

DEUTSCHE GEODÄTISCHE KOMMISSION
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C

Dissertationen

Heft Nr. 589

Norbert Haala

Multi-Sensor-Photogrammetrie

München 2005

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

ISSN 0065-5325

ISBN 3 7696 5028 X

Multi-Sensor-Photogrammetrie

Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
der Universität Stuttgart

Habilitationsschrift

vorgelegt von

Dr.-Ing. Norbert Haala

München 2005

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

Deutsche Geodätische Kommission

Marstallplatz 8 • D – 80 539 München

Telefon +49 - (0)89 - 23 031 -0 / -1113 • Telefax +49 - (0)89 - 23 031 -1283 / -1100

E-mail hornik@dgfi.badw.de • <http://dgk.badw.de>

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dieter Fritsch

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Karl Kraus

Prof. Dr.-Ing. Alfred Kleusberg

Tag der Einreichung: 30. April 2003

Tag des Habilitationskolloquiums: 27. Oktober 2004

© 2005 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

Inhalt

Zusammenfassung	5
Summary	6
1 Einleitung	7
1.1 Orientierungssensoren	7
1.2 Abbildende Sensoren	8
1.3 GIS-Daten	9
2 Direkte Georeferenzierung und Aerotriangulation	10
2.1 Direkte Messung von Parametern der äußeren Orientierung	11
2.1.1 Positionierung und Orientierung mit inertialen Meßsystemen	11
2.1.2 Integration von GPS/inertial-Systemen zur direkten Georeferenzierung	14
2.1.3 Alternative Formulierungen des Kalman-Filters	16
2.2 Systemkalibrierung durch kombinierte Aerotriangulation.....	18
2.2.1 Grundlagen der Aerotriangulation.....	18
2.2.2 Geometrische Kalibrierung des Gesamtsystems.....	22
2.3 Kombinierte Aerotriangulation zur Korrektur der direkten Georeferenzierung	24
2.3.1 Streifenweiser Integrationsansatz	24
2.3.2 Orientierungspunktansatz	26
2.4 Erreichbare Genauigkeiten und Anwendungsbeispiele.....	31
2.4.1 Untersuchungen mit Standard-Luftbildkameras	31
2.4.2 Untersuchungen mit flugzeuggetragenen Zeilenkameras	34
3 Segmentierung und Klassifizierung von Bild- und Höhendaten	40
3.1 Erfassung Digitaler Oberflächenmodelle (DOM)	40
3.1.1 Automatische Stereobildzuordnung.....	41
3.1.2 Laserscanning.....	42
3.1.3 Qualität von Höhendaten in bebauten Gebieten	44
3.2 Klassifizierung bebauter Gebiete mit Bild- und Höhendaten	45
3.2.1 Morphologische Filterung von Höhendaten	46
3.2.2 Integration von Höhendaten als zusätzlicher Informationskanal	48
3.3 Bildgestützte Segmentierung von Digitalen Oberflächenmodellen	52
3.3.1 Lineare räumliche Segmente	53
3.3.2 Segmentierung von Ebenen.....	57

4	Kombination von 2D GIS und Höhendaten zur Erfassung von 3D Stadtmodellen	60
4.1	Erfassung von 3D Gebäudemodellen	60
4.2	Grundrissbasierte DOM-Segmentierung	62
4.2.1	Neigungsbasierte Segmentierung	62
4.2.2	Auswahl und Zusammenfassung ebener Regionen	64
4.3	Nutzung von Grundrissinformation zur Erzeugung der Gebäudetopologie	66
4.3.1	DOM-basierte Skelettierung von Grundrissen	66
4.3.2	Rekonstruktion durch Grundrisszerlegung	70
4.4	Einsatz von Bilddaten zur Visualisierung	76
4.4.1	Texturierung von Gebäudekörpern	76
4.4.2	Anforderungen an die Texturierung	80
5	GIS-basierte Georeferenzierung terrestrischer Aufnahmen	83
5.1	Orientierte Bilder zur Präsentation ortsbezogener Information	83
5.1.1	Darstellung von Umgebungsinformation in Navigationsanwendungen	83
5.1.2	Bildbasierter Zugriff auf Objektinformation	85
5.1.3	Genauigkeit der Koregistrierung	87
5.2	Georeferenzierung terrestrischen Bildern mittels Gebäudesilhouetten	88
5.2.1	Shape-Based-Matching - Formbasierte Zuordnung	89
5.2.2	Zuordnung der Gebäudesilhouetten	90
5.2.3	Bestimmung der äußeren Orientierung	92
6	Diskussion und Ausblick	95
7	Literaturverzeichnis	97

Zusammenfassung

Ziel der Arbeit ist es, anhand verschiedener Beispiele die Bedeutung und das zukünftige Potential von Multi-Sensor-Systemen für die photogrammetrische Datenerfassung zu dokumentieren. Neben dem Einsatz dieser Multi-Sensor-Systeme für die Automatisierung klassischer photogrammetrischer Aufgabenstellungen wie der Erfassung raumbezogener Daten soll dabei auch die mögliche Erweiterung der Aufgabengebiete photogrammetrischer Techniken aufgezeigt werden.

Die Kombination verschiedener Sensoren wird in dieser Arbeit zunächst am Beispiel der Integration von Orientierungssensoren für geometrische Auswerteaufgaben aufgezeigt. Solche Orientierungssensoren wie integrierte GPS/inertial-Systeme werden zunehmend in die geometrische Auswertung photogrammetrischer Daten eingebunden. Dadurch ist eine direkte Georeferenzierung zur Bestimmung der Transformation photogrammetrischer Aufnahmen in ein Referenzkoordinatensystem möglich. Insbesondere für luftgestützte photogrammetrischen Anwendungen ist dieser Ansatz eine mittlerweile häufig genutzte Alternative gegenüber der klassischen indirekten Orientierung durch Verfahren der Aerotriangulation. Neben dem Genauigkeitspotential der direkten Georeferenzierung und den sich daraus ergebenden Anwendungsszenarien wird in dieser Arbeit insbesondere die Einbindung der gemessenen Orientierungsparameter in den photogrammetrischen Auswerteprozess diskutiert. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die Kalibrierung des Gesamtsystems und ermöglicht zudem die gegenseitigen Stützung bei einer Auswertung der verschiedenen Datenquellen, mit der flexibel auf unterschiedliche Genauigkeitsanforderungen und Anwendungsszenarien reagiert werden kann.

Das Potential integrierter GPS/inertial-Systeme wird auch am Beispiel von Untersuchungen mit digitalen Luftbildkameras diskutiert, die eine Erfassung geometrisch hochaufgelöster Multispektralbilder ermöglichen. Neben den Aufnahmen solcher Systeme stehen mit den Distanz- bzw. Höhenmessungen flugzeuggetragener Laserscanner weitere Primärdaten zur Verfügung, die gegenüber den klassischen panchromatischen Luftbildern erheblich besser für eine automatisierte Rekonstruktion topographischer Objekte geeignet sind. Die Kombination von Bild- und Höhendaten für die Erfassung thematischer Objektinformation wird in dieser Arbeit am Beispiel der Klassifizierung bebauter Gebiete aufgezeigt. Ein weiteres Beispiel ist die kombinierte Segmentierung von Bild- und Höhendaten als wichtiger Vorverarbeitungsschritt für eine anschließende 3D Objektrekonstruktion. Dabei werden die Vorteile beider Datenquellen für die semantische Auswertung - die einfachere automatische Interpretation von Höhendaten durch die Reduktion auf geometrische Information sowie die große Informationsdichte von Luftbildern - genutzt.

Neben unterschiedlichen Sensoren für die Erfassung von Primärdaten sind in vielen Bereichen bereits existierende GIS-Daten verfügbar. Die Nutzung dieser Daten kann in übertragenem Sinn ebenfalls als Integration zusätzlicher Sensordaten bezeichnet werden. GIS-Daten repräsentieren bereits interpretierte und damit sehr hochwertige Information. Ihre Einbindung in die thematische und geometrische Auswertung von Primärdaten ermöglicht damit einen hohen Grad an Automatisierung. Die Nutzung existierender GIS-Daten wird in dieser Arbeit am Beispiel der Erweiterung von zweidimensionalen Gebäudeumrissen zu 3D Stadtmodellen diskutiert. Die Gebäudeumrisse stützen in diesem Verfahren die Segmentierung der Höhendaten und erlauben zudem eine zielgerichtete Strukturierung der dabei extrahierten dreidimensionalen geometrischen Primitive.

Der zunehmende Einsatz von 3D Stadtmodellen für die Visualisierung virtueller Landschaften zeigt, wie durch verbesserte Methoden der Datenerfassung neue Anwendungen für photogrammetrische Produkte entstehen können. Ein weiteres Beispiel für das Potential von Multi-Sensor-Systemen ist die im letzten Teil der Arbeit diskutierte Nutzung von 3D Stadtmodellen für die GIS-basierte Georeferenzierung terrestrischer Aufnahmen. Die damit mögliche automatische Koregistrierung terrestrischer Bilder mit einem virtuellen Modell der Umgebung kann beispielsweise für die Erweiterung oder Nachführung der vorhandenen Gebäudemodelle genutzt werden. Darüber hinaus ist durch die orientierten terrestrischen Bilder die Präsentation und der Zugriff auf objektbezogene Information im Rahmen ortsbezogener Dienste möglich. Damit ist ein solches Verfahren ein gutes Beispiel zur Demonstration des Potentials von Multi-Sensor-Systemen in zukünftigen photogrammetrischen Anwendungsszenarien.

Summary

The application of multi-sensor systems for photogrammetric data collection has reached considerable interest. Within this habilitation treatise, their potential for spatial information collection is discussed exemplarily in the context of different application scenarios. This includes the increased degree of automation, which can be achieved for standard data processing as well as the chance to open up new areas of application for photogrammetric products and techniques.

The combination of multiple sensors is first demonstrated by the example of integrated GPS/inertial systems, which are used to provide the transformation of the collected imagery to a reference coordinate system. This direct georeferencing is applied for the geometric evaluation of airborne imagery alternatively to the indirect approach of image orientation based on standard aerial triangulation. Within the first part of the thesis the accuracy potential and different application scenarios of direct georeferencing are discussed. Another main point of interest is the suitable integration of the directly measured orientation parameters with the photogrammetric evaluation process. The combination of direct georeferencing and aerial triangulation is an important prerequisite for the calibration of the overall system. Additionally, the integrated processing allows to use the different sensors as complementary sources of information and helps to provide optimal solutions with respect to different application scenarios and accuracy requirements.

The potential of integrated GPS/inertial systems is discussed exemplarily using data of digital airborne cameras. These systems facilitate the acquisition of multispectral images at high spatial resolution. Complementary to these sensors, airborne laser scanning provides an alternative data source, which is advantageous if the automatic collection of thematic object information is aspired. Compared to the use of standard panchromatic aerial images, especially the combination of image and height data is beneficial for the automatic reconstruction of topographic objects. Within the thesis this is demonstrated by a process aiming on the combined classification of built-up areas. The advantages of integrating height and image data are also discussed by the example of a combined segmentation process, which aims on the extraction of three-dimensional geometric primitives like straight lines and planar regions. Such an extraction of reliable and accurate geometric primitives is an important preprocessing step for 3D object reconstruction. For this reason, the segmentation combines the advantages of both data sources, the relatively simple interpretation of height data due to the restriction to geometric information on the one hand and the high density of information available from aerial images on the other hand.

In addition to primary data sources as they are provided from different photogrammetric sensors, GIS data is frequently already available for a number of application scenarios. In the figurative sense, the use of GIS data can also be interpreted as the integration of a additional sensor data. The availability of GIS during automated collection of topographic objects is especially useful, since GIS provides information from already interpreted data. Within the thesis the advantages of use of existing GIS is demonstrated by processes aiming on the reconstruction of 3D building models from dense height models. Within the process given outlines of the buildings are integrated in order to support the segmentation process and to detect the underlying structure of the extracted geometric primitives.

If improved methods of photogrammetric data collection are available new markets for new products can be opened. One example is the increasing demand for 3D city models, which are frequently applied in the context of virtual landscape visualisation. These 3D city models can also be integrated to a suitable multi-sensor, multi-data system in order to allow for a GIS-based georeferencing of terrestrial images. Such an automatic registration of terrestrial images to a virtual 3D model of the environment is for example required during update or extension of the visible building models. As it is discussed in the final part of the thesis, the result of this orientation process can also be used for the presentation of object related information in the context of location based services.

1 Einleitung

Ziel der Photogrammetrie ist die Erfassung geometrischer und thematischer Objektinformationen aus Bildern. Die Hauptanwendungen liegen dabei in der Erfassung und Nachführung raumbezogener Daten für Geoinformationssysteme aus Luft- und Satellitenaufnahmen. Standardprodukte photogrammetrischer Auswerteverfahren sind Orthophotos, Digitale Geländemodelle und zwei-, beziehungsweise dreidimensionale Rekonstruktionen topographischer Objekte wie Strassen oder Gebäude. Üblicherweise liefern diese Produkte die Datengrundlage für Kartierungen, thematische Untersuchungen oder Simulationen. Darüber hinaus resultiert die immer stärkere Verbreitung von Anwendungen der dreidimensionalen Visualisierung und Animation zu einer stetig wachsenden Nachfrage nach virtuellen Landschaftsmodellen, die ebenfalls photogrammetrisch erfasst werden.

Der traditionelle Schwerpunkt photogrammetrischer Auswertung ist die geometrische Analyse der aufgenommenen Bilder. Typische Aufgabenstellungen in diesem Kontext sind die Orientierung von Bildverbänden für die Georeferenzierung sowie die dreidimensionale Objektpunktbestimmung für die geometrische Erfassung der abgebildeten Oberflächen. Neben dieser geometrischen Auswertung gewinnt die automatische Bildinterpretation im Rahmen der thematischen Auswertung zunehmend an Bedeutung. Ziel dieser thematischen Auswertung ist in der Regel die Erfassung und Nachführung topographischer Objektinformation aus photogrammetrischen Basisdaten.

Diese Arbeit soll exemplarisch das Potential von Multi-Sensor-Systemen für die Lösung dieser geometrischen und thematischen Auswerteaufgaben aufzeigen. Die Grundidee von Multi-Sensor-Systemen liegt dabei darin, komplexe photogrammetrische Aufgabenstellungen effizient zu lösen, indem komplementäre, für die automatische Prozessierung gut geeignete Information durch verschiedene Datenquellen und Sensoren bereitgestellt und in die Auswertung integriert wird. Die Stützung der geometrischen Auswertung wird in dieser Arbeit am Beispiel der Integration von Orientierungssensoren in das klassische Verfahren der Aerotriangulation aufgezeigt. Der Einsatz von Multi-Sensor-, Multi-Daten-Systemen für die thematische Auswertung wird anhand von Beispielen der kombinierten Nutzung von Multispektral-, Höhen- und existierenden GIS-Daten demonstriert. Neben dem Einsatz dieser Multi-Sensor-Systeme für die Automatisierung klassischer photogrammetrischer Aufgabenstellungen bei der Erfassung raumbezogener Daten soll zudem die mögliche Erweiterung der Aufgabengebiete photogrammetrischer Techniken am Beispiel der Visualisierung von Stadtlandschaften und der Bereitstellung ortsbezogener Dienste aufgezeigt werden.

1.1 Orientierungssensoren

Die Georeferenzierung erfasster Bilder durch die Transformation in ein übergeordnetes Referenzkoordinatensystem steht üblicherweise am Beginn des photogrammetrischen Auswerteprozesses. Die hierfür durchzuführende Rekonstruktion der äußeren Orientierung von Bildern oder Bildverbänden erfolgt traditionell durch die Auswertung von Koordinaten korrespondierender Bild- und Objektpunkte. Mit dem Aufkommen von GPS zur Bestimmung von Kamerastandpunkten wurden zur Lösung dieser Aufgabe erstmals Parameter der äußeren Orientierung direkt gemessen und als zusätzliche Sensordaten mittels einer GPS-gestützten Aerotriangulation in den Auswerteprozess integriert. Die Verbreitung alternativer Methoden zur Bildorientierung wurde zudem durch die Entwicklung digitaler photogrammetrischer Aufnahmesysteme stimuliert, da eine Reihe dieser Kameras auf dem Prinzip der zeilenweisen Bildaufnahme basiert. Bei diesen Systemen ist eine Bestimmung der Bildorientierung ausschließlich nach der traditionellen indirekten Methode der Aerotriangulation nicht mehr möglich. Die direkte Messung aller benötigter Orientierungsparameter durch inertielle Meßsysteme ist in diesem Fall unumgänglich.

Zunächst war der Einsatz der direkten Georeferenzierung auf die Prozessierung von Daten flugzeuggetragener, scannender Systeme beschränkt. Mittlerweile werden GPS/inertial-Systeme zunehmend auch für die Bestimmung der äußeren Orientierung von Standardluftbildern genutzt. Da die direkte Verfügbarkeit der Parameter der äußeren Orientierung eine erhebliche Vereinfachung und Flexibilisierung der geometrischen Auswertung photogrammetrischer Bilddaten ermöglicht, hat dies vor allem operationelle Gründe. Diesen Vorteilen steht das Grundproblem der direkten Georeferenzierung gegenüber, dass jeder Fehler der Systemkalibrierung direkt in die bestimmten Objektkoordinaten übertragen wird. Eine qualitativ hochwertige Georeferenzierung ist somit nur dann möglich, wenn sowohl für die einzelnen Komponenten als auch für das Gesamtsystem eine Kalibrierung mit ausreichender Genauigkeit durchgeführt wird. Diese Kalibrierung umfasst sowohl den abbildenden Sensor – in der Regel die Kamera – als auch die zur Bestimmung der äußeren Orientierung verwendeten GPS/inertial-Sensoren. Wie in Kapitel 2 aufgezeigt, kann diese Kalibrierung durch die Integration von **direkter Georeferenzierung und Aerotriangulation** erfolgen. Wie dabei insbe-

sondere am Beispiel der geometrischen Auswertung von Daten digitaler Luftbildkameras diskutiert wird, ist so auch eine Kontrolle der erreichten Genauigkeiten und gegebenenfalls eine Stützung und Korrektur der direkten Georeferenzierung möglich. Die Integration von direkt gemessenen Parametern der äußeren Orientierung in die Aerotriangulation durch den Einsatz eines Multi-Sensorsystems ermöglicht darüber hinaus eine erhebliche Flexibilisierung photogrammetrischer Aufnahme- und Auswerteprozesse, so dass für unterschiedliche Anwendungsszenarien jeweils optimale Lösungen realisierbar sind.

Neben der Bestimmung der äußeren Orientierung werden bei der geometrischen Auswertung von Bildern häufig auch die zu den Bildpunkten gehörenden Objektkoordinaten der aufgenommenen Punkte bestimmt. Steht eine ausreichende Zahl zugeordneter Bildpunkte zur Verfügung, so ist dadurch die photogrammetrische Erfassung der Geometrie der abgebildeten Oberflächen möglich. Alternativ zur Oberflächenerfassung durch automatische Bestimmung von Punktkorrespondenzen werden hierfür vermehrt flugzeuggetragene Laserscanner genutzt. Diese ermöglichen basierend auf Laufzeitmessungen von reflektierten Laserpulsen eine sehr dichte und zuverlässige Bestimmung von dreidimensionalen Punktkoordinaten. Ursprünglich wurden Laserscanner ausschließlich für Aufgaben eingesetzt, die wie die Erfassung der Geländeoberfläche in Waldgebieten mittels Luftbilddaten nicht befriedigend lösbar war. Mittlerweile werden Laserscanner jedoch auch als zusätzliche abbildende Sensoren im Rahmen der photogrammetrischen Datenerfassung genutzt, um thematische Auswertungen durch die Integration von dichten Höhendaten zu unterstützen.

1.2 Abbildende Sensoren

Luft- und Satellitenbilder besitzen einen sehr hohen Informationsgehalt und sind damit sehr gut als Basis zur Extraktion topographischer Daten im Rahmen von thematischen Auswertungen geeignet. Da ein Operateur in der Regel Bilddaten problemlos interpretieren kann, wird diese Fähigkeit des menschlichen visuellen Systems für die interaktive und semi-automatische photogrammetrische Erfassung der abgebildeten Objekte genutzt. Demgegenüber erweist sich die vollständige Automatisierung dieses Prozesses als sehr schwierig. Automatische Verfahren sind auch nach jahrzehntelangen intensiven Bemühungen nicht in der Lage, die sehr unterschiedlichen und komplexen Aufgabenstellungen, die bei der Interpretation von Luft und Satellitenbildern auftreten, mit einer ausreichenden Flexibilität und Zuverlässigkeit lösen. Ein möglicher Ansatz, die automatische Erfassung topographischer Objekte zu ermöglichen besteht deshalb darin, die notwendige Interpretation der aufgenommenen Bilddaten durch die Nutzung zusätzlicher, komplementärer Informationsquellen zu unterstützen und damit zu vereinfachen.

Für thematische Auswertungen sind beispielsweise multispektrale Daten gut geeignet. Mit den in der Fernerkundung entwickelten Methoden der Klassifizierung stehen zudem bereits Verfahren zur Verfügung, die eine automatisierte Erfassung der benötigten Objektinformation ermöglichen. Mittlerweile werden durch digitale Luftbildkameras oder hochauflösende satellitengestützte Systeme multispektrale Bilder mit einer geometrischen Auflösung erfasst, die den Einsatz solcher Verfahren auch für photogrammetrische Anwendungen ermöglichen. Üblicherweise wird die Fernerkundung zur großräumigen Klassifizierung von Landnutzungsarten verwendet. Im Gegensatz dazu führt die höhere geometrische Auflösung bei photogrammetrischen Anwendungen zu einem erheblich größeren Detailreichtum der erfassten Szenen und einer großen Zahl an abgebildeten Objektarten. Vor allem in Bereichen wie bebauten Gebieten führt dies zu sehr komplexen Szenen, so dass eine automatische Auswertung der Multispektraldaten mit Standardverfahren der Klassifizierung nahezu unmöglich ist. Wird jedoch, wie in Kapitel 3 vorgestellt, eine gemeinsame **Segmentierung und Klassifizierung von Bild- und Höhendaten** durchgeführt, so ermöglicht die Nutzung komplementärer geometrischer und multispektraler Information eine automatisierte Erfassung topographischer Objekte auch in komplexen Gebieten. Dies wird am Beispiel der Klassifizierung von Strassen und Gebäuden in dicht bebauten Gebieten demonstriert. Die dabei genutzten dichten, durch flugzeuggetragene Laserscanner erfassten Höhendaten können nicht nur zur Unterstützung der automatisierten Erfassung zweidimensionaler GIS-Daten, sondern auch für die Extraktion geometrischer Primitive wie Bruchkanten oder ebener Flächen eingesetzt werden. Eine solche Segmentierung ist ein wichtiger Vorverarbeitungsschritt beispielsweise für die dreidimensionale Rekonstruktion von Gebäuden. Durch die a priori Beschränkung der Höhendaten auf rein geometrische Information ist insbesondere in dreidimensional strukturierten, bebauten Gebieten eine automatische Interpretation dieser Daten erheblich zielgerichteter möglich. Mit Daten eines Multi-Sensorsystems, das eine Kamera zur Bildaufnahme mit einem Laserscanner zur Erfassung von Höhendaten kombiniert, können somit bedeutungsvolle, für die Rekonstruktion wichtige Primitive aus den Höhendaten extrahiert werden, während die geometrisch höher aufgelösten Bilddaten eine genauere Lokalisierung dieser Elemente ermöglichen.

1.3 GIS-Daten

Durch den großen und stetig wachsenden Umfang bereits existierender GIS-Daten erweitert sich die Zielsetzung der photogrammetrischen Auswertung immer mehr von der Ersterfassung topographischer Information um die Überprüfung, Nachführung und Erweiterung vorhandener Bestände. Damit können neben abbildenden Sensoren wie Kameras und Laserscannern, die mit Orientierungssensoren wie GPS/inertial-Systemen kombiniert werden, zunehmend auch bereits erfasste Geodaten für die Auswertung genutzt werden. Obwohl GIS-Daten keine originären Messwerte darstellen, kann ihre Einbindung in Ansätze zur Erfassung topographischer Objekte oder zur Georeferenzierung von Bilddaten als ein Multi-Sensor Ansatz bezeichnet werden. Auch in diesem Fall wird die Automatisierung photogrammetrischer Auswerteprozesse durch die Nutzung komplementärer Information unterstützt. Da die thematischen Objektdaten in der Regel nicht explizit für eine solche Aufgabenstellung erfasst wurden, muss zunächst die relevante Information durch geeignete Verfahren aus den GIS-Daten extrahiert werden. Zudem sind vorhandene GIS-Daten unter Umständen bereits veraltet, so dass häufig auch eine Überprüfung durch aktuellere Aufnahmen abbildender Sensoren notwendig ist. Der große Vorteil existierender Geodaten liegt jedoch darin, dass sie das Ergebnis einer bereits erfolgten Interpretation sind. Damit repräsentiert daraus extrahierte Information implizit menschliches Vorwissen, das somit eine erhebliche Unterstützung automatischer Verfahren ermöglicht.

In Kapitel 4 wird die Nutzung existierender Geodaten am Beispiel der **Kombination von 2D GIS und Höhendaten zur Erfassung von 3D Stadtmodellen** demonstriert. Dabei werden gegebene GIS-Daten in Form von Gebäudeumrissen in die Segmentierung von Höhendaten integriert und für die anschließende Strukturierung der extrahierten dreidimensionalen Primitive genutzt. Dadurch wird eine dreidimensionale Rekonstruktion der Gebäude ermöglicht. Neben einer solchen Nutzung von zweidimensionalen kartographischen Daten für die dreidimensionale Objektrekonstruktion können existierende Geodaten auch für die automatische Georeferenzierung von Bilddaten und damit die Positionierung und Orientierung von abbildenden Sensoren genutzt werden. Eine solche Anwendung wird in Kapitel 5 am Beispiel der **GIS-basierten Georeferenzierung terrestrischer Aufnahmen** vorgestellt. Ziel dieses Ansatzes ist die Verbesserung der näherungsweise gemessenen äußeren Orientierung terrestrischer Aufnahmen in urbanen Gebieten. Zu diesem Zweck werden Silhouetten von Gebäuden in den Bildern den korrespondierenden Objekten eines gegebenen 3D Stadtmodells zugeordnet. Diese Zuordnung erlaubt nicht nur die automatische Georeferenzierung der Aufnahmen, sondern erlaubt auch eine Verknüpfung von Bild- und Objektdaten. Dies ermöglicht beispielsweise die Präsentation objektbezogener Information in ortsbewussten Anwendungen. Damit zeigt dieser Ansatz nicht nur exemplarisch die Möglichkeiten der simultanen Interpretation und Orientierung von Bildern durch ein Multi-Sensor-System, sondern demonstriert auch das Potential solcher Systeme, neue Anwendungen für den Einsatz photogrammetrischer Techniken zu erschließen.

2 Direkte Georeferenzierung und Aerotriangulation

Die Rekonstruktion der Parameter der äußeren Orientierung ist die Grundvoraussetzung für die weiterführende photogrammetrische Auswertung eines Bildes. Üblicherweise werden zu diesem Zweck Pass- und Verknüpfungspunkte genutzt und die Orientierungsparameter durch eine Bündelblockausgleichung oder Aerotriangulation bestimmt. Alternativ ist auch eine direkte Messung der Orientierungsparameter möglich, für die in photogrammetrischen Anwendungen üblicherweise integrierte GPS/inertial-Systeme eingesetzt werden. Ursprünglich wurde die direkte Georeferenzierung für die geometrische Auswertung von Bildern digitaler Zeilenkameras entwickelt. Solche Systeme wie die DPA (Müller et al 1994), WAAC (Sandau & Eckert 1996) oder HRSC (Wewel et al 1998) waren die ersten digitalen Kameras für die flugzeuggetragene photogrammetrische Datenerfassung. Durch eine vor-, nadir und rückwärtsblickende Zeile erfassen diese Kameras insgesamt drei Bildstreifen, deren Auswertung beispielsweise eine geometrische Rekonstruktion der Geländeoberfläche ermöglicht. Im Prinzip ist durch eine Auswertung der Bildstreifen auch eine Rekonstruktion der äußeren Orientierung für die einzelnen Zeilenbilder mittels Pass- und Verknüpfungspunkten möglich. Diese indirekte Georeferenzierung von Zeilenbildern setzt allerdings voraus, dass ein Bewegungsmodell angesetzt werden kann, das die zeitliche Änderung der äußeren Orientierung während der Bildaufnahme zu beschreiben. Dies ist mit ausreichender Genauigkeit nur bei satellitengestützten Aufnahmesystemen der Fall, deren Bahnverlauf in guter Näherung durch eine Keplerellipse oder ein Polynom niedriger Ordnung approximiert werden kann. Für flugzeuggetragene Plattformen ist dies aufgrund der hohen Bewegungsdynamik nicht möglich, die direkte Messung der Position und Orientierung der Kamera im Rahmen der geometrischen Bildauswertung ist damit unverzichtbar.

Aufgrund der zunehmenden Verfügbarkeit von GPS/inertial-Systemen wird die direkte Georeferenzierung mittlerweile verstärkt auch für die Auswertung von Standard-Luftbildaufnahmen eingesetzt. In diesem Fall sprechen vor allem operationelle Gesichtspunkte für die direkte Messung der Parameter der äußeren Orientierung. Ein Vorteil ist dabei der potentielle Zeitgewinn bei der Georeferenzierung durch die wegfällende Messung von Pass- und Verknüpfungspunkten. Darüber hinaus müssen Luftbilder bei einer direkten Georeferenzierung nicht mehr in der bekannten photogrammetrischen Blockkonfiguration aufgenommen werden. Dies ist insbesondere dann von Vorteil, wenn sehr kleine Gebiete erfasst werden sollen oder wenn sich linienförmige Flugpfade ergeben. Dies ist beispielsweise bei Anwendungen wie der Küstenüberwachung oder der Kontrolle von Überlandleitungen der Fall. Neben der Prozessierung von Zeilenbildern ist die direkte Georeferenzierung auch für die Auswertung von Daten flugzeuggetragener Laserscanner unumgänglich. Diese ermöglichen die geometrische Erfassung der Geländeoberfläche auf der Basis von Laufzeitmessungen von Laserpulsen. Durch die niedrige Flughöhe und Auflösung dieser Systeme sind die Anforderungen an die Georeferenzierung vergleichsweise gering. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel die weitere Diskussion auf die Auswertung von Bildern beschränkt, der Einsatz der dabei vorgestellten Techniken ist jedoch analog auch für die Georeferenzierung von Laserdaten möglich.

In Abschnitt 2.1 wird zunächst das Prinzip und das Genauigkeitspotential der direkten Messung der äußeren Orientierung durch integrierte GPS/inertial-Systeme diskutiert. Grundlage der direkten Georeferenzierung für photogrammetrische Anwendungen sind die in Abschnitt 2.1.1 vorgestellten inertialen Messverfahren, wobei aufgrund des ungünstigen Fehlerverhaltens dieser Systeme wie in Abschnitt 2.1.2 diskutiert, eine Stützung durch eine GPS-Positionierung erforderlich ist. Mögliche Formulierungen dieser GPS/INS-Integration werden in Abschnitt 2.1.3 kurz dargestellt. Grundvoraussetzung zur Nutzung der direkten Georeferenzierung ist die Kalibrierung des aus Orientierungs- und Aufnahmesensor bestehenden Gesamtsystems. Diese Kalibrierung erfordert eine Kombination von direkter Georeferenzierung und Aerotriangulation (Abschnitt 2.2). Nur durch eine solche kombinierte Aerotriangulation beziehungsweise integrierte Georeferenzierung ist eine durchgehende Kontrolle der Georeferenzierung und gegebenenfalls auch eine Korrektur der gemessenen Orientierungsparameter möglich (Abschnitt 2.3). Dabei kann eine solche Korrektur entweder durch den streifenweisen Integrationsansatz (Abschnitt 2.3.1) oder durch die Bestimmung von Orientierungspunkten (Abschnitt 2.3.2) erfolgen. Zum Abschluss dieses Kapitels wird in Abschnitt 2.4 die erreichbare geometrische Genauigkeit der direkten Georeferenzierung diskutiert. Die dabei vorgestellten Ergebnisse basieren sowohl auf Untersuchungen mit flugzeuggestützten Zeilenkameras (Haala et al 2000) als auch auf Tests mit Standard-Luftbildkameras (Cramer et al 2000) (Cramer 2001). Während Zeilenbilder den Nachweis hochfrequenter Effekte erlauben, ermöglichen Untersuchungen mit Standard-Luftbildkameras den unmittelbaren Vergleich der erreichbaren Genauigkeiten von direkter beziehungsweise integrierter Georeferenzierung und klassischer Aerotriangulation.

2.1 Direkte Messung von Parametern der äußeren Orientierung

Die hochpräzise kinematische Positionierung der Projektionszentren von Luftbildkameras durch differentielle GPS-Phasenbeobachtungen ist ein etabliertes Standardverfahren zur Reduktion der Anzahl benötigter Passpunkte bei der Aerotriangulation. Zusätzlich zu den damit verfügbaren Aufnahmepositionen werden die fehlenden Lageparameter der Kamera im Rahmen einer GPS-gestützten Aerotriangulation aus Messungen von Verknüpfungspunkten bestimmt. Damit ist für die Rekonstruktion der äußeren Orientierung im Prinzip keine weitere Information in Form von Passpunkten notwendig. Voraussetzung für die GPS-gestützte Aerotriangulation ist jedoch eine Datenerfassung mit Flächenkameras in einer Standard-Blockkonfiguration. Diese Beschränkungen hinsichtlich der Kamerageometrie und Aufnahmekonfiguration kann nur durch die vollständige Bestimmung aller Parameter der äußeren Orientierung im Rahmen einer direkten Georeferenzierung umgangen werden. In diesem Fall muss zusätzlich zur Positionsbestimmung durch GPS die Lage des Aufnahmesystems durch ein geeignetes Verfahren bestimmt werden.

Diese Lagebestimmung kann im Prinzip durch eine Kombination mehrerer GPS-Empfänger oder durch spezielle Mehrantennen GPS-Empfänger erfolgen. Für photogrammetrische Auswertungen sind jedoch die dabei erreichbaren Genauigkeiten der gemessenen Orientierungen in der Regel nicht ausreichend (Schade 2001). Limitierende Faktoren sind dabei die geringe Länge der Basislinien sowie Verformungen der Flugzeugstruktur, die bei zunehmender Länge der Antennenhebelarme an Einfluß gewinnen. Während für satellitengestützte Anwendungen noch Sternsensoren oder Sternkameras in Frage kommen, nutzen flugzeuggetragene Anwendungen der direkten Georeferenzierung inertielle Meßsysteme zur Bestimmung der Kameraorientierung. Die Grundlagen inertialer Meßsystemen werden in Abschnitt 2.1.1 diskutiert. Bei der Nutzung der gemessenen Parameter der äußeren Orientierung für photogrammetrische Anwendungen ist insbesondere das Fehlverhalten dieser Systeme von Interesse. Dabei zeigt sich, dass aufgrund dieses Fehlverhaltens eine Orientierungsbestimmung mit ausreichender Genauigkeit nur bei einem Einsatz integrierter GPS/inertial-Systeme möglich ist. Das Prinzip dieser Integration und die mit diesen Systemen erreichbaren Genauigkeiten werden in Abschnitt 2.1.2 diskutiert.

2.1.1 Positionierung und Orientierung mit inertialen Meßsystemen

Inertielle Meßsysteme nutzen das Prinzip der Massenträgheit von Körpern gegenüber linearen Beschleunigungen und Drehbeschleunigungen. Die Geschwindigkeit des Systems kann dabei durch einfache Integration, die Position durch zweifache Integration der gemessenen Beschleunigungen abgeleitet werden. Die zu integrierenden Messdaten werden von Beschleunigungsmessern und Kreiseln bereitgestellt, wobei die Kreisel die notwendigen Richtungsinformationen für die gemessenen Beschleunigen im Raum liefern. Inertielle Meßsysteme oder auch Trägheitsnavigationssysteme waren über viele Jahre die einzige Möglichkeit, eine autonome Bestimmung des Ortes, der Geschwindigkeit und der Lage durchzuführen. Dies führte zur Entwicklung von hochgenauen aber sehr teuren Systemen. Seit dem Aufbau des GPS steht ein kostengünstiges und genaues System für die Bestimmung von Aufnahmepositionen zur Verfügung. Für photogrammetrische Anwendungen sind damit Trägheitsnavigationssysteme vor allem für die Lagebestimmung von Interesse. Weitere Vorteile gegenüber GPS sind zudem die hohe Messfrequenz sowie die hohe relative Genauigkeit zumindest über kürzere Zeitabschnitte.

Aufgrund des hohen Preises von Plattformsystemen kommen für photogrammetrische Anwendungen nur die relativ kostengünstigen trägerorientierten oder strap-down Systeme zum Einsatz. Ein solches strap-down System besteht aus einem Dreibein von Gyroskopen (Kreiseln) zur Bestimmung der Drehraten der Plattform in Bezug auf den Inertialraum und einem Dreibein von Beschleunigungsmessern zur Messung der entlang der Trajektorie einwirkenden Beschleunigungskräfte. Durch die feste Verbindung des strap-down Systems mit dem Fahrzeug beziehungsweise der zu orientierenden Kamera bezieht sich die Messung des Sensors auf ein lokales Körperkoordinatensystem. Im Gegensatz zu einem Plattformsystem muss somit ein strap-down System die aktuellen Navigationsparameter auch nicht unmittelbar zur Stabilisierung und Kontrolle zurückführen. Dies macht es möglich, zunächst alle Dreh- und Beschleunigungsmessungen als Rohdaten aufzuzeichnen und erst nach der Mission auszuwerten.

Die zur Positionierung eines inertialen Meßsystems genutzte Beschleunigung \mathbf{a} wird durch Beobachtung der bei der Beschleunigung einer Masse auftretenden Trägheitskräfte (Inertialkräfte) gewonnen. Es gilt:

$$\mathbf{f} = m \cdot \mathbf{a} \quad (2.1)$$

wobei \mathbf{f} die einwirkende Kraft, \mathbf{a} die Beschleunigung und m die Masse des Körpers repräsentiert. Der Zusammenhang zwischen der momentanen Beschleunigung \mathbf{a} , der Geschwindigkeit \mathbf{v} und der Position \mathbf{r} ergibt sich zu

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} = \dot{\mathbf{r}} \tag{2.2}$$

und

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \dot{\mathbf{v}} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = \ddot{\mathbf{r}}. \tag{2.3}$$

Anhand der für den Zeitraum $t-t_0$ kontinuierlich gemessenen Beschleunigung $\mathbf{a}(t)$ kann damit die momentane Geschwindigkeit durch eine einfache Integration zu

$$\mathbf{v} = \int_{t_0}^t \mathbf{a} \cdot dt + \mathbf{v}_0$$

und der zurückgelegte Weg durch eine doppelte Integration zu

$$\mathbf{r} = \int_{t_0}^t \mathbf{v} \cdot dt + \mathbf{r}_0 = \int_{t_0}^t \left(\int_{t_0}^t \mathbf{a} \cdot dt \right) \cdot dt + \mathbf{v}_0 \cdot (t-t_0) + \mathbf{r}_0 \tag{2.4}$$

berechnet werden. Für ein bewegtes Objekt auf der Erdoberfläche ist jeweils zusätzlich der Einfluss des Gravitationsfeldes zu berücksichtigen.

Die Größen in Gleichung (2.4) beziehen sich zunächst auf das Inertialkoordinatensystem, wogegen sich die gemessenen linearen Beschleunigungen auf ein körperbezogenes System beziehen. Um eine Transformation zwischen beiden Systemen zu ermöglichen, müssen demnach zusätzlich Drehraten in den Auswerteprozess integriert werden. Um geographische Positionskordinaten und Lagewinkel direkt zu erhalten wird für Navigationsanwendungen die Integration der gemessenen Drehraten und Beschleunigungen im Rahmen einer Mechanisierung häufig in einem lokalen System durchgeführt. Für photogrammetrische Anwendungen ist es jedoch günstiger diese Mechanisierung in einem geozentrischen Erdsystem e durchzuführen.

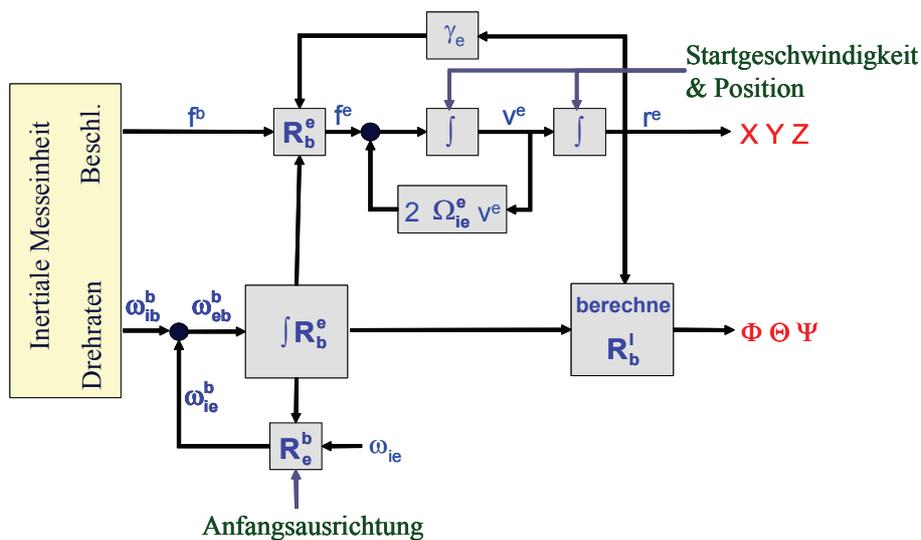


Abbildung 2-1: Mechanisierung der Inertialdaten in einem geozentrischen Koordinatensystem.

Die sich aus diesen Vorgaben ergebende Mechanisierung ist schematisch in Abbildung 2-1 dargestellt. Aus der bekannten Anfangsposition und -orientierung wird zunächst die Rotationsmatrix R_b^e zwischen dem Körpersystem b , in dem die INS-Daten vorliegen und dem geozentrischen System e bestimmt. Damit kann zunächst der Vektor der Erddrehrate ω_{ie} in das Körperkoordinatensystem b transformiert werden, um so die gemessenen Drehraten ω_{ib}^b um den Einfluss der Erddrehung zu reduzieren. Basierend auf den so reduzierten Drehraten ω_{eb}^b wird die Rotationsmatrix R_b^e im Messtakt aktualisiert. Mit dieser Matrix R_b^e werden dann die im Körpersystem gemessenen Beschleunigungen f_b in das erdfeste System e transformiert und der resultierende Vektor f^e um die Erdschwere γ^e reduziert. Anschließend erhält man unter der Annahme einer über das Diskretisierungsintervall Δt konstanten Drehrate und Linearbeschleunigung durch Multiplikation mit dem Zeitintervall Δt das Geschwindigkeitsinkrement Δv^e , mit dem die momentane Geschwindigkeit v^e nachgeführt wird. Durch eine zweite Integration lassen sich dann die geozentrischen

Standortkoordinaten $\mathbf{r}^e = (X^e, Y^e, Z^e)^T$ bestimmen. Die jeweils über die gemessenen Drehraten nachgeführte Rotationsmatrix \mathbf{R}_b^e wird zudem in ein für photogrammetrische Anwendungen besser geeignetes lokales topozentrisches Koordinatensystem l_0 überführt, wobei die zur Transformation verwendete Rotationsmatrix $\mathbf{R}_b^{l_0} = \mathbf{R}_e^{l_0} \cdot \mathbf{R}_i^e \cdot \mathbf{R}_b^e$ eine Funktion der geographischen Länge Λ und Breite Φ ist. Der Index i bezeichnet in diesem Fall das für Navigationsanwendungen verwendete zeitveränderliche lokale System.

Bei der Mechanisierung der inertialen Messungen wirken sich verschiedene Störeinflüsse auf die Genauigkeit der für das bewegte Objekt bestimmten Position und Lage aus. Zum einen sind dies sensorbedingte Fehler der gemessenen Drehraten und Beschleunigungen, zum anderen entstehen Fehler durch die Unvollkommenheiten der Navigationsrechnung beispielsweise bei einer ungenügenden Modellierung des Erdschwerefeldes. Die Sensorfehler des inertialen Meßsystems werden als zeitabhängige Größen eingeführt und durch ein System von Differentialgleichungen modelliert. Für Ingenieur Anwendungen findet dazu am häufigsten ein System von Differentialgleichungen erster Ordnung Verwendung, das als Zustandsvektor bezeichnet wird. Als Schätzverfahren zur Bestimmung dieses Zustandsvektors kommen optimale Glättungsfilter oder Kalmanfilter zum Einsatz. Die Kalmanfilter Technik ist dabei - vergleichbar mit der Methode der kleinsten Quadrate aus der sie hervorgeht - allgemein auf lineare (oder linearisierbare) dynamische Systeme aller Art anwendbar. Sie erlaubt sowohl eine Echtzeit- als auch eine Post-Mission Implementierung und ermöglicht eine detaillierte statistische Analyse der Fehler der Beschleunigungs- und Drehratenmessung. Diese Fehler werden in der Regel durch Terme zur Beschreibung von Nichtorthogonalitäten der Sensorachsen, Skalierungsfehler der Beschleunigungs- beziehungsweise Drehratenmesser sowie weißem Sensorrauschen modelliert.

	Hochgenaues System	Navigationssystem	Kurs/Lage-Referenzsystem
Position			
1 h	0.3 – 0.5km	1-3km	200-300km
1 min	0.3 – 0.5m	0.5-3m	30-50m
1 sec	0.01 – 0.02m	0.03-0.1m	0.3-0.5m
Lage			
1 h	$\cdot 10^{-3}^\circ$	0.01-0.05°	1°-3°
1 min	$\cdot 10^{-3}^\circ$	$4.5 \cdot 10^{-3}^\circ$	0.2°-0.3°
1 s	$\cdot 10^{-3}^\circ$	$0.3-0.5 \cdot 10^{-3}^\circ$	0.01°-0.03°

Tabelle 2-1: Systemgenauigkeiten von INS Sensoren nach (Schwarz et al 1994)

Inertiale Meßsystemen werden abhängig von den erreichbaren Genauigkeiten in drei verschiedene Kategorien unterteilt, wobei sich diese Klassifizierung aus dem Fehler der Positions- und Lagebestimmung nach einem vorgegebenen Zeitintervall an ungestützter Navigation ergibt (Schwarz et al 1994). Die daraus resultierende Einteilung in Systeme hoher, mittlerer und niedriger Genauigkeit zeigt Tabelle 2-1. Darin sind die zeitabhängigen Positions- und Lagefehler jeweils nach einem Navigationsintervall von 1 Sekunde, 1 Minute und 1 Stunde angegeben. Die hohe Genauigkeitskategorie wird fast ausschließlich von Plattformsystemen erreicht, deren Einsatz für photogrammetrische Zwecke aufgrund des hohen Preises wirtschaftlich nicht vertretbar ist. Für die direkte Georeferenzierung kommen damit nur strap-down Systeme in Frage, die der niederen beziehungsweise mittleren Genauigkeitskategorie angehören. Während die Genauigkeit der Positions- und Lagedaten aufgrund der systematischen Sensorfehler und der zeitabhängigen Fehlercharakteristik inertialer Meßsysteme über längere Zeiträume zu stark zurückgeht, sind über kurze Zeiträume die Genauigkeiten der abgeleiteten Größen zumindest bei Navigationssystemen der mittleren Fehlerkategorie für photogrammetrische Anwendungen ausreichend.

Der Einsatz solcher Systeme erfordert jedoch eine Korrektur dieser Langzeiteffekte. Dies ist durch die Integration externer Stützinformation während der Mechanisierung der Beschleunigungs- und Drehratenmessung möglich. Eine Stützung der Mechanisierung kann beispielsweise durch die Einführung eines ZUPT (Zero Velocity Update Point) oder CUPT (Coordinate Update Point) erfolgen. Durch das Anhalten des Systems auf einem festen Punkt beziehungsweise durch das Anfahren einer bekannten Position wird dabei der Fehler der erfassten Trajektorie bestimmt und gegebenenfalls korrigiert. Eine Stützung der Mechanisierung zur Begrenzung des Fehlerwachstums kann analog dazu auch durch die Integration von GPS-Messungen erfolgen. Dadurch wird der Fehler bei der Bestimmung von Position

und Orientierung auf die Genauigkeit der als Stützinformation verwendeten Positions- und Geschwindigkeitsmessungen des GPS begrenzt. Eine solche Elimination der zeitabhängigen Effekte erlaubt es, für ein Meßsystem der mittleren Kategorie die Genauigkeiten von Position und Lage dauerhaft in einer Größenordnung zu halten, die in Tabelle 2-1 für das Zeitintervall von einer Sekunde angegeben ist (Schwarz 1995). Damit sind auch mit Systemen der mittleren Genauigkeitskategorie photogrammetrische Anwendungen möglich. Im folgenden Abschnitt wird das Prinzip solcher integrierter GPS/inertial-Systeme insbesondere im Hinblick auf den resultierenden Fehler der damit gemessenen Parameter der äußeren Orientierung diskutiert.

2.1.2 Integration von GPS/inertial-Systemen zur direkten Georeferenzierung

Für die Integration von GPS-Messungen zur Stützung der Mechanisierung von inertialen Meßsystemen wird üblicherweise ein Kalman Filter eingesetzt. Dabei wird durch einen linearisierten und diskretisierten Satz von Differentialgleichungen der Sensor-Fehler des inertialen Meßsystems sowie der sich daraus ergebenden Fehler der Mechanisierung modelliert. Zur Bestimmung dieser Fehler werden die Positionsabweichungen zwischen den Werten der Mechanisierung der Inertialdaten und den GPS Messungen verwendet. Die Positionsfehler der Mechanisierung sind eine Funktion der gemessenen Drehraten und Beschleunigungen, die durch die Differentialgleichungen innerhalb des Kalmanfilters modelliert werden. Aus den beobachteten Differenzen zu den GPS-Messungen lässt sich so durch den Kalman-Filter sowohl der Fehler der Drehraten als auch der Beschleunigungsmessung bestimmen. Die geschätzten Korrekturwerte werden dann im Rahmen der Mechanisierung an den rohen Drehraten und Beschleunigungsmessungen angebracht, was den selben Effekt wie eine Kalibrierung des Sensors besitzt. Damit wird die Genauigkeit von Position, Geschwindigkeit und Orientierung der resultierenden integrierten Navigationslösung im Prinzip durch die absolute Genauigkeit der GPS Position und Geschwindigkeit vorgegeben.

Die Herleitung der Kalman-Filtergleichungen ist in der Literatur zur linearen optimalen Filterung ausführlich dokumentiert (Gelb 1974). Grundlage der Kalman-Filterung ist die Beschreibung des bewegten Körpers als ein lineares zeitdiskretes System. Das Fehlerwachstum in diesem dynamischen System wird charakterisiert durch einen quasi-systematischen Anteil, der durch Initialisierungsfehler verursacht wird, sowie durch einen stochastischen Teil, der aus dem Systemrauschen während des Ablaufs resultiert. Das lineare zeitdiskrete System wird beschrieben durch

$$\mathbf{x}_k = \phi_{k-1,k} \cdot \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \quad (2.5)$$

wobei der Zustand dieses Systems indirekt über die Messgleichung

$$\mathbf{l}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \quad (2.6)$$

beobachtet wird. Dabei ist

- $k, k+1$ der Index für die Zeit,
- $\mathbf{x}[n,1]$ der Zustandsvektor,
- $\mathbf{l}[m,1]$ der Messvektor,
- $\Phi[n,n]$ die Transitionsmatrix,
- $\mathbf{A}[m,n]$ die Designmatrix,
- $\mathbf{w}[n,1]$ das Systemrauschen aus Systemfehlerquellen und
- $\mathbf{v}[m,1]$ das Messrauschen aus Messfehlerquellen,

Das funktionale Modell setzt sich aus der Transitionsmatrix Φ und der Designmatrix \mathbf{A} zusammen. Die Transitionsmatrix (Systemmatrix) $\Phi[n,n]$ beschreibt das dynamische System beim Übergang vom Zustand \mathbf{x}_{k-1} zum Zustand \mathbf{x}_k und repräsentiert die physikalischen Gesetze, die dem untersuchten dynamischen Zustand zugrunde liegen. Die Designmatrix (Messmatrix) $\mathbf{A}[m,n]$ verknüpft Mess- mit Zustandsvektor, sie definiert an welcher Stelle im Zustandsvektor der Messwert steht, der nach jeder neuen Messung aktualisiert wird. Das stochastische Modell besteht aus den Störgrößen \mathbf{w} und \mathbf{v} , deren richtige Relation im Rahmen des Filterentwurfs bestimmt werden muss. Dabei beinhaltet $\mathbf{w}[n,1]$ das Zustandsrauschen, die Modellunsicherheit des dynamischen Systems sowie den Diskretisierungsfehler.

Das Rauschen des Meßsystems wird durch $\mathbf{v}[m, 1]$ repräsentiert. Unter der Voraussetzung, dass \mathbf{v} und \mathbf{w} unkorreliert und normalverteilt sind, lassen sich ihre Varianzen \mathbf{W} und \mathbf{V} aus den Erwartungswerten

$$E\{\mathbf{v}, \mathbf{v}^T\} = \mathbf{V} \text{ beziehungsweise } E\{\mathbf{w}, \mathbf{w}^T\} = \mathbf{W} \quad (2.7)$$

berechnen. In einem Kalmanfilter werden Zustandsgleichung und Messgleichung für eine optimale Schätzung von $\mathbf{x}(k+1)$ kombiniert, das heißt der Schätzwert $\hat{\mathbf{x}}(k+1)$ ist frei von systematischen Fehlern; die Spur der zugehörigen Kovarianzmatrix $\mathbf{x}(k+1)$ soll minimal sein.

Die zeitdiskrete Darstellungen des Systems nach Gleichung (2.5) stellt nichts anderes als eine einfache Form der numerischen Integration des Differenzialgleichungssystems $\dot{\mathbf{x}}(t) = F(\mathbf{x}(t)) + G(\mathbf{w}(t))$ dar. Diese Einschränkung auf die zeitdiskrete Darstellung kann bei der Anwendung eines geeigneten numerischen Integrationsverfahrens entfallen (Wagner 2003), wird jedoch, da sie in dieser Form häufig in der Literatur zu findend ist, in dieser Arbeit so übernommen.

Im Systemmodell (2.5) kann zur Vereinfachung auf einen Kontrollinput, wie er beispielsweise bei gesteuerten Systemen anfällt, verzichtet werden. Solche Ansätze werden als freie oder homogene Systeme bezeichnet. Bei der Auswertung von GPS und Inertialdaten für die Navigationsrechnung wird in diesem Fall der Zustand des dynamischen Systems nicht durch die aktuelle Position, Geschwindigkeit und Orientierung beschrieben. Durch den Kalman-Filter werden statt dessen die aktuellen Fehler des Systems bestimmt, die in einem zweiten, integrierten Schritt zur Korrektur der durch Mechanisierung der Drehraten und Beschleunigung bestimmten Positions- Geschwindigkeits- und Orientierungsparameter verwendet werden.

Der in diesem Fall durch den Kalman-Filter bestimmte Zustandsvektor repräsentiert Kreiseldriften und konstante Fehler der Beschleunigungsmesser, andere Sensorfehler wie Fehler der Skalierungsfaktoren oder Fehlausrichtung werden als Prozessrauschen modelliert. Für ein Strap-down System können beispielsweise die Fehler der Beschleunigungs- und Drehratenmessung durch einen Zustandsvektor

$$\mathbf{x} = (\delta x^e \quad \delta y^e \quad \delta z^e \quad \delta v_x^e \quad \delta v_y^e \quad \delta v_z^e \quad \delta \omega_x^e \quad \delta \varphi_y^e \quad \delta \kappa_z^e \quad d_x^b \quad d_y^b \quad d_z^b \quad b_x^b \quad b_y^b \quad b_z^b) \quad (2.8)$$

mit 15 Größen repräsentiert werden (Skaloud 1999). Dabei sind die einzelnen Größen:

- $\delta x^e \quad \delta y^e \quad \delta z^e$ die drei Positionsfehler im erdgebundenen System,
- $\delta v_x^e \quad \delta v_y^e \quad \delta v_z^e$ der Vektor der Geschwindigkeitsfehler im erdgebundenen System,
- $\delta \omega_x^e \quad \delta \varphi_y^e \quad \delta \kappa_z^e$ die drei Winkel der Fehlausrichtung im erdgebundenen System,
- $d_x^b \quad d_y^e \quad d_z^e$ der Driftfehler für die drei Kreisel im Körpersystem,
- $b_x^b \quad b_y^e \quad b_z^e$ die drei konstanten Fehler der Beschleunigungsmesser im Körpersystem.

Bei der Auswertung von Messungen eines GPS/inertial-Systems mit einem Kalman-Filter dient das inertielle Meßsystem als Basissensor für eine autarke, kontinuierliche Bestimmung der Trajektorie. Der zur Stützung eingesetzte GPS-Sensor liefert zu bestimmten Zeiten redundante Messungen, wobei es sich in diesem Fall nur um Teilmessungen wie Geschwindigkeit und Position handelt. Diese Information wird zur Korrektur der systemspezifischen Fehler des inertialen Meßsystems verwendet. Mit einer gemessenen GPS-Position ergibt sich Gleichung (2.6) zu

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_k &= \mathbf{I}_k - \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k \\ &= \mathbf{X}_{GPS} - \mathbf{X}_{INS} \\ &= \mathbf{X}_{real} + \delta \mathbf{X}_{GPS} - (\mathbf{X}_{real} + \delta \mathbf{X}_{INS}) \\ &= \delta \mathbf{X}_{GPS} - \delta \mathbf{X}_{INS} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Dabei bezeichnet $\delta \mathbf{X}_{GPS}$ den Fehler der GPS-Position und $\delta \mathbf{X}_{INS}$ den Fehler der ungestützten INS Position. Da die wahre Position \mathbf{X}_{real} durch die Differenzbildung eliminiert wird, gehen nur die Systemfehler $\delta \mathbf{X}_{INS}$ und $\delta \mathbf{X}_{GPS}$ in die stochastische Betrachtung der Kalmanfilterung ein. Als linearisierte Beobachtung dient so lediglich die jeweilige Differenz zwischen dem Positionsvektor aus der GPS-Messung und dem Positionsvektor aus der Mechanisierung der Inertialdaten nach Anbringen der aktuellen Korrekturwerte. Nach der Prozessierung der Daten mit dem Kalman-Filter

liegt die vorher ungestützte Bahn mit einer Genauigkeit vor, die dem Fehler des zur Stützung verwendeten Sensors entspricht. Dies entspricht bei einem GPS/inertial-System der Genauigkeit der für photogrammetrische Anwendungen verwendeten kinematischen GPS Positionierung durch differentielle Phasenbeobachtung. Diese liegt üblicherweise im Bereich von 5 – 20cm.

Zur Stützung der Orientierungsmessung können die mit GPS gemessenen Geschwindigkeiten des Systems genutzt werden. Dabei gilt für den Fehler $\delta \mathbf{v}$ der Geschwindigkeitsmessung (Schwarz 1995)

$$\begin{aligned}\delta \dot{v}_O &= f_V \varepsilon_N - f_N \varepsilon_V + b_O \\ \delta \dot{v}_N &= -f_V \varepsilon_O + f_O \varepsilon_V + b_N \\ \delta \dot{v}_V &= -f_N \varepsilon_O - f_O \varepsilon_V + b_V\end{aligned}\quad (2.10)$$

In Gleichung (2.10) repräsentiert $\boldsymbol{\varepsilon}$ den Fehler der Lagemessung, \mathbf{b} den Offset der Beschleunigungsmessung und \mathbf{f} die Linearbeschleunigung. Die Indizes O, N, V stehen für die jeweiligen Ost-, Nord-, und Vertikalkomponenten dieser Vektoren in einem lokalen Bezugssystem. Aus Gleichung (2.10) lassen sich damit für die Lagefehler $\varepsilon_O, \varepsilon_N$ und ε_V die Beziehungen

$$\varepsilon_O = \frac{f_O \varepsilon_V - \delta \dot{v}_N + b_N}{f_V} \quad (2.11)$$

$$\varepsilon_N = \frac{f_N \varepsilon_V - \delta \dot{v}_O + b_O}{f_V} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_V = \frac{f_V \varepsilon_N - \delta \dot{v}_O + b_O}{f_N} \quad (2.13)$$

ableiten.

Ein Bildflug wird üblicherweise bei gerader Flugbahn und gleichbleibender Höhe durchgeführt. Damit treten in photogrammetrischen Anwendungen typischerweise Linearbeschleunigungen nahezu ausschließlich in der Vertikalkomponente f_V auf, die den Einfluss des Schwerevektors enthält. Demgegenüber sind die für Horizontalkomponenten gemessenen Werte f_N und f_O um den Faktor hundert kleiner. Dies führt dazu, dass bei der Bestimmung des Fehler ε_V des Kurswinkels nach Gleichung (2.13) der Nenner im Vergleich zu Gleichung (2.11) und (2.12) deutlich kleiner ist. Aus diesem Grund ist die Genauigkeit, mit der sich der Fehler ε_V des Kurswinkels aus GPS-Messungen bestimmen lässt, geringer als die Qualität der Fehlerbestimmung für die Roll- und Nickwinkelbestimmung. Die Genauigkeit der Kurswinkelbestimmung kann jedoch gesteigert werden, wenn während des Fluges Beschleunigungen in Horizontalrichtung durch Kurvenflug oder Änderung der Geschwindigkeit erzeugt werden. Aus diesem Grund werden für photogrammetrische Anwendungen entsprechende Flugmanöver durchgeführt, die abhängig von der Qualität des inertialen Meßsystems periodisch alle 10 bis 30 Minuten wiederholt werden. Dadurch sind mit einem GPS/inertial-System Genauigkeiten des Kurswinkels möglich, die lediglich um den Faktor 2-3 schlechter sind als die gemessenen Roll- und Nickwinkel (Mostafa et al 2001).

2.1.3 Alternative Formulierungen des Kalman-Filters

Das in Abschnitt 2.1.2 beschriebene Verfahren zur GPS/INS-Integration entspricht dem Ansatz, der in kommerziellen Systemen zur direkten Georeferenzierung für photogrammetrischen Anwendungen derzeit zum Einsatz kommt. Alternativ dazu existieren jedoch noch weitere Varianten, die im folgenden kurz vorgestellt werden sollen.

In Abbildung 2-2 sind verschiedene Varianten zur Integration von GPS und Inertial-Navigation zur Positionierung und Orientierung dargestellt (Wagner 2003). Konventionelle Ansätze wie die Varianten 1 und 2 integrieren jeweils ein komplettes inertiales Navigationssystem mit einem GPS System. Das INS leistet in diesem Fall sowohl die Erfassung der Inertialdaten durch das inertiale Meßsystem (Inertial Measurement Unit, IMU) als auch die anschließende Mechanisierung und Auswertung der Daten. In Variante 1 werden die durch das INS bestimmten Positions- und Geschwindigkeitsangaben mit den korrespondierenden Positionen und Geschwindigkeiten der GPS-Auswertung verglichen. Aus den Differenzen schätzt ein Kalman-Filter mit Hilfe eines linearisierten INS-Fehlermodells die mittleren systematischen Abweichungen, die in den Signalen der Kreisel und Beschleunigungsmesser enthalten sind und die bei der numerischen Integration der Differenzialgleichungen entstehen. Das Schätzergebnis wird dazu benutzt, die Genauigkeit

der INS-Ausgangssignale zu verbessern. Aufgrund der Nichtlinearität der Differenzialgleichungen ist dieser Ansatz aber nur dann sinnvoll, wenn sich innerhalb des INS keine zu großen Abweichungen aufbauen. Da dies nur bei sehr hochwertigen Geräten der Fall ist, kommt in der Regel die Variante 2 zum Einsatz, die dem in Abschnitt 2.1.2 diskutierten Ansatz entspricht. Dabei werden wie in Gleichung (2.8) für einen Zustandsvektor Korrekturen ermittelt und direkt in die Mechanisierung der Inertialdaten zurückgeführt. Durch diesen Eingriff in das inertielle Subsystem werden die Sensorfehler direkt kompensiert und die Integrationsfehler zurückgesetzt.

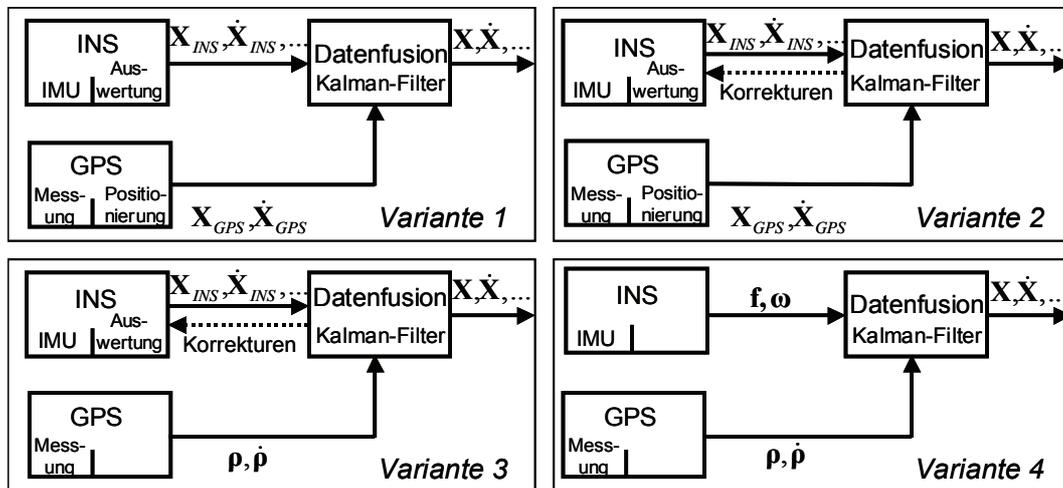


Abbildung 2-2: Integrationsvarianten zur Kombination von Inertial- und Satellitennavigation nach (Wagner 2003)

Durch die extern aus den GPS Messungen berechneten Positionen und Geschwindigkeiten entstehen Fehlerkorrelationen, die für das Kalman-Filter der Datenfusion unerwünscht sind. Aus diesem Grund werden dem Fusionsfilter in der Variante 3 unmittelbar die durch GPS gemessenen (Pseudo-)Entfernungen ρ beziehungsweise Entfernungsänderungen $\dot{\rho}$ zugeführt. Dies entspricht einer Verlagerung der GPS-Datenauswertung in den Kalman-Filter. Variante 3 ist neben Variante 2 weithin anerkannt und wird bei zahlreichen Anwendungen der GPS/INS-Integration eingesetzt. Neben diesen konventionellen Ansätzen verschieben neuere Verfahren wie Variante 4 die Datenauswertung der Strapdown-Systeme ebenfalls in den Kalmanfilter, um so unerwünschten Korrelationseffekten vorzubeugen. Damit bleiben vom INS nur die Inertialsensoren mit dem Beschleunigungs- und dem Drehgeschwindigkeitsvektor \mathbf{f} und $\boldsymbol{\omega}$ als Ausgangssignale übrig. Die Korrekturrückführung zur Auswertung der IMU-Daten entfällt in diesem Fall, der Zustandsvektor repräsentiert in Version 4 nicht mehr Fehlergrößen wie in Gleichung (2.8), sondern enthält bereits die Absolutgrößen.

Untersuchungen zum Genauigkeitsergebnis zeigen lediglich beim Übergang von Variante 1 auf Variante 2 einen eindeutigen Genauigkeitserfolg. Das Genauigkeitsniveau zwischen den Varianten 2, 3 und 4 unterscheidet sich dagegen nur wenig. Der Vorteil der Variante 3 gegenüber Variante 2 besteht deshalb vor allem in einer besseren Filterstabilität, was insbesondere in Phasen ruhiger Geradeausflüge mit geringen Beschleunigungen von Interesse ist. Die Erhöhung der Filterstabilität setzt sich beim Übergang zum Verfahren 4 weiter fort. Prinzipiell kann es jedoch bei allen Integrationsvarianten zu einem partiellen Beobachtbarkeitsverlust des Zustandsvektors und damit zu einem instabilen Zustand des Kalman-Filters kommen. Dies ist der Fall, wenn das Strapdown-System wie üblich mit nur einer GPS-Antenne gestützt wird und eine unbeschleunigte, drehungsfreie Flugzeugbewegung vorliegt. Eine ausreichende Beobachtbarkeit und damit Stützung der drei Lagewinkel ist, wie bereits anhand der Gleichungen (2.10) bis (2.13) diskutiert, nur in Phasen hoher Dynamik möglich (Wagner 2003).

Eine von der Form der Flugtrajektorie unabhängige Stützung der Lagewinkel ist im Prinzip durch eine GPS-Neigungsmessung mittels Mehrantennensystemen möglich. Dies ist insbesondere für den Kurswinkel von Interesse. Die Genauigkeit solcher Messungen ist unter realen photogrammetrischen Bedingungen auf Werte von 0.1° bis 0.3° beschränkt (Schade 2001). Als limitierender Faktor wirkt dabei vor allem die Deformation des GPS-Interferometers durch die Montage der Antennen an den Flugzeugtragflächen. Mehrantennensysteme sind damit als alleinige Datenquelle für präzise photogrammetrische Aufgabenstellungen noch nicht geeignet. Simulationsdaten zeigen jedoch, dass die Stützung durch GPS-Neigungsmessung nicht nur eine Genauigkeitsverbesserung, sondern vor allem eine nachhaltige Stabilisierung des Schätzfilters bewirken kann, sofern die Antennen ausreichend lange Hebelarme haben (Wagner 2003). Um die erforderlichen Basislängen von 25 Meter zu ermöglichen kann beispielsweise die Genauigkeitsbe-

schränkende Verformung der Flugzeugstruktur auf Basis von Dehmesstreifen oder durch Messung von Biegemomenten beziehungsweise Biegedehnungen über ein inertiales Messsystem erfasst und korrigiert werden.

2.2 Systemkalibrierung durch kombinierte Aerotriangulation

Bei der direkten Georeferenzierung werden Bild- und Geländekoordinaten der aufgenommenen Objektpunkte unmittelbar durch die mit dem GPS/inertial-System gemessenen Parameter der äußeren Orientierung verknüpft. Für die geometrische Auswertung der aufgenommenen Luftbilder müssen demnach alle Positions- und Orientierungsunterschiede zwischen den beteiligten Systemkomponenten GPS, inertialen Meßsystem und Kamera bestimmt und korrigiert werden. Die zur Systemkalibrierung benötigten Positionsunterschiede zwischen den einzelnen Sensorkomponenten können a priori durch terrestrische Messmethoden ermittelt werden. Orientierungsunterschiede zwischen dem inertialen Meßsystem und der Kamera sind demgegenüber nicht direkt zugänglich. Eine Möglichkeit zur Bestimmung dieser Parameter besteht darin, die direkt gemessene Orientierung mit den indirekt durch eine Aerotriangulation bestimmten Orientierungsparametern der Kamera zu vergleichen. In der Regel ist es jedoch günstiger, die gemessenen Orientierungsparameter in einer kombinierten Aerotriangulation der Luftbilder zu integrieren und so die gesuchten Kalibrierparameter zu bestimmen. Dies gilt insbesondere dann, wenn wie im Fall von Zeilenkameras eine Georeferenzierung der Bilder ohne direkt gemessene Parameter der äußeren Orientierung nicht möglich ist. Im Rahmen der kombinierten Aerotriangulation kann zudem neben der Bestimmung von Positions- und Lagedifferenzen zwischen den einzelnen Sensorkomponenten eine Kalibrierung des optischen Systems erfolgen.

2.2.1 Grundlagen der Aerotriangulation

Die Wiederherstellung der Aufnahmegeometrie eines perspektiven Bildes erfolgt bei einer traditionellen photogrammetrischen Auswertung aus Messungen von Pass- und Verknüpfungspunkten. Das hierfür eingesetzte Standardverfahren der Aerotriangulation oder Bündelblockausgleichung ist die Grundlage einer ganzen Reihe etablierter Programmsysteme (Ackermann et al 1970) (Jacobsen 1980). Die Rekonstruktion der Parameter der äußeren Orientierung ergibt sich aus dem mathematischen Zusammenhang zwischen den Bildkoordinaten eines Punktes und seinen zugehörigen Koordinaten im übergeordneten Objekt- oder Landeskoordinatensystem. Die Bildkoordinaten und das Projektionszentrum der Kamera definieren dabei Strahlenbündel als geometrische Grundeinheit, die durch die drei Translationen X_0, Y_0, Z_0 und die drei Rotationen ω, ϕ, κ optimal in die Verknüpfungs- beziehungsweise Passpunkte eingepasst werden. Die Bestimmung der gesuchten äußeren Orientierungselemente für die Strahlenbündel im Rahmen einer Aerotriangulation erfolgt simultan für alle Bilder eines Blockverbands.

Bestimmung der äußeren Orientierung

Die Position und die Orientierung einer Kamera im Objektkoordinatensystem ergibt sich aus der perspektiven Abbildungsbeziehung

$$\mathbf{X}_p = \mathbf{X}_0 + \lambda \mathbf{R} \cdot \bar{\mathbf{x}}. \quad (2.14)$$

Dabei bezeichnet $\mathbf{X}_p = [X_p \ Y_p \ Z_p]^T$ die Objektpunktkoordinaten, $\mathbf{X}_0 = [X_0 \ Y_0 \ Z_0]^T$ die Koordinaten des Projektionszentrums, λ den Maßstabsfaktor, $\mathbf{R}(\omega, \phi, \kappa)$ die Rotationsmatrix zum Übergang vom Bildkoordinatensystem zum Objektraumkoordinatensystem und

$$\bar{\mathbf{x}} = [\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z}]^T = [x - x_0 \ y - y_0 \ -c]^T$$

die reduzierten Bildpunktkoordinaten, wobei x_0, y_0 die Koordinaten des Bildhauptpunkts und $-c$ die Kammerkonstante repräsentiert.

Nach Gleichung (2.14) wird jeder Geländepunkt in einen eindeutig bestimmten Bildpunkt abgebildet. Im umgekehrten Fall kann die Raumlage eines Geländepunktes lediglich aus einem Bildpunkt nicht eindeutig rekonstruiert werden. Zur Elimination des unbekanntes Maßstabsfaktors λ wird deshalb die Gleichung (2.14) durch Bildung des Quotienten umformuliert, so dass für jeden gemessenen Bildpunkt unmittelbar zwei Beobachtungsgleichungen

$$\begin{aligned}\bar{x} &= \bar{z} \frac{r_{11}(X_p - X_0) + r_{21}(Y_p - Y_0) + r_{31}(Z_p - Z_0)}{r_{13}(X_p - X_0) + r_{23}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0)} \\ \bar{y} &= \bar{z} \frac{r_{12}(X_p - X_0) + r_{22}(Y_p - Y_0) + r_{32}(Z_p - Z_0)}{r_{13}(X_p - X_0) + r_{23}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0)}\end{aligned}\quad (2.15)$$

zur Verfügung stehen. Nach Gleichung (2.15) können aus den zugehörigen Bild- und Objektkoordinaten der aufgenommenen Punkte die sechs Elemente $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa$ der äußeren Orientierung des jeweiligen Bildes ermittelt werden. Zudem lassen sich die dreidimensionalen Objektpunktkoordinaten \mathbf{X}_p aus der Messung identischer Punkte in zwei oder mehr überlappenden Bildern bestimmen. Die Parameterschätzung aus Gleichung (2.15) erfolgt häufig in einem Gauss-Markoff-Modell. Dabei werden mit Hilfe von entsprechenden Näherungswerten die Verbesserungsgleichungen

$$\begin{aligned}\bar{x}^i + v_{\bar{x}^i} &= f_x(X_p^i, Y_p^i, Z_p^i, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa) \\ \bar{y}^i + v_{\bar{y}^i} &= f_y(X_p^i, Y_p^i, Z_p^i, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa)\end{aligned}$$

nach Taylor linearisiert. Mit der Designmatrix \mathbf{A} , dem gekürzten Beobachtungsvektor

$$\mathbf{l} = \begin{bmatrix} \bar{x}_i \\ \bar{y}_i \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} f_x(X_p^i, Y_p^i, Z_p^i, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa) \\ f_y(X_p^i, Y_p^i, Z_p^i, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa) \end{bmatrix},$$

dem Verbesserungsvektor

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} v_{\bar{x}_i} \\ v_{\bar{y}_i} \end{bmatrix}$$

und dem Unbekanntenvektor \mathbf{x} ergibt sich das funktionale Modell

$$\mathbf{l} + \mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{x},$$

das die iterative Bestimmung des Lösungsvektors

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$$

ermöglicht.

Häufig wird auch die Formulierung

$$\begin{aligned}F_x &\equiv (X_p - X_0) \cdot z' - (Z_p - Z_0) \cdot x' = \Delta X \cdot z' - \Delta Z \cdot x' = 0 \\ F_y &\equiv (Y_p - Y_0) \cdot z' - (Z_p - Z_0) \cdot y' = \Delta Y \cdot z' - \Delta Z \cdot y' = 0\end{aligned}\quad (2.16)$$

verwendet, die unmittelbar verdeutlicht, dass jeder Bildstrahl basierend auf den Kollinearitätsbedingung je zwei Bedingungsgleichungen liefert. Dabei sind

$$[\Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z]^T = [X_p - X_0 \quad Y_p - Y_0 \quad Z_p - Z_0] \quad (2.17)$$

die auf das Projektionszentrum \mathbf{X}_0 reduzierten Objektkoordinaten \mathbf{X}_p und

$$[x' \quad y' \quad z']^T = \mathbf{R}(\omega, \phi, \kappa) \cdot [\bar{x} \quad \bar{y} \quad \bar{z}]^T \quad (2.18)$$

die durch die Rotationsmatrix $\mathbf{R}(\omega, \phi, \kappa)$ in ein zu dem Objektkoordinatensystem paralleles System transformierten reduzierten Bildpunktkoordinaten. In diesem Fall wird das Gauss-Markoff Modell zur Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung auf den allgemeinen Ansatz des Gauss-Helmert-Modells erweitert. Dieser Ansatz ermöglicht dabei auch die elegante Integration zusätzlicher Bedingungen, die sich beispielsweise aus externer Information über die Parameter der äußeren Orientierung ergeben.

Innere Orientierung bei digitalen Kameras

Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit einer Bündelblockausgleichung wird beeinflusst durch Faktoren wie die Genauigkeit der Bildkoordinatenmessung oder die Geometrie der Strahlenbündel einschließlich der Anzahl der verfügbaren

Pass- und Verknüpfungspunkte. Von besonderer Bedeutung ist darüber hinaus die exakte Kenntnis der geometrischen Verhältnisse innerhalb der Kamera. Die Kamerageometrie wird durch die Parameter der inneren Orientierung beschrieben, die neben der Lage des Projektionszentrums in einem kamerafesten Koordinatensystem auch die Abweichungen der physikalischen Abbildung vom Modell der Zentralperspektive repräsentiert. Die innere Orientierung wird üblicherweise durch eine Laborkalibrierung bestimmt und geht als bekannte Größe in die Bündelblockausgleichung ein. Die zu bestimmenden Parameter der inneren Orientierung sind die Kammerkonstante c , die den lotrechten Abstand des Projektionszentrums von der Bildebene in negativer \bar{z} -Richtung beschreibt und die Koordinaten x_0, y_0 des Bildhauptpunktes, der durch den Lotfußpunkt des Projektionszentrums im Bildkoordinatensystem definiert ist. Zusätzlich werden im Rahmen der Kalibrierung Parameter von Bildfehlern beschreibenden Funktionen bestimmt.

Der Einfluss systematischer Fehler des abbildenden Systems lässt sich auch durch eine Erweiterung der Bündelblockausgleichung um eine Selbstkalibrierung eliminieren. Abbildungsfehler, die sich beispielsweise durch die Abweichung der Fokalebene von einer planaren Fläche, unmodellierte Linsenverzeichnungen oder Anomalien der Refraktion ergeben, werden dabei durch zusätzliche orthogonale Polynome beschrieben und deren Koeffizienten im Rahmen der Aerotriangulation bestimmt (Ebner 1976) (Grün 1978). Eine weitere Möglichkeit zur Selbstkalibrierung ist die Einführung von Zusatzparametern Δx und Δy (Brown 1971). Diese beschreiben physikalisch motivierte Fehlerterme. Neben der Korrektur der drei Parameter der inneren Orientierung sind in diesem Fehlermodell noch Polynomkoeffizienten enthalten, um die Abweichungen des tatsächlichen Strahlengangs von dem zentralperspektivischen Modell zu beschreiben. Dadurch werden Abweichungen modelliert, die sich aus Zentrierfehlern der Einzellinsen, aus einer Schräglage der Bildebene gegenüber der optischen Achse oder durch Linsenfehler an sich ergeben. Ein solcher Parametersatz wird häufig für die Kalibrierung digitaler Kameras im Nahbereich (Beyer 1992) (Fraser 1997) genutzt. Darüber hinaus kann er für die Kalibrierung digitaler Luftbildkameras mit Full-frame-CCDs eingesetzt werden (Haala & Stallmann 2001).

Bei der Auswertung digitaler Bilder im Rahmen einer Aerotriangulation müssen zunächst die gemessenen Pixelkoordinaten in ein Bildkoordinatensystem transformiert werden. Diesem Koordinatensystem liegen dann alle weiteren geometrischen Berechnungen zugrunde. In der Regel ist das dabei definierte Pixelkoordinatensystem ein linkshändiges Koordinatensystem mit dem Ursprung in der Mitte des linken oberen Pixels, wobei der Spaltenindex c und der Zeilenindex r die Lage des Pixels wiedergeben. Demgegenüber entspricht das Bildkoordinatensystem einem rechtshändigen, kartesischen Koordinatensystem mit dem Ursprung in der Bildmitte.

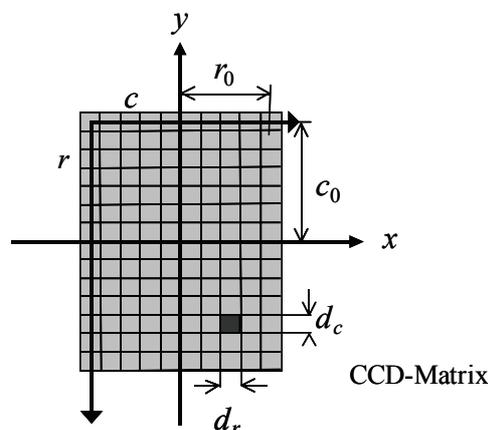


Abbildung 2-3: Pixel-Bildkoordinaten-Transformation für Flächenkameras.

Der Übergang zwischen beiden Koordinatensysteme ist in Abbildung 2-3 dargestellt. Die Transformation vom Pixel- in das Bildkoordinatensystem ergibt sich damit durch eine Parallelverschiebung, Spiegelung und anschließende Skalierung mit der Pixelgröße. Es gilt:

$$\begin{aligned} x &= -(r - r_0) \cdot d_r \\ y &= -(c - c_0) \cdot d_c \end{aligned}$$

Darin ist c_0, r_0 der Ursprung des Bildkoordinatensystems in Pixelkoordinaten und d_c, d_r die Pixelgröße beziehungsweise der Pixelabstand in Spalten- und Zeilenrichtung. Der Ursprung des Bildkoordinatensystems wird meist in die Mitte des CCD-Chips gelegt, so dass sich die Gleichung

$$c_0 = (n_c - 1)/2$$

$$r_0 = (n_r - 1)/2$$

ergibt. Dabei ist n_c die Anzahl der Spalten und n_r die Anzahl der Zeilen des CCD-Chips.

Das fundamentale mathematische Modell in Gleichung (2.14) beziehungsweise (2.16) wurde ursprünglich für die Auswertung von Flächenbildern formuliert, die den in Abbildung 2-3 dargestellten Koordinatensystemen zugrunde liegen. Dennoch ist es in leicht modifizierter Form genauso für die Auswertung von Zeilenbildern geeignet. Zeilenkameras werden in den meisten optischen Satellitensystemen verwendet und kommen auch in einer Reihe von digitalen flugzeuggestützten Systemen zum Einsatz. Die Georeferenzierung solcher Zeilenbildern wird in Abschnitt 2.3 und 2.4 diskutiert. Im folgenden soll deshalb zunächst auf die Besonderheiten beim Übergang vom Pixel- in das Bildkoordinatensystem für diese Aufnahmesysteme eingegangen werden.

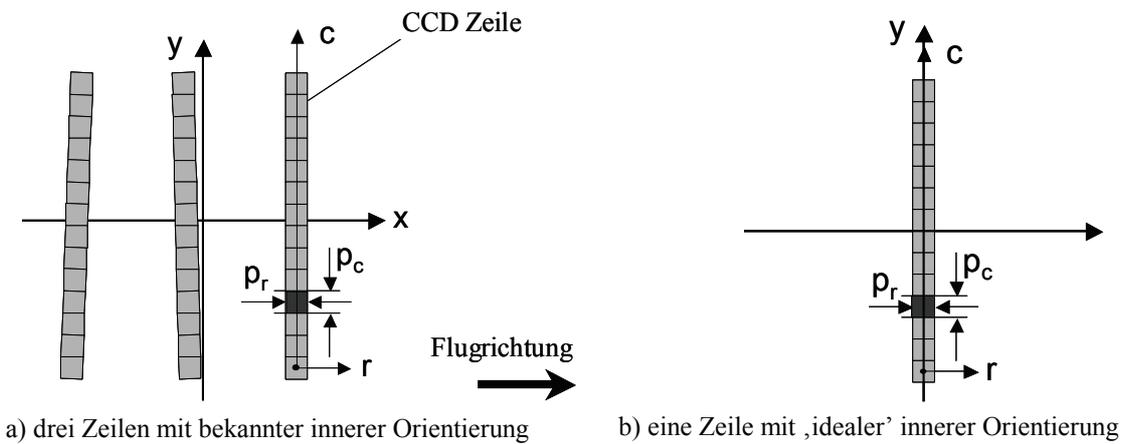


Abbildung 2-4: Transformation vom Pixel- in das Bildkoordinatensystem für Zeilenkameras.

Zeilenkameras liefern Bildstreifen mit einer perspektiven Projektion senkrecht zur Flugbahn und einer parallelen Projektion in Flugrichtung. Die sich daraus ergebenden Modifikationen für die Beschreibung der inneren Orientierung und den Übergang von Pixel- in das Bildkoordinatensystem sind in Abbildung 2-4 dargestellt. Üblicherweise wird die x -Achse des Kamerakoordinatensystems in Flugrichtung und die y -Achse senkrecht dazu gewählt. Während bei Zeilenbildern die Koordinate der Scanzeile r die Verbindung zum Aufnahmezeitpunkt der jeweiligen Bildzeile liefert, müssen die Pixelkoordinaten c wie bei Flächenbildern in die entsprechenden Bildkoordinaten (x, y) transformiert werden. Wie Abbildung 2-4a zeigt ist die dazu benötigte Transformation $c \rightarrow (x, y)$ durch die Position der einzelnen Pixel in der Bildebene definiert. Diese Positionen werden in der Regel a priori im Rahmen einer Kamerakalibrierung bestimmt und über eine Look-Up-Tabelle zur Verfügung gestellt. Ein solches Vorgehen ist aufgrund der im Vergleich zu Flächenkameras geringeren Pixelzahl einfacher als die sonst verwendeten Kalibrierparameter zur Beschreibung der Bildverzerrung. Bei der Bildauswertung von Einzeilenkameras wird als weitere Vereinfachung häufig davon ausgegangen, dass die Bildzeile exakt im Kamerazentrum liegt. Damit gilt wie Abbildung 2-4b zeigt, die Vereinfachung $\bar{x}_p = x = 0$. In diesem Fall gilt die Transformation $c \rightarrow (0, y)$, so dass ausgehend von Gleichung (2.16) für zeilenbasierte Kameras die fundamentale Abbildungsgleichung zu

$$\begin{aligned} 0 - x_0 &= z' \frac{\Delta X'}{\Delta Z'} = -f \frac{\Delta X'}{\Delta Z'} \\ y_i - y_0 &= z' \frac{\Delta Y'}{\Delta Z'} = -f \frac{\Delta Y'}{\Delta Z'} \end{aligned} \quad (2.19)$$

modifiziert werden kann. Dabei ist y_i die Bildkoordinate des in Scanzeile r_i abgebildeten Objektpunktes \mathbf{X}_p . Zur Bestimmung der Koordinaten $\Delta \mathbf{X}'_p$ werden analog zu Gleichung (2.17) und (2.18) nach

$$[\Delta X' \quad \Delta Y' \quad \Delta Z']^T = \mathbf{R}^T(\omega, \varphi, \kappa) [X_p - X_0 \quad Y_p - Y_0 \quad Z_p - Z_0]^T$$

die Objektkoordinaten \mathbf{X}_p mit den Koordinaten \mathbf{X}_0 des Projektionszentrums reduziert und mit der Rotationsmatrix $\mathbf{R}^T(\omega, \varphi, \kappa)$ in ein zum Bildkoordinatensystem paralleles Koordinatensystem transformiert. Um diese Transformation

durchführen zu können, müssen damit für jeden Aufnahmezeitpunkt t einer Bildzeile die Koordinaten des Projektionszentrums \mathbf{X}_0 sowie die Orientierung der Kamera ω zur Verfügung stehen.

Gleichung (2.19) wird als Bedingungsgleichung bei der Auswertung von Bildern satellitengestützter Zeilenkameras verwendet. In diesem Fall kann aufgrund des glatten Bahnverlaufs die Änderung der Parameter der äußeren Orientierung durch eine zeitabhängige Funktion modelliert werden. Damit ist eine geometrische Auswertung der aufgenommenen Bildstreifen durch die Bereitstellung einer eingeschränkten Zahl von zugehörigen Bild- und Objektpunktkoordinaten möglich. Eine solche Interpolationsvorschrift kann für flugzeuggetragene Zeilenkameras aufgrund der größeren Bewegungsdynamik nicht definiert werden. Damit muss die äußere Orientierung der Kameras zu jedem Zeitpunkt t bereitgestellt werden. Dies erfolgt in der Regel durch den Einsatz eines GPS/inertial-Systems.

2.2.2 Geometrische Kalibrierung des Gesamtsystems

Ziel der kombinierten Aerotriangulation ist die Kalibrierung des aus GPS, inertialem Meßsystem und Kamera bestehenden Gesamtsystems, um so die Messwerte der drei Sensorkomponenten in ein gemeinsames Koordinatensystem zu überführen. Die Bestimmung der gesuchten Kalibrationsparameter erfolgt dabei durch die Modifikation der in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Aerotriangulation.

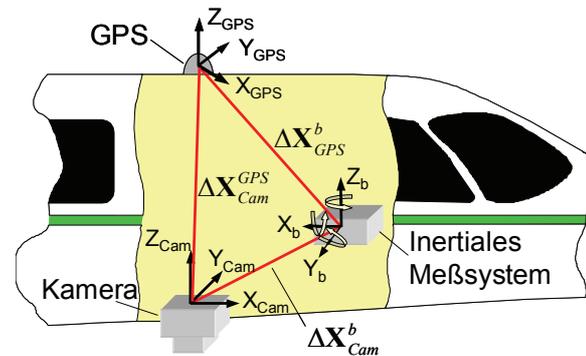


Abbildung 2-5 Inertiales Meßsystem und Luftbildkamera. *Abbildung 2-6 Koordinatensysteme für die direkte Georeferenzierung.*

Abbildung 2-5 zeigt die typische Sensorkonfiguration der direkten Georeferenzierung, bei der ein inertiales Meßsystem (Litton LR 86) an eine Luftbildkamera (RMK TOP) angebracht ist. Die sich aus den unterschiedlichen Positionen und Ausrichtungen der Sensorkomponenten GPS, inertiales Meßsystem und Kamera ergebenden Koordinatensysteme sind in Abbildung 2-6 schematisch dargestellt.

Um den zur photogrammetrischen Auswertung benötigten Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten bei einer direkten Messung der äußeren Orientierung zu beschreiben, muss die grundlegende perspektive Abbildungsgleichung (2.14) modifiziert werden zu

$$\mathbf{X}_p^l = \mathbf{X}_0^l + \mathbf{R}_b^l \left[\lambda \Delta \mathbf{R}_{Cam}^b \cdot \bar{\mathbf{x}}_p^{Cam} + \Delta \mathbf{X}_{Cam}^b - \Delta \mathbf{X}_{GPS}^b \right] \tag{2.20}$$

Die einzelnen Komponenten repräsentieren dabei:

$$\mathbf{X}_p^l = \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} \quad \text{die Objektpunktkoordinaten des Punktes } P \text{ im übergeordneten System,}$$

$$\mathbf{X}_0^l = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

die GPS Position des Phasenzentrums der Antenne im übergeordneten System,

$$\mathbf{R}_b^l(\omega, \phi, \kappa)$$

die Rotation vom Körperkoordinatensystem b des inertialen Meßsystems in das übergeordnete Geländekoordinatensystem mit den gemessenen Orientierungswinkeln ω, ϕ, κ

$$\Delta \mathbf{R}_{Cam}^b(\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa)$$

die Rotation vom Bildkoordinatensystem p des abbildenden Sensors in das Körperkoordinatensystem b des INS, wobei die Winkel $\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa$ die unbekannte Fehl- ausrichtung (Misalignment) zwischen beiden Systemen definieren.

$$\bar{\mathbf{x}}_p^{Cam} = \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix}^{Cam}$$

der Vektor des Bildpunktes aus den reduzierten Bildkoordinaten, gegeben im Kamerakoordinatensystem Cam .

$$\Delta \mathbf{X}_{cam}^b = \begin{bmatrix} \Delta X_{cam} \\ \Delta Y_{cam} \\ \Delta Z_{cam} \end{bmatrix}^b$$

die konstante Verschiebung zwischen inertialem Meßsystem und Kamera, definiert im Körperkoordinatensystem b ,

$$\Delta \mathbf{X}_{GPS}^b = \begin{bmatrix} \Delta X_{GPS} \\ \Delta Y_{GPS} \\ \Delta Z_{GPS} \end{bmatrix}^b$$

die konstante Verschiebung zwischen inertialem Meßsystem und GPS-Antenne, gegeben im Körperkoordinatensystem b .

In der Regel werden die Kamera, das inertielle Meßsystem und die GPS-Antenne a priori eingemessen und die somit bekannten Positionsdifferenzen bereits während der Prozessierung der GPS/inertial-Daten berücksichtigt. Die Positionsunterschiede $\Delta \mathbf{X}_{cam}^b$ zwischen Kamera und inertialem Meßsystem üblicherweise sehr klein, zudem sind die Schätzwerte aus der Aerotriangulation stark mit der Orientierungsdifferenz $\Delta \mathbf{R}_{Cam}^b(\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa)$ korreliert. Die für das GPS/inertial-System bestimmten Positionsparameter beziehen sich deshalb in der Regel bereits auf das Projektionszentrum der Kamera, so dass in Gleichung (2.20) die Komponenten $\Delta \mathbf{X}_{cam}^b$ und $\Delta \mathbf{X}_{GPS}^b$ entfallen können. In diesem Fall vereinfacht sich Gleichung (2.20) zu

$$\mathbf{X}_p = \mathbf{X}_0 + \lambda \cdot \mathbf{R}_b \cdot \Delta \mathbf{R}_{Cam}^b \cdot \mathbf{x}^{Cam} \quad (2.21)$$

Gleichung (2.21) dient als Basis zur Bestimmung der gesuchten Kalibrierparameter $\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa$. Diese Misweisung definiert nach $\Delta \mathbf{R}_b^{Cam}(\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa)$ die Rotation vom Bildkoordinatensystem der Kamera in das Körperkoordinatensystem des inertialen Meßsystems. Analog zu der in Abschnitt 2.2.1 vorgestellten Standard-Aerotriangulation definiert Gleichung (2.21) den für die Parameterschätzung verwendeten funktionalen Zusammenhang zwischen den beobachteten Bildkoordinaten und den zugehörigen Objektkoordinaten \mathbf{X}_p . Die Objektkoordinaten \mathbf{X}_p sind bekannte Größen für Passpunkte, während sie im Fall von Verknüpfungspunkten als unbekannte Parameter angesetzt werden. Bei einer kombinierten Aerotriangulation unter Einbeziehung einer direkten Georeferenzierung werden die Rotation $\mathbf{R}_b(\omega, \phi, \kappa)$ und die Translation \mathbf{X}_0 durch das GPS/inertial-System erfasst und stehen somit als bekannte Parameter zur Verfügung. Als zu bestimmende Parameter verbleiben damit lediglich die Werte $\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa$ zur Beschreibung der Fehlausrichtung gegenüber dem Kamerakoordinatensystem.

Während bei Standard-Aerotriangulation eventuelle Fehler der Kamerakalibrierung noch im Rahmen der Auswertung eliminiert werden können, wirken sich diese bei der direkten Georeferenzierung unmittelbar auf die Genauigkeit der photogrammetrisch bestimmten Punktkoordinaten aus. Besonders kritisch ist dabei eine potentielle Änderungen der in der Laborkalibrierung bestimmten Parameter der inneren Orientierung während des Bildfluges durch thermische Einflüsse. Ein annähernd linearer Zusammenhang zwischen einer Änderung der Umgebungstemperatur und der Kammerkonstante kann sowohl aus theoretischer Betrachtungen prognostiziert als auch durch praktische Untersuchungen nachgewiesen werden (Meier 1978). Für ein bei 20° Celsius kalibriertes System, das einer Umgebungstemperatur von -10° Celsius ausgesetzt wird, sind dabei Änderungen der Kammerkonstante in der Größenordnung von 60µm mög-

lich (Greening et al 2000). Zusätzlich können sich durch thermische Effekte auch für fest montierte Sensorkonfigurationen zu Änderungen der Ausrichtungen und Positionen der Sensoren relativ zueinander ergeben. Damit ist beim Einsatz der direkten Georeferenzierung eine regelmäßige Kontrolle der Kalibrierung der Kamera und des Gesamtsystems im Rahmen einer kombinierten Aerotriangulation unumgänglich.

2.3 Kombinierte Aerotriangulation zur Korrektur der direkten Georeferenzierung

Der in Abschnitt 2.2 vorgestellte Ansatz der kombinierten Aerotriangulation erlaubt die Kalibrierung des Gesamtsystems für die direkte Georeferenzierung. Die kombinierte Aerotriangulation kann jedoch auch zur Kontrolle und gegebenenfalls Korrektur der mit dem GPS/inertial-System gemessenen Parameter der äußeren Orientierung eingesetzt werden. Dies kann beispielsweise notwendig sein, da wie in Abschnitt 2.1.2 diskutiert, die Qualität der mit einem GPS/inertial-System bestimmten Kamerapositionen durch die Genauigkeit der GPS-Positionierung aus der differentiellen Phasenbeobachtung limitiert ist. Mögliche Fehlerquellen der GPS-Positionierung liegen in der Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten nach Signalunterbrechungen und Satellitenwechseln oder ergeben sich durch die Verwendung eines ungenügenden Atmosphärenmodell. Insbesondere bei sehr großen Basislängen kann es damit zu systematischen Offset- und Drifteffekten der berechneten GPS-Positionen kommen (Ackermann 1996). Da die Fehler der GPS-Trajektorie voll in das Ergebnis der direkten Georeferenzierung eingehen, müssen diese im Rahmen einer kombinierten Aerotriangulation kontrolliert und gegebenenfalls eliminiert werden. Die Korrektur der gemessenen Parameter der äußeren Orientierung durch eine kombinierte Aerotriangulation ermöglicht darüber hinaus eine Reduktion der Genauigkeitsanforderungen an das GPS/inertial-System. Dies erlaubt eine Reduktion der Kosten für die einzelnen Komponenten und damit des Gesamtsystems für die direkte Georeferenzierung. Abhängig von den Genauigkeitsanforderungen an die Georeferenzierung, den akzeptierten Kosten für das GPS/inertial-System und dem benötigten Aufwand für die Messung von Pass- und Verknüpfungspunkten ist somit durch die kombinierte Aerotriangulation der flexible Aufbau eines den jeweiligen Bedürfnissen optimal angepassten Gesamtsystems möglich.

Häufig ist im Rahmen der kombinierten Aerotriangulation keine klare Trennung zwischen den nach Abschnitt 2.2 zu bestimmenden Kalibrierparametern und den Parametern zur Korrektur der gemessenen Orientierung möglich, da diese Werte sehr stark miteinander korreliert sind. Aus diesem Grund erfolgt in der Regel eine gemeinsame Schätzung aller signifikanten Parameter in einem Schritt. Der Einsatz einer solchen kombinierten Aerotriangulation, die auch eine Korrektur der direkten Georeferenzierung ermöglicht, wird im folgenden anhand des streifenweisen Integrationsansatzes (Abschnitt 2.3.1) und des Orientierungsbildansatzes (Abschnitt 2.3.2) diskutiert.

2.3.1 Streifenweiser Integrationsansatz

Die streifenweise Bestimmung von Korrekturparametern zur Stützung der direkten Georeferenzierung durch eine Aerotriangulation wurde für die geometrische Prozessierung von Bildern der flugzeuggetragenen digitalen Zeilenkamera DPA eingesetzt (Haala et al 1998). In weiteren Untersuchungen konnte die Tauglichkeit des Verfahrens für die Prozessierung von Daten verschiedener anderer GPS/inertial-Systeme und Kameras nachgewiesen werden (Haala et al 2000). Die Grundidee des Verfahrens liegt darin, die verbleibenden Fehler der gemessenen Parameter der äußeren Orientierung durch ein Polynommodell niedriger Ordnung zu approximieren und dessen Parameter im Rahmen einer Aerotriangulation zu schätzen (Gibson 1994). Aus den so bestimmten Parametern werden dann Korrekturterme abgeleitet, die im Rahmen einer erneuten GPS-gestützten Mechanisierung der Inertialdaten die Verbesserung der direkten Georeferenzierung ermöglichen. Dieser Prozess wird so lange wiederholt, bis das optimale Ergebnis erreicht ist.

Durch das GPS/inertial-System wird zu jedem Zeitpunkt t die Position X_0, Y_0, Z_0 und Orientierung ω, φ, κ der Kamera bestimmt. Wie in Abschnitt 2.1 diskutiert, weisen die mit einem inertialen Meßsystem bestimmten Positionen und Orientierungen ein zeitabhängiges Fehlerverhalten auf, Probleme bei der GPS-Prozessierung können ebenfalls zu zeitabhängigen Driften der bestimmten GPS-Positionen führen. Aus diesem Grund wird für die Korrektur der zeitabhängigen Parameter der äußeren Orientierung $\mathbf{X}_0(t) = [X_0(t) \ Y_0(t) \ Z_0(t)]^T$ und $\boldsymbol{\omega}(t) = [\omega(t) \ \varphi(t) \ \kappa(t)]^T$ ein Polynommodell niedriger Ordnung

$$p(t) = a_0 + a_1 t + \dots + a_n t^n \quad (2.22)$$

angesetzt. Darin entsprechen die Polynomkoeffizienten a_0, \dots, a_n den Korrekturparametern für die direkte Georeferenzierung, die im Rahmen einer der Aerotriangulation bestimmt werden. Die Schätzung der unbekanntenen Polynomkoeffizienten basiert auf der modifizierten Kollinearitätsgleichung (2.21) der kombinierten Aerotriangulation

$$\mathbf{X}_p = \tilde{\mathbf{X}}_p(t) + \lambda \cdot \tilde{\mathbf{R}}_b^l(t) \cdot \Delta \mathbf{R}_{Cam}^b \cdot \mathbf{x}_p^{Cam}. \quad (2.23)$$

Neben der unbekanntenen Orientierungsdifferenz $\Delta \mathbf{R}_{Cam}^b(\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa)$ zwischen Bild- und Körperkoordinatensystem sind in Gleichung (2.23) noch Korrekturterme für die gemessenen Positionen $\mathbf{X}_0(t)$ und Orientierungswinkel $\omega(t)$, aus denen die Rotationsmatrix $\tilde{\mathbf{R}}_b^l(t)$ gebildet wird, zu bestimmen. Die Fehler der direkten Georeferenzierung werden durch das in Gleichung (2.22) definierte Polynommodell beschrieben. Üblicherweise kann der Grad des Polynommodells auf die Bestimmung von konstanten Fehlern und zeitabhängigen Driften erster Ordnung beschränkt werden. Damit ergeben sich die in Gleichung (2.23) durch die Parameterschätzung zu korrigierenden Parameter der Position

$$\tilde{\mathbf{X}}_0^l(t) = [\tilde{X}_0(t) \quad \tilde{Y}_0(t) \quad \tilde{Z}_0(t)]^T$$

und Lage

$$\tilde{\mathbf{R}}_b^l(t) = \tilde{\mathbf{R}}_b^l(\tilde{\omega}(t), \tilde{\varphi}(t), \tilde{\kappa}(t))$$

jeweils zu

$$\begin{aligned} \tilde{X}_0(t) &= X_0(t) + a_0^{X_0} + a_1^{X_0} \cdot t \\ \tilde{Y}_0(t) &= Y_0(t) + a_0^{Y_0} + a_1^{Y_0} \cdot t \\ \tilde{Z}_0(t) &= Z_0(t) + a_0^{Z_0} + a_1^{Z_0} \cdot t \\ \tilde{\omega}(t) &= \omega(t) + a_0^\omega + a_1^\omega \cdot t \\ \tilde{\varphi}(t) &= \varphi(t) + a_0^\varphi + a_1^\varphi \cdot t \\ \tilde{\kappa}(t) &= \kappa(t) + a_0^\kappa + a_1^\kappa \cdot t \end{aligned} \quad (2.24)$$

Darin sind $\mathbf{X}_0(t)$ und $\omega(t)$ die durch das GPS/inertial-System gemessenen Parameter der äußeren Orientierung und $\mathbf{a}_0^{X_0}, \mathbf{a}_1^{X_0}$ und $\mathbf{a}_0^\omega, \mathbf{a}_1^\omega$ die durch die Aerotriangulation zu bestimmenden konstanten und zeitabhängigen Terme der Korrekturpolynome. Die Beschränkung der Korrektur für die gemessenen Positionen auf konstante und lineare Terme $\mathbf{a}_0^{X_0}$ und $\mathbf{a}_1^{X_0}$ ist zulässig, da wie in Abschnitt 2.1 diskutiert, die Positionsgenauigkeit eines integrierten GPS/inertial-Systems praktisch durch die Qualität der GPS-Positionierung vorgegeben wird. Damit sind für die gemessenen Positionen lediglich konstante oder lineare Fehler zu erwarten, die sich beispielsweise aus fehlerhaften Referenzstationskoordinaten oder durch fehlerhaft bestimmte GPS-Mehrdeutigkeiten ergeben. Bei inertialen Meßsystemen, die keine GPS-Stützung erfahren, müssen jedoch auch quadratische Korrekturglieder bestimmt werden. Für die gemessenen Orientierungen $\omega(t)$ wird ein konstanter Fehler \mathbf{a}_0^ω erwartet, der sich aus einer fehlerhaft bestimmten Orientierung des Systems zu Beginn des ausgewerteten Bildstreifens ergibt. Zusätzlich können durch nicht korrigierte konstante Fehler der Drehratenmessung näherungsweise lineare Driften \mathbf{a}_1^ω in daraus abgeleiteten Orientierungswinkeln entstehen.

Neben den sensorspezifischen Fehlern der gemessenen Orientierungen in Gleichung (2.24) wird durch die kombinierte Aerotriangulation ausgehend von Gleichung (2.23) die Fehlaustrichtung $\Delta \mathbf{R}_{Cam}^b(\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa)$ zwischen Kamera- und Körperkoordinatensystem geschätzt. Für den Fall, dass für die Korrektur der gemessenen Winkel $\omega(t)$ lediglich von einem konstanten, differentiell kleinen Term \mathbf{a}_0^ω ausgegangen wird, kann wegen der in diesem Fall gültigen Beziehung

$$\mathbf{R}_b(\omega + a_0^\omega, \phi + a_0^\phi, \kappa + a_0^\kappa) = \mathbf{R}_b(\omega, \phi, \kappa) \cdot \mathbf{R}_b(a_0^\omega, a_0^\phi, a_0^\kappa)$$

Gleichung (2.23) erweitert werden zu

$$\mathbf{X}_p = \mathbf{X}_0 + \lambda \cdot \mathbf{R}_b^l(\omega, \phi, \kappa) \cdot \mathbf{R}_b^l(a_0^\omega, a_0^\phi, a_0^\kappa) \cdot \Delta \mathbf{R}_{Cam}^b(\Delta\omega, \Delta\phi, \Delta\kappa) \cdot \mathbf{x}_p^{Cam} \quad (2.25)$$

Bei einer Parameterschätzung durch eine kombinierte Aerotriangulation unter Verwendung von Gleichung (2.25) ist wegen des Matrixprodukts $\mathbf{R}_b^l(a_0^\omega) \cdot \Delta \mathbf{R}_{Cam}^b(\Delta\omega)$ eine Trennung der zu bestimmenden konstanten Fehler \mathbf{a}_0^ω und der

Fehlausrichtung $\Delta\omega$ nicht möglich; die Parameter sind hoch redundant. Der im Rahmen der Aerotriangulation zu bestimmende konstante Winkelfehler \mathbf{a}_0^ω eliminiert somit gleichzeitig eine eventuelle Fehlausrichtung $\Delta\omega$, auf eine explizite Schätzung von $\Delta\omega$ kann damit verzichtet werden.

Die Korrektur der mit einem inertialen Meßsystem bestimmten Orientierungen durch ein Polynom niederer Ordnung nach Gleichung (2.24) ist eine Vereinfachung des wahren Fehlerverhaltens. Die Mechanisierung der gemessenen Drehraten resultiert in Korrelationen zwischen den einzelnen Orientierungswinkeln, die mit einem solchen Ansatz nicht berücksichtigt werden. Wie bereits in Abschnitt 2.1 diskutiert, definiert während der Mechanisierung der Inertialdaten die Rotationsmatrix $\mathbf{R}_b^{l_0}$ den Zusammenhang zwischen dem Körpersystem b des Inertialsensors und dem übergeordneten Koordinatensystem der Navigationsrechnung, das beispielsweise durch das topozentrische Koordinatensystem l_0 definiert ist. Da die Matrix $\mathbf{R}_b^{l_0}$ während der Mechanisierung jeweils mit den gemessenen Drehraten nachgeführt wird, ist so immer der jeweils aktuelle Bezug zwischen beiden Koordinatensystemen definiert. Ein konstanter Fehler \mathbf{a}_0^ω der gemessenen Orientierungswinkel $\omega(t)$ ist auf eine fehlerhafte Ausrichtung des Körpersystems in Bezug zum übergeordneten System zurückzuführen. Während der Mechanisierung führt eine solche Missweisung dazu, dass physikalisch gemessene Winkeländerungen einer Achse als Winkeländerungen einer anderen Achse interpretiert werden. Damit sind in den berechneten Orientierungswinkeln jeweils Restanteile der gemessenen Drehraten der anderen Achsen enthalten. Die unter Verwendung der fehlerbehafteten Matrix $\mathbf{R}_b^{l_0}$ berechneten Winkel $\omega(t)$ sind somit miteinander korreliert.

Die Korrektur dieser Effekte wird bei dem streifenweisen Integrationsansatzes iterativ durchgeführt. Zunächst erfolgt eine GPS-gestützte Mechanisierung der gemessenen Drehraten und Beschleunigungen. In einem zweiten Schritt werden dann durch eine kombinierte Aerotriangulation nach Gleichung (2.23) die Parameter $\mathbf{a}_0^{X_0}, \mathbf{a}_1^{X_0}, \mathbf{a}_0^\omega, \mathbf{a}_1^\omega$ der Korrekturterme bestimmt. Die Schätzung der Parameter kann entweder für den gesamten Block oder für jeden Flugstreifen getrennt erfolgen. Anschließend ist eine Verbesserung der GPS-gestützten Mechanisierung der Inertialdaten durch die Berücksichtigung dieser Korrekturparameter möglich. Dieser Prozess – GPS-gestützte Mechanisierung der Inertialdaten und Bestimmung von Korrekturparametern durch kombinierte Aerotriangulation wird so lange wiederholt, bis die endgültige Lösung erreicht wird. Dies ist dann der Fall, wenn keine signifikante Änderung der geschätzten Parameter mehr erkennbar ist und im Objektraum keine Verbesserungen der Punktbestimmung mehr erfolgt. In der Regel ist dieses Abbruchkriterium nach 2-3 Iterationen erreicht.

2.3.2 Orientierungspunktansatz

Beim streifenweisen Integrationsansatz wird ein lineares Polynom zur Korrektur der gemessenen Orientierungsparameter für den gesamten Luftbildblock oder für einzelne Flugstreifen bestimmt. Alternativ dazu können mit dem Orientierungspunktansatz oder Orientierungsbildansatz die einzelnen Bildstreifen in noch kleinere Abschnitte unterteilt werden. Damit ist eine noch häufigere Nachführung der Korrekturparameter möglich. Der Orientierungsbildansatz wurde ursprünglich ebenfalls für die photogrammetrische Punktbestimmung mit den Dreizeilenbildern des DPA-Systems entwickelt (Hofmann 1986) (Müller 1991), derzeit wird der Ansatz in einem kommerziellen Softwarepaket zur Auswertung von Bildern der digitalen Luftbildkamera ADS40 eingesetzt (Tempelmann et al 2000) (Hinsken et al 2002). Im Gegensatz zu dem streifenweisen Integrationsansatz ist bei dem Orientierungsbildansatz keine iterative Korrektur der Parameter der äußeren Orientierung durch eine wiederholte Mechanisierung der Daten des inertialen Meßsystems vorgesehen. Abhängig von der Qualität der Inertialdaten ist damit eine Korrektur der Parameter der äußeren Orientierung durch ein lineares Korrekturpolynom nur für relativ kurze Intervalle zulässig. Aus diesem Grund sind beim Orientierungsbildansatz die Parameter der Korrekturpolynome für relativ kurze Stücke jeweils neu zu bestimmen. Dies erfolgt ähnlich wie bei der Approximation einer komplexen Kurve durch einen Spline mittels zusammengesetzter Polynome.

Analog zum streifenweisen Integrationsansatz werden die zeitabhängigen Fehler der gemessenen Parameter der äußeren Orientierung zunächst durch die Schätzung eines Polynoms niederer Ordnung eliminiert. Bei einer Beschränkung auf konstante und lineare Fehler wird Gleichung (2.22) auf das Polynom $p(t) = a_0 + a_1 t$ reduziert. Für den Fall, dass für das Polynom $p(t)$ mindestens zwei beobachtete Werte vorliegen, lassen sich sofort die unbekannt Parameter $a_i \forall i = 0,1$ bestimmen. Diese Korrekturterme seien innerhalb des Intervalls $t \in [T_j, T_{j+1}]$ gültig. Damit ergibt sich

$$p(t) = a_0 + a_1(t - T_j). \quad (2.26)$$

Sollen Parameter der äußeren Orientierung über einen längeren Zeitraum korrigiert werden, so werden beim Orientierungsbildansatz mehrere lineare Polygon stückweise zusammengefügt. In diesem Fall müssen die Parameter $a_i \forall i = 0,1$ jeweils für die Zeitpunkte T_j, T_{j+1}, \dots, T_N neu bestimmt werden. Dabei soll die resultierende Funktion als zusätzliche Bedingung kontinuierlich an den jeweiligen Intervallgrenzen sein. Die Funktionswerte p dieses Polynoms an den Intervallgrenzen ergeben sich nach Gleichung (2.26) zu

$$\begin{aligned} p(T_j) &= a_0 \\ p(T_{j+1}) &= a_0 + a_1(T_{j+1} - T_j) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Durch Umformung von Gleichung (2.27) lassen sich die Polynomparameter a_0, a_1 in Abhängigkeit von den Funktionswerten an den Intervallgrenzen durch

$$\begin{aligned} a_0 &= p(T_j) \\ a_1 &= \frac{p(T_{j+1}) - p(T_j)}{(T_{j+1} - T_j)} \end{aligned}$$

darstellen. Damit kann nach Gleichung (2.26) das Polynom umgeformt werden zu

$$p(t) = p(T_j) + \frac{p(T_{j+1}) - p(T_j)}{(T_{j+1} - T_j)} \cdot (t - T_j). \quad (2.28)$$

Wird Gleichung (2.28) in Folge der neuen Parameter $p(T_j), p(T_{j+1})$ neu geordnet, so ergibt sich

$$\begin{aligned} p(t) &= \left(p(T_j) + \frac{-p(T_j) \cdot (t - T_j)}{(T_{j+1} - T_j)} \right) + \frac{p(T_{j+1}) \cdot (t - T_j)}{(T_{j+1} - T_j)} \\ &= \left(1 - \frac{t - T_j}{T_{j+1} - T_j} \right) p(T_j) + \left(\frac{t - T_j}{T_{j+1} - T_j} \right) p(T_{j+1}) \\ &= \frac{T_{j+1} - t}{T_{j+1} - T_j} p(T_j) + \frac{t - T_j}{T_{j+1} - T_j} p(T_{j+1}) \\ &= k_t p(T_j) + (1 - k_t) p(T_{j+1}) \end{aligned} \quad (2.29)$$

Nach Gleichung (2.29) kann die Schätzung der Korrekturparameter a_0, a_1 eines Polynoms erster Ordnung durch die Bestimmung der Funktionswerte dieses Polynoms $p(t)$ an den jeweiligen Stützstellen T_j und T_{j+1} ersetzt werden. Dieser Ansatz garantiert dabei gleichzeitig die geforderte Kontinuität des resultierenden zusammengesetzten Polynoms an den Intervallgrenzen T_j und T_{j+1} . Damit ergibt sich ein Spline mit c_0 -Kontinuität, dessen Funktionswerte an den Stützstellen stetig sind. Der Orientierungsbildansatz nutzt ein solches zusammengesetztes Polynom erster Ordnung für die Korrektur der gemessenen Parametern der äußeren Orientierung einer Kamera.

Zum besseren Verständnis wird zunächst davon ausgegangen, dass die äußere Orientierung zwischen den Zeitpunkten T_j, T_{j+1} jeweils durch ein lineares Polynom $p(t)$ gegeben ist. Nach Gleichung (2.29) wird dieses Polynom nicht durch einen konstanten und linearen Term a_0 und a_1 beschrieben, sondern ist durch seine Funktionswerte $p(T_j)$ und $p(T_{j+1})$ zu den Zeitpunkten T_j und T_{j+1} definiert. Da im weiteren Verlauf die Parameter der äußeren Orientierung für diese Punkte explizit bestimmt werden, bezeichnet man Aufnahmen zu diesen ausgewählten Zeitpunkten T_j und T_{j+1} auch als Orientierungsbilder. Stehen die Parameter der äußeren Orientierung zu den Zeitpunkten T_j, T_{j+1} zur Verfügung, so können daraus dann die Orientierungsparameter zu dem Zeitpunkt t linear interpoliert werden. Ausgehend von Gleichung (2.29) ergeben sich die einzelnen Parameter zu:

$$\begin{aligned}
X_t &= \frac{T_{j+1}-t}{T_{j+1}-T_j} X_{T_j} + \frac{t-T_j}{T_{j+1}-T_j} X_{T_{j+1}} = k_t X_{T_j} + (1-k_t) X_{T_{j+1}} \\
Y_t &= \frac{T_{j+1}-t}{T_{j+1}-T_j} Y_{T_j} + \frac{t-T_j}{T_{j+1}-T_j} Y_{T_{j+1}} = k_t Y_{T_j} + (1-k_t) Y_{T_{j+1}} \\
Z_t &= \frac{T_{j+1}-t}{T_{j+1}-T_j} Z_{T_j} + \frac{t-T_j}{T_{j+1}-T_j} Z_{T_{j+1}} = k_t Z_{T_j} + (1-k_t) Z_{T_{j+1}} \\
\omega_t &= \frac{T_{j+1}-t}{T_{j+1}-T_j} \omega_{T_j} + \frac{t-T_j}{T_{j+1}-T_j} \omega_{T_{j+1}} = k_t \omega_{T_j} + (1-k_t) \omega_{T_{j+1}} \\
\varphi_t &= \frac{T_{j+1}-t}{T_{j+1}-T_j} \varphi_{T_j} + \frac{t-T_j}{T_{j+1}-T_j} \varphi_{T_{j+1}} = k_t \varphi_{T_j} + (1-k_t) \varphi_{T_{j+1}} \\
\kappa_t &= \frac{T_{j+1}-t}{T_{j+1}-T_j} \kappa_{T_j} + \frac{t-T_j}{T_{j+1}-T_j} \kappa_{T_{j+1}} = k_t \kappa_{T_j} + (1-k_t) \kappa_{T_{j+1}}
\end{aligned} \tag{2.30}$$

Die Annahme einer linearen Änderung der äußeren Orientierung zwischen den Zeitpunkten T_j und T_{j+1} ist bei einer flugzeuggetragenen Kamera aufgrund der großen Bewegungsdynamik auch für relativ kurze Intervalle nicht zulässig. Stehen jedoch mit einem GPS/inertial-System gemessene Parameter der äußeren Orientierung zur Verfügung, so ist eine Korrektur der Abweichung der tatsächlichen Bewegung von dem angenommenen linearen Bewegungsmodell möglich. Hierfür werden zunächst die zu den Zeitpunkten T_j, T_{j+1} gemessenen Parametern der äußeren Orientierung linear für den Zeitpunkt t interpoliert. Die Differenz zu den zum Zeitpunkt t tatsächlich gemessenen Parametern der äußeren Orientierung $X_t, Y_t, Z_t, \omega_t, \varphi_t, \kappa_t$ ergibt dann die gesuchten Korrekturparameter.

$$\begin{aligned}
\delta X_t &= k_j X_{T_j} + (1-k_j) X_{T_{j+1}} - X_t \\
&\vdots \\
\delta \kappa_t &= k_j \kappa_{T_j} + (1-k_j) \kappa_{T_{j+1}} - \kappa_t
\end{aligned}$$

Mit diesen Korrekturtermen lässt sich die äußere Orientierung einer flugzeuggetragenen Kamera in Abhängigkeit von den Orientierungsparametern der Stützpunkte darstellen. Für den Zeitpunkt t ergibt sich nach Gleichung (2.30)

$$\begin{aligned}
\tilde{X}_t &= \frac{T_{j+1}-t}{T_{j+1}-T_j} X_{T_j} + \frac{t-T_j}{T_{j+1}-T_j} X_{T_{j+1}} + \delta X_t = k_t X_{T_j} + (1-k_t) X_{T_{j+1}} + \delta X_t \\
&\vdots \\
\tilde{\kappa}_t &= \frac{T_{j+1}-t}{T_{j+1}-T_j} \kappa_{T_j} + \frac{t-T_j}{T_{j+1}-T_j} \kappa_{T_{j+1}} + \delta \kappa_t = k_t \kappa_{T_j} + (1-k_t) \kappa_{T_{j+1}} + \delta \kappa_t
\end{aligned} \tag{2.31}$$

Damit stehen verbesserte Werte für die gemessene äußere Orientierung zur Verfügung. Diese Parameter werden nach $\tilde{\mathbf{X}}_t \triangleq \tilde{\mathbf{X}}_0(t)$ und $\tilde{\mathbf{R}}_b(t) \triangleq \tilde{\mathbf{R}}_b(\tilde{\boldsymbol{\omega}}_t)$ in die modifizierte Kollinearitätsgleichung (2.23) eingesetzt. Nach der Messung von Pass- und Verknüpfungspunkten als beobachtete Größen können damit im Rahmen einer kombinierten Aerotriangulation die korrigierten Parameter der äußeren Orientierung $\mathbf{X}(T)$ und $\boldsymbol{\omega}(T)$ für die Zeitpunkte T_j, T_{j+1}, \dots, T_N bestimmt werden.

Das Prinzip des Orientierungsbildansatzes ist in Abbildung 2-7 schematisch dargestellt. Die gepunktete Linie repräsentiert dabei den zeitabhängigen Verlauf der beispielsweise durch ein GPS/inertial-System gemessenen äußeren Orientierung der Kamera. Zur Korrektur dieser fehlerbehafteten Parameter werden durch eine kombinierte Aerotriangulation zu den Zeitpunkten T_j, T_{j+1}, \dots, T_N die wahren Parameter der äußeren Orientierung geschätzt. Ausgehend von den so bestimmten Parametern \mathbf{X}_T und $\boldsymbol{\omega}_T$ für diese Orientierungspunkte werden dann nach Gleichung (2.31) die gemessenen Orientierungsdaten für alle Zeitpunkte t korrigiert. Die Schätzung der äußeren Orientierung für vorgegebenen Zeitpunkte nach dem Orientierungsbildansatz entspricht damit der Schätzung eines linearen Korrekturpolynoms beim streifenweisen Integrationsansatz. Bei der streifenweisen Integration werden im Rahmen einer kombinierten Aerotriangulation die gemessenen Orientierungsparameter durch die konstanten und linearen Korrekturterme verbessert, beim Orientierungsbildansatz werden die aus der direkten Georeferenzierung abgeleiteten Werte $\delta \mathbf{X}_t$ und $\delta \boldsymbol{\omega}_t$ korrigiert. Beide Ansätze setzen ein Fehlerverhalten der gemessenen Orientierungsparameter voraus, das zumindest für einen begrenzten Zeitraum durch ein Polynom erster Ordnung modelliert werden kann.

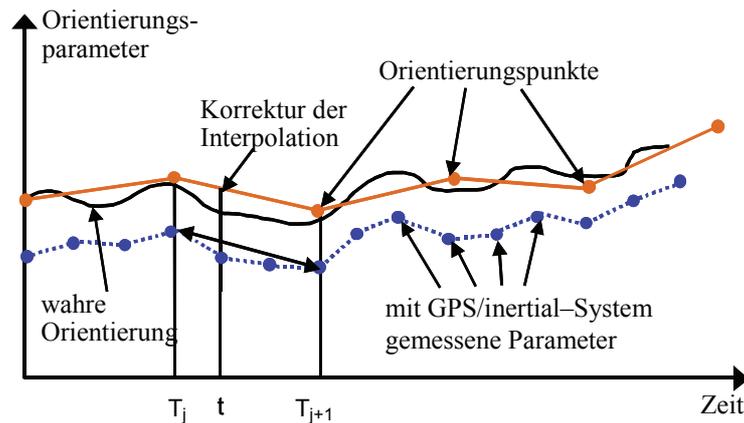


Abbildung 2-7: Prinzip des Orientierungsbildansatzes nach (Hinsken et al 2002).

Beim streifenweisen Integrationsansatz werden durch die kombinierte Aerotriangulation Korrekturterme für die Messungen des GPS/inertial-Systems bestimmt und über eine erneute Mechanisierung der Inertialdaten in die Georeferenzierung eingebracht. Eine solche iterative Aerotriangulation und Mechanisierung ist beim Orientierungspunktansatz nicht vorgesehen. Die aus den nicht korrigierten Einflüssen wie der fehlerhaften Anfangsausrichtung des inertialen Meßsystems resultierenden systematischen Fehler müssen in diesem Fall durch die häufigere Anpassung der Korrekturterme an den Orientierungspunkten kompensiert werden. Der Abstand zwischen den benachbarten Orientierungspunkten hängt so unmittelbar von der Qualität der direkt gemessenen Orientierungsparameter ab. Lediglich bei fehlerfrei bekannter äußerer Orientierung hat er keinen Einfluss auf die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktebestimmung. Für die Korrektur der systematischen Fehler der direkten Georeferenzierung ist damit ein möglichst kleiner Punktabstand anzustreben. Bei einem zu kleinen Abstand entsteht jedoch eine Überparametrisierung bei der kombinierten Aerotriangulation. Dies resultiert in großen Korrelationen zwischen den zu bestimmenden Parametern und kann zu geometrischen Instabilitäten führen. Simulationen zur Auswertung von Dreizeilenbildern zeigen, dass der Abstand der Orientierungspunkte etwas kleiner als die Bildbasis sein sollte (Müller 1991), (Kornus 1999). In diesem Fall entspricht die geometrische Genauigkeit des Dreizeilenmodells dem Genauigkeitspotential von zentralperspektiven Aufnahmen mit einer Flächenkamera.

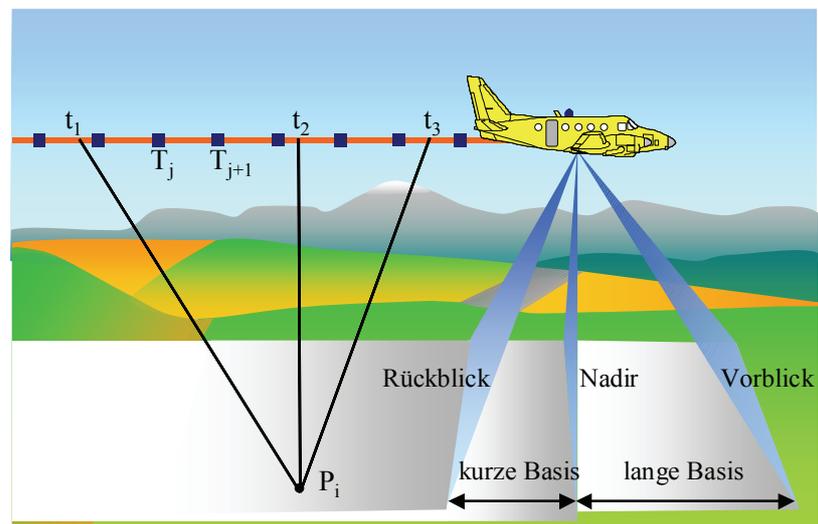


Abbildung 2-8: Orientierungspunktansatz für die Auswertung von Dreizeilenbildern nach (Hinsken et al 2002).

Abbildung 2-8 zeigt schematisch die Realisierung dieser Vorgabe für die Auswertung von Daten der Zeilenkamera ADS40 (Hinsken et al 2002). Die photogrammetrische Punktbestimmung erfolgt bei Dreizeilenkameras durch den Schnitt von Bildstrahlen, die durch korrespondierenden Bildpunktkoordinaten in Vor-, Nadir-, und Rückblick sowie die zugehörigen Orientierungsdaten zu den jeweiligen Aufnahmezeitpunkten t_1, t_2, t_3 definiert sind. Jeder dieser Verknüpfungspunkte wird genutzt, um nach Gleichung (2.23) und (2.31) zu den Zeitpunkten T_1, \dots, T_N jeweils korrigierte Parameter der äußeren Orientierung zu bestimmen. Der Abstand T_j, T_{j+1} zwischen diesen Orientierungspunkten be-

ziehungswise Orientierungsbildern muss dabei die Beobachtung einer ausreichenden Zahl von Verknüpfungspunkten ermöglichen. Wie Abbildung 2-8 zeigt, entspricht der gewählte Abstand der Orientierungspunkte der kurzen Basