkte aus, um die eventuell in den GPS/INS-Daten enthaltenen Datumsdefekte zu korrigieren. In den GPS/INS-Daten des Messfluges 2000 waren jedoch erhebliche Driftphänomene enthalten, welche mit Hilfe der in ORIENT zur Verfügung stehenden zusätzlichen Parameter (*adp*) korrigiert werden konnten. Zur Bestimmung der zusätzlichen Parameter sind entsprechend mehr Passinformationen notwendig. In diesem Anwendungsbeispiel konnte gezeigt werden, dass (teure) Vollpasspunkte zum Teil durch (billigere) DGM-Höhenpasspunkten ersetzt werden können.

Die erzielte hohe Qualität der praktischen Ergebnisse ist ein sehr guter Beweis für die Leistungsfähigkeit der präsentierten Methode und ihrer EDV-mäßigen Implementierung. Wenn auch heutzutage immer wieder verbesserte und weiterentwickelte integrierte GPS/INS-Systeme zur Verfügung stehen, so weisen auch gegenwärtig anfallende GPS/INS-Daten gelegentlich Lücken auf (wie z. B. Erfahrungen des I.P.F. in Pilotprojekten mit ALS-Daten (ALS – airborne laser scanning) ergeben). Mit den hier gezeigten Methoden werden Möglichkeiten geboten, gegebenenfalls auftretende GPS/INS-Lücken zu überbrücken und die Georeferenzierung auch solcher Scanneraufnahmen mit hoher Qualität durchzuführen. Der Ansatz kann grundsätzlich auch für Aufnahmen von Drei- und Mehrzeilenkameras, ALS- oder SAR-Systemen angewendet werden; die praktische Erprobung für diese Fälle ist jedoch noch ausständig.

## 10 Literaturverzeichnis

- [Amann, 1986] Amann, V. (1986): *Multispektraler Linescanner DAEDALUS AADS 1268 (ATM) – Leitfaden für den Datennutzer*. Vom DLR zur Verfügung gestellte Datenbeschreibung.
- [Böhmer, 1974] Böhmer, K. (1974): *Spline-Funktionen – Theorie und Anwendungen*. Teubner-Studienbücher Mathematik, B.G. Teubner, Stuttgart.
- [Boucher und Altamimi, 2001] Boucher, C., Altamimi, Z. (2001): *Memo: Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign*. Richtlinien für Transformation zwischen ITRS und ETRS89; veröffentlicht auf der LAREG-Homepage (Laboratoire de Recherches en Geodesie) <http://lareg.ensg.ign.fr/> unter dem Thema „EUREF“. Download von www-Seite: <http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/memo.pdf> im September 2004.
- [Cramer, 1999] Cramer, M. (1999): *Sensorintegration GPS und INS*. Proceedings zum Workshop „Sensorsysteme im Precision Farming“, Rostock, 1999.
- [Cramer, 2001] Cramer, M. (2001): *Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie*. Dissertation an der Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 537, München 2001.
- [Ecker et al., 1991]: Ecker, R., Gsandtner, M., Jansa J. *Geocoding Using Hybrid Bundle Adjustment and a Sophisticated DTM*. Proceedings of the 11th EARSEL Symposium in Graz, 1991 pp.445-455.
- [Ecker et al., 1993]: Ecker, R., Kalliany, R., Otepka, G. *High quality rectification and image enhancement techniques for digital orthophoto production*. Photogrammetric Week 93, Stuttgart, Wichmann Verlag, Karlsruhe 1993 pp.142-155.
- [Forkert, 1994] Forkert, G. (1994): *Die Lösung photogrammetrischer Orientierungs- und Rekonstruktionsaufgaben mittels allgemeiner kurvenförmiger Elemente*. Geowissenschaftliche Mitteilungen der Studienrichtung Vermessungswesen, Heft 41, Wien 1994.
- [Fricker, 2001] Fricker, P.(2001): *ADS40 – Progress in digital aerial data collection*. Photogrammetric Week '01, Eds. D. Fritsch/R. Spiller, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [Gruber et al., 2003] Gruber, M., Leberl, F., Perko, R. (2003): *Paradigmenwechsel in der Photogrammetrie durch digitale Luftbildaufnahme?* Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation PFG 4/2003, S. 285-297.
- [Heipke et al., 2002] Heipke, C., Jacobsen, K., Wegmann, H., Andersen, O., Nilsen Jr., B. (2002): *Test goals and test set up for the OEEPE test "Integrated sensor orientation"*. Heipke C., Jacobsen K., Wegmann H. (Eds.), Integrated Sensor Orientation - Test report and workshop proceedings, OEEPE Official Publication No. 43, pp 11-18.
- [Heipke, 2003] Heipke, C. (2003): *Photogrammetrie & Fernerkundung – vom Elektronenmikroskop bis zur Planetenbeobachtung*. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation, PFG 3/2003, S. 165-180.

- [Hinz et al., 2001] Hinz, A., Dörstel, C., Heier, H. (2001): *DMC – The Digital Sensor Technology of Z/I-Imaging*. Photogrammetric Week '01, Eds. D. Fritsch/R. Spiller, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [Hofmann-Wellenhof et al., 2001] Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J. (2001): *GPS Theory and Practice*. Fifth revised edition, Springer Verlag Wien New York.
- [Jansa, 1983] Jansa, J. (1983): *Rektifizierung von Multispektral-Scanneraufnahmen - Entwicklung und Erprobung eines EDV-Programms*. Geowissenschaftliche Mitteilungen der Studienrichtung Vermessungswesen, Heft 24, Wien 1983.
- [Jekeli, 2001] Jekeli, C. (2001): *Inertial Navigation Systems with Geodetic Applications*. de Gruyter, Berlin, New York.
- [Kager, 1989] Kager, H. (1989): *ORIENT: A Universal Photogrammetric Adjustment System*. In Grün, A. and Kahmen, H. (Eds.), *Optical 3-D Measurement*, Karlsruhe, Deutschland, Herbert Wichman Verlag, S. 447-455.
- [Kager, 1995] Kager, H. (1995): *The ORIENT Manual*. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien.
- [Kager, 2000] Kager, H. (2000): *Adjustment of Algebraic Surfaces by Least Squared Distances*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol XXXIII, Part B3, Amsterdam 2000, pp. 472 - 479.
- [Kerschner, 1998] Kerschner, M. (1998): *Homologous Twin Snakes Integrated in a Bundle Block Adjustment*. Proceedings of the International Symposium on "Object Recognition and Scene Classification from Multispectral and Multisensor Pixels", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 32, Part 3/1, pp. 244 - 249, Ohio, Columbus, 1998.
- [Kerschner, 2003] Kerschner, M. (2003): *Snakes für Aufgaben der digitalen Photogrammetrie und Topographie*. Dissertation am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Wien, 2003.
- [Kraus und Schneider, 1988] Kraus, K., Schneider, W. (1988): *Fernerkundung Band 1 – Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken*. Dümmler Verlag, Bonn.
- [Kraus, 1990] Kraus, K. (1990): *Fernerkundung Band 2 – Auswertung photographischer und digitaler Bilder*. Mit Beiträgen von J. Jansa und W. Schneider. Dümmler Verlag, Bonn.
- [Kraus, 1996] Kraus, K. (1996): *Photogrammetrie Band 2 – Verfeinerte Methoden und Anwendungen*. Mit Beiträgen von J. Jansa und H. Kager. Dritte Auflage, Dümmler Verlag, Bonn.
- [Kraus, 1997] Kraus, K. (1997): *Photogrammetrie Band 1 – Grundlagen und Standardverfahren*. Mit Beiträgen von P. Waldhäusl. Sechste Auflage, Dümmler Verlag, Bonn.
- [Kraus, 2000] Kraus, K. (2000): *Photogrammetrie Band 3 – Topographische Informationssysteme*. Dümmler Verlag, Bonn.
- [Kraus, 2002] Kraus, K. (2002): *Zur Orthophoto-Terminologie*. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation PFG 6/2002, S. 451-452.
- [Kruck, 2003] Kruck, E. (2003): *Drehungen des Raumes und Koordinatentransformationen*. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation PFG 4/2003, S. 311-316.

- [leica-geosystems, 2003] leica-geosystems: *ADS40 Airborne Digital Sensor*. Broschüre zum ADS40, Download von www-Seite: im November 2003  
ftp://ftp.gis.leica-geosystems.com/outgoing/docs/ada/ADS40\_Brochure.pdf.
- [Mostafa et al., 2001]: Mostafa, M., Hutton, J., Reid, B. (2001): *GPS/IMU Products – the Applanix Approach*. Photogrammetric Week '01, Eds. D. Fritsch/R. Spiller, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [McCarthy, 1996] McCarthy, D.D. (1996): *IERS Conventions (1996)*. IERS Techn. Note 21, Observatoire de Paris, Paris.
- [McGlone, 2004] McGlone, J.C. (2004): *Manual of Photogrammetry*. Fifth Edition. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (asprs), Editor: J. Chris McGlone, Associate Editors: Edward M. Mikhail, James Bethel.
- [Pillman und Kellner, 2001] Pillmann, W., Kellner, K. (2001): *Monitoring of Green Urban Spaces and Sealed Surface Areas*. In: 2nd Internat. Symposium „Remote Sensing of Urban Areas“, 22-23 June 2001, Regensburg, Germany.
- [Portalés Ricart, 2002]: Portalés Ricart, C. (2002): *Georeferencing of GPS/INS-Supported Airborne Multispectral Scanner Data*. Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien.
- [Ressl, 2001] Ressler, C. (2001): *The OEEPE-Test 'Integrated Sensor Orientation' and its Handling within the Hybrid Block-Adjustment Program ORIENT*. veröffentlicht in: OEEPE Workshop "Integrated Sensor Orientation", 17. - 18. September 2001, Hannover (published only as CD-Rom).
- [Ressl, 2002] Ressler, C. (2002): *The Impact of Conformal Map Projections on Direct Georeferencing*. Symposium der ISPRS-Comm. III, Graz, 9 - 13 September 2002. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV / 3A, pp. 283-288.
- [Ries et al. 2001] Ries, C., Kager, H., Ressler, C., Stadler, P., (2001): *Rektifizierung von Flugzeugscanneraufnahmen mit Hilfe von Splinefunktionen*. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 9., 2001, S. 229 - 236.
- [Ries et al. 2002a] Ries, C., Kager, H., Stadler, P., (2002): *High-Quality Geo-Referencing of GPS/IMU-supported Multi-Spectral Airborne Scanner Data Experiences and Results*. PCV'02 - PHOTOGRAMMETRIC COMPUTER VISION 2002, September 9 - 13, 2002, Graz, Austria. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume XXXIV / 3B Comm. III, pp. 222-226.
- [Ries et al. 2002b] Ries, C., Kager, H., Stadler, P., (2002): *GPS/IMU-unterstützte Georeferenzierung der Daten flugzeuggetragener multispektraler Scanner*. 22. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung 2002, 24.09.-26.09.02 Neubrandenburg, in Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 11, S. 59 - 66.
- [Ries et al. 2002c] Ries, C., Pillmann, W., Kellner, K., Stadler, P. (2002): *Urban Green Space Management Information - Processing and Use of Remote Sensing Images and Scanner Data*. Proceedings of "Environmental Informatics 2002", 16th International Conference "Informatics for Environmental Protection", September 25-27, 2002, Vienna University of Technology, Part 1, S. 503 - 510.

- [Rothacher, 2000] Rothacher, M. (2000): *Raumfeste und erdfeste Bezugssysteme*. In Tutorial 1 „Bezugssysteme in Lage und Höhe“ von A. Bauch, M. Rothacher und R. Rummel zum Kurs Ingenieurvermessung 2000, XIII. International Course on Engineering Surveying, 13.-17. März 2000, IAPG/FESG No.7, Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Forschungseinrichtung Satellitengeodäsie, Technische Universität München, München 2000. www-Download im Jänner 2003: <http://step.iapg.verm.tu-muenchen.de/iapg/index.html> → Veröffentlichungen → Schriftenreihen.
- [Rottensteiner, 2001] Rottensteiner, F. (2001): *Semi-Automatic Extraction of Buildings Based on Hybrid Adjustment Using 3D Surface Models and Management of Building Data in a TIS*. Geowissenschaftliche Mitteilungen, Heft 56, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation der technischen Universität Wien, Wien, Mai 2001.
- [Schwarz, 1996] Schwarz, K.P. (1996): *Aircraft Position and Attitude Determination by GPS and INS*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS) Vol. XXXI, Part B6, Vienna 1996, S.67-73.
- [Skaloud und Schwarz, 1998] Skaloud, J., Schwarz, K.P. (1998): *Accurate Orientation for Airborne Mapping Systems*. ISPRS Commission II, Symposium on Data Integration: Systems and Techniques, Cambridge, UK, July 13-17 1998, S.283-290.
- [Skaloud, 1999] Skaloud, J. (1999): *Problems in Direct-Georeferencing by INS/DGPS in the Airborne Environment*. ISPRS Workshop on ‘Direct versus Indirect Methods of Sensor Orientation’ WG III/1, Barcelona 25-26, 1999.
- [Vexcel Imaging Austria, 2003] Vexcel Imaging Austria: *UltraCam-D large Format Digital Aerial Camera*. Broschüre zur UltraCam-D (UltraCam-4Page-Flier-Reduce.pdf), Download von www-Seite im November 2003: <http://www.vexcel.com/PDFs/datasheets/Camera/UltraCam-4Page-Flier-Reduce.pdf>.
- [Wegmann, 2002] Wegmann, H. (2002): *Image Orientation by Combined (A)AT with GPS and IMU*. ISPRS Commission I Mid-Term Symposium in conjunction with Pecora 15/Land Satellite Information IV Conference “Integrated Remote Sensing at the Global, Regional and Local Scale”, 10-15 November 2002, Denver, CO USA. Download von www-Seite: [www.isprs.org/commission1/proceedings/contents\\_isprs.html](http://www.isprs.org/commission1/proceedings/contents_isprs.html) im September 2004.
- [Wells, 1987] Wells, D. (1987): *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates, Fredericton, N.B. Canada.
- [Wewel et al., 1998] Wewel, F., Scholten, F., Neukum, G. und Albertz, J. (1998): *Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC – Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie*. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation PFG 6/1998, S. 337-348.
- [Z/I-Imaging, 2003] Z/I-Imaging: *Digital Mapping Camera System*. Broschüre zur DMC (ZI30015\_DMC\_Brochure\_New8.pdf), Download von www-Seite: <http://www.ziimaging.com/productPages/dmc.htm> im November 2003.

**Zusammenfassung der im Text angegebenen www-Hinweise:**

Abschnitt 3.1:

<http://www.iers.org/iers/>

International Earth Rotation Service

Abschnitt 3.2:

<http://lareg.ensg.ign.fr/>

Laboratoire de Recherches en Geodesie LAREG

<http://lareg.ensg.ign.fr/ITRF/>

Informationen zum ITRS

<http://lareg.ensg.ign.fr/EUREF/>

Informationen zum ETRF

Abschnitt 8.1:

<http://www.igi-ccns.com/index.html>

IGI Ingenieur-Gesellschaft für Interfaces mbh

<http://www.omnistar.nl>

OmniSTAR



# 11 Anhang

## 11.1 Beobachtungskategorien und zugehörige Parameter in ORIENT

Tab. 11-1 zeigt die beim mathematischen Modell in Kapitel 6 besprochenen Beobachtungskategorien und deren Parameter, wobei die in ORIENT gebräuchlichen Bezeichnungen verwendet werden.

Beobachtungs-kategorie	Parameter der Abbildungsfunktion					Objekt-punkt $P$
	äußerer Referenz-punkt $P_0$	Rotation $\Theta$	innerer Referenz-punkt $p_0$	Maßstab $\lambda$	Zusätzliche Parameter / Knoten-parameter $adp / t-par$	
PHOTO	Projection Center	Rotation Parameter	Inner Orientation		Distortion Parameter	Object Point
CONPOI (Control Point)						Object Point
MODEL	Origin	Rotation Parameter		Scale	Polynom-Parameter	Object Point
GESTALT	Origin	Rotation Parameter			Polynom-Parameter	Object Point
SPLINE	knot-Origin				knot- $t$ -Parameter	Object Point
PIXEL-PHOTO-Polynomial	Projection Center	Rotation Parameter	Inner Orientation		Orbit-Polynom-Parameter	Object Point
PIXEL-PHOTO Spline	knot-Projection Center	knot-Rotation Parameter	Inner Orientation		knot- $t$ -Parameter und ggf. Orbit-Polynom-Parameter	Object Point

Tab. 11-1: Beobachtungskategorien und deren zugeordnete Parameter in ORIENT mit den in ORIENT üblichen Bezeichnungen.

Erläuterungen der Abkürzungen der Beobachtungskategorien in Tab. 11-1:

*PHOTO*: Beobachtungsraum für Bildkoordinaten von Aufnahmen von Flächenkameras

*CONPOI*: Beobachtungsraum für Passpunkte

*MODEL*: Beobachtungsraum für Modellkoordinaten

*GESTALT*: Beobachtungsraum für fiktive Beobachtungen auf Flächen, Geraden oder Polynomen

*SPLINE*: Beobachtungsraum für fiktive Beobachtungen auf 3D-Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen. Der kurze und prägnante Begriff SPLINE wird in ORIENT unabhängig von der Interpolationsart für Kurven aus zusammengesetzten Polynomen verwendet. Welche Interpolationsart tatsächlich angewendet wird, wird mit Hilfe des Sub-Typs des Raumes festgelegt.

*PIXELPHOTO - polynomial*: Beobachtungsraum für Bildkoordinaten in Aufnahmen von Zeilenkameras oder Rotationsscannern mit Polynom-Orientierung;

*PIXELPHOTO - Spline*: Beobachtungsraum für Bildkoordinaten in Aufnahmen von Zeilenkameras oder Rotationsscannern mit Orientierungsfunktion aus zusammengesetzten kubischen Polynomen

Erläuterungen der Abkürzungen im Parameterbereich in Tab. 11-1:

*knot*: Kurzbezeichnung für Knotenpunkte einer Kurve aus zusammengesetzten kubischen Polynomen

*knot-t-Parameter*: Kurvenparameter  $t$  für die Knotenpunkte von Kurven aus zusammengesetzten kubischen Polynomen

*knot-Origin*: Knotenpunkte einer 3D-Kurve

*knot-Projection Center* und *knot-Rotation Parameter*: Knotenpunkte der sechsdimensionalen Orientierungsfunktion von Scanneraufnahmen

*zusätzliche Parameter (additional Parameters ADP)*: zusätzliche Parameter können recht unterschiedliche Bedeutungen haben, sie beschreiben zum Beispiel einmal die Kameraverzeichnung (Abschnitt 6.2) oder in einem anderen Fall die Form einer polynomialen Fläche oder Kurve (Abschnitt 6.5). Alle zusätzlichen Parameter werden in ORIENT in ADP-Räumen gespeichert. Die Punkte der Punktliste in den ADP-Räumen besteht aus Punkten mit einer Koordinate, wobei jeder Punkt einen zusätzlichen Parameter repräsentiert und in der Punktnummer die Interpretation dieses Parameters kodiert.

*Distortion Parameter*: zusätzliche Parameter zur Beschreibung der Verzeichnung einer Flächenkamera.

*Polynom-Parameter* bei den Beobachtungskategorien MODEL und GESTALT: Polynomkoeffizienten gemäß Gleichung (6-8) und Gleichung (6-10) zur Beschreibung der „Verbiegung“ des Modells bzw. der Form der polynomialen Fläche oder Kurve.

*Orbit-Polynom-Parameter*: Polynomkoeffizienten zur Beschreibung der Variation der äußeren Orientierung von Scanneraufnahmen entsprechend Abschnitt 6.7. Der Begriff Orbit wird als Kurzbeschreibung für die äußeren Orientierungsparameter entlang der Flugbahn des Scannersystems verwendet.

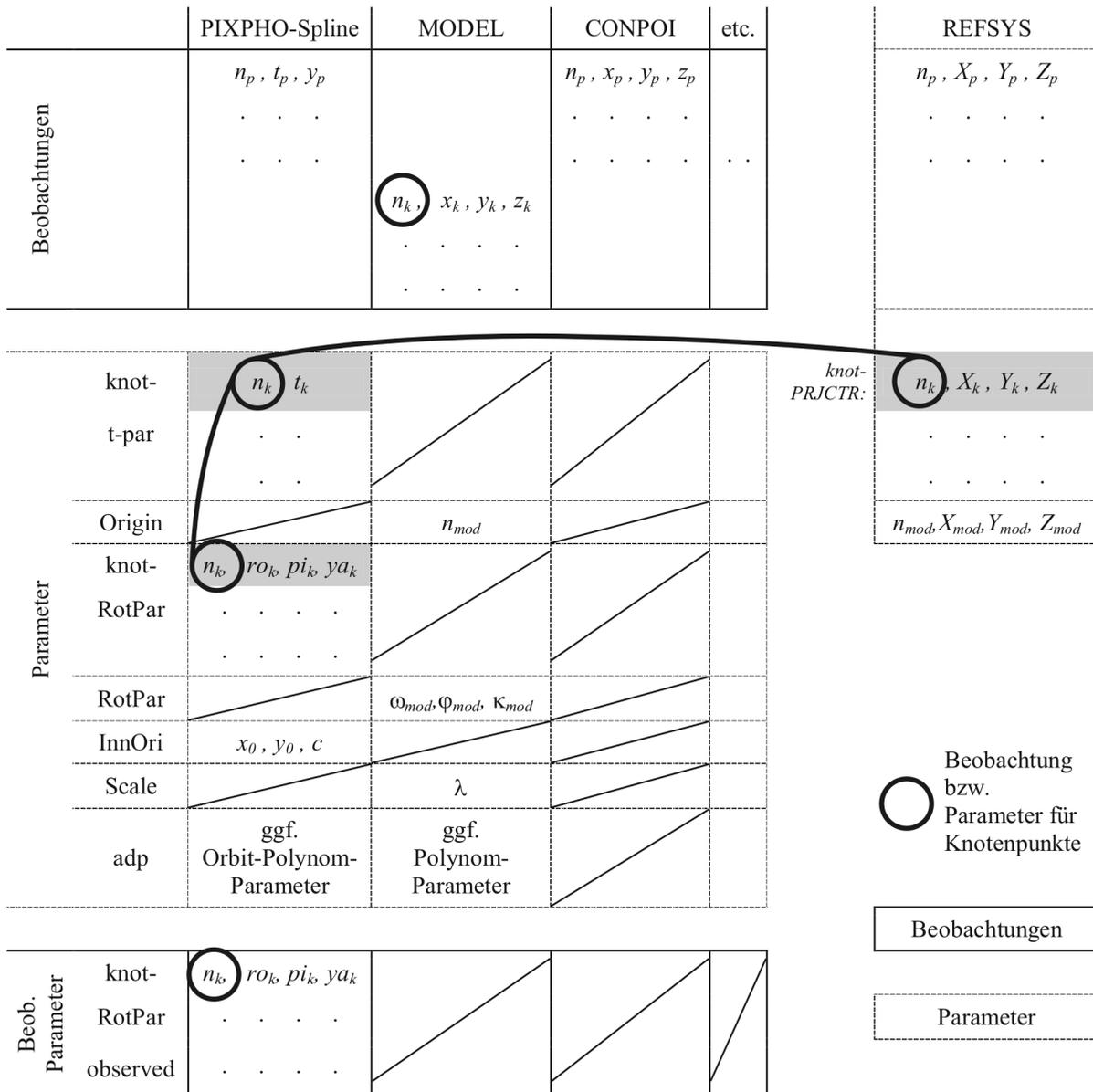


Abb. 11-1: Datenstruktur in ORIENT für eine Scanneraufnahme mit GPS/INS-Beobachtungen der äußeren Orientierung

(Abkürzungen: *PIXPHO* = PIXELPHOTO; *knot-t-par* = knot-t-Paramameter; *RotPar* = Rotation Parameter; *knot-PRJCTR* = knot-Projection Center; *InnOri* = Inner Orientation; *ADP* = Additional Parameter; *knot-RotPar observed* = beobachtete Rotationsparameter).

Anmerkung: Der Übersichtlichkeit halber wurde auf die Darstellung der Genauigkeitsangaben der Beobachtungen in der Abbildung verzichtet; ORIENT bietet grundsätzlich die Möglichkeit, für jede Beobachtung eine eigene Genauigkeitsangabe zu machen.

Abb. 11-1 zeigt, wie die ORIENT-Datenstruktur im Falle einer Scanneraufnahme mit direkten GPS/INS-Beobachtungen der äußeren Orientierungsparameter entlang der Flugbahn aussieht. In der Scanneraufnahme sind  $p$  Bildpunkte  $p_p$  gemessen. Die Parametrisierung der Orientierungsfunktion der Scanneraufnahme ist konstant und durch den Index der Zeilennummer vorgegeben, daher ist die gemessene  $x$ -Komponente der Bildpunkte gleich

dem Kurvenparameter  $t$  der Orientierungsfunktion. Die Punkte  $p_p$  mit ihrer Punktnummer  $n_p$  und ihren Bildkoordinaten  $(x_p=t_p, y_p)$  und gegebenenfalls deren Genauigkeiten bilden die Punktliste im Beobachtungsraum PIXPHO-Spline. Die  $k$  sechsdimensionalen Knotenpunkte  $K_k$  der Orientierungsfunktion beschreiben den Verlauf der äußeren Orientierung entlang der Flugbahn. Die Parameter  $t_k$  der Knotenpunkte sind im Parameterraum knot-t-par enthalten, die 3D-Objektkoordinaten  $(X_k, Y_k, Z_k)$  der Knotenpunkte sind im Referenzsystem REFSYS und die drei Drehwinkel der Knotenpunkte  $(ro_k, pi_k, ya_k)$  sind im Parameterraum knot-RotPar gespeichert. Die zu jedem Knotenpunkt in den verschiedenen Räumen befindlichen Parameter (in Abb. 11-1 grau hinterlegt) werden über die Punktnummer  $n_k$  gefunden, wie in Abb. 11-1 durch die mit Kreisen gekennzeichneten Punktnummern  $n_k$  und den Verbindungslinien dazwischen dargestellt ist. Die Parameter der inneren Orientierung des Aufnahmesystems sind im Parameterraum InnOri enthalten. Und schließlich können im adp-Raum noch zusätzliche Orbit-Polynom-Parameter definiert sein.

GPS/INS-Beobachtungen für Flugzeugscanneraufnahmen stellen in ORIENT (in der zur Zeit der Projektbearbeitung verfügbaren Implementierung in ORIENT) direkte Beobachtungen der Knotenpunkte der Orientierungsfunktion dar. Dazu werden die Positionsbeobachtungen in einem Modell und die Rotationsbeobachtungen in einem Beobachtungsraum für die Rotationsparameter der Knotenpunkte gespeichert, welcher in Abb. 11-1 als „knot-RotPar-observed“ bezeichnet wird. Die Zuordnung der einzelnen GPS/INS-Beobachtungen zu den jeweiligen Knotenpunkten der Orientierungsfunktion wird über die Punktnummer  $n_k$  gewährleistet (in Abb. 11-1 wieder mittels Kreise gekennzeichnet). Sind die GPS/INS-Beobachtungen in das Objektkoordinatensystem transformiert, wird man für die Abbildungsparameter des Modells, äußerer Referenzpunkt (origin)  $n_{mod}$ , Rotationen  $(\omega_{mod}, \varphi_{mod}, \kappa_{mod})$  und Maßstab  $\lambda$ , in der Regel Defaultwerte für eine Einheitstransformation einsetzen.

Aufgrund der hohen Frequenz der GPS/INS-Beobachtungen ist der Knotenpunkt Abstand sehr dicht, im Extremfall sogar ein Knoten pro Aufnahmezeile. Damit legen die GPS/INS-Beobachtungen den Verlauf der Orientierungsfunktion (eindeutig) fest und bilden ein sechsdimensionales Modell der Orientierungsfunktion. Es ist in diesem Fall nicht davon auszugehen, mit Hilfe von Pass- und Verknüpfungsinformationen einzelne (fehlerhafte) Knoten verbessern zu können. Aufgrund des GPS/INS-Fehlerverhaltens ist dies auch nicht notwendig, denn die GPS/INS-Beobachtungen weisen eine sehr hohe relative Genauigkeit auf. Sie können jedoch systematische Restfehler gegenüber dem Objektkoordinatensystem, wie Verschiebungen, Verdrehungen und Drifteffekte, aufweisen. Folgen diese systematischen Restfehler einem polynomialen Verlauf, kann man sie mit den zusätzlichen Polynom-Parametern des MODELS bzw. den zusätzlichen Orbit-Polynom-Parameter des PIXPHO-Splines modellieren, und die entsprechenden Werte der Polynomparameter mit Hilfe von Pass- und Verknüpfungsinformationen bestimmen.

Im Falle einer indirekten Sensororientierung sind keine GPS/INS-Beobachtungen vorhanden, und das MODEL mit den Positionsbeobachtungen für die Knotenpunkte fällt weg. Auch die direkten Beobachtungen der Rotationen im Parameterraum knot-RotPar-observed fallen weg, jedoch müssen an die Stelle der GPS/INS-Rotationsbeobachtungen teilweise fiktive Beobachtungen treten. Zum Beispiel kann man der hohen Korrelation zwischen Verschiebung in Flugrichtung und Pitch und daraus resultierenden Singularitäten in der Ausgleichung mit fiktiven Beobachtungen  $pi_k = 0$  im Beobachtungsraum knot-RotPar-observed begegnen. Die Knotenpunkte der Orientierungsfunktion müssen in diesem Falle allein mittels der Bildpunkte und den zugehörigen Pass- und Verknüpfungsinformationen bestimmt werden.

## Lebenslauf

19. Juni 1971	Geboren in Linz/Donau als drittes Kind von Maria und Alfred Ries, Landwirte
1977 - 1981	Besuch der Volksschule in Altschwendt
1981 - 1989	Besuch des Bundesgymnasiums Schärding, in der Oberstufe Besuch des realistischen Zweiges
10/1989	Reifeprüfung
1989-1997	Studium an der Technischen Universität Wien, Studienrichtung Vermessungswesen, Wahlfachgruppe Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie
6/1997	Sponsion zur Diplomingenieurin für Vermessungswesen
seit 10/1997	Doktoratsstudium der technischen Wissenschaften an der Technischen Universität Wien
7/1997 - 9/1997 und 2/1998	Forschungsassistentin am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien
9/1998 - 7/2002	Universitätsassistentin am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien
seit August 2002	Mitarbeiterin im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Abteilung V2 - Fernerkundung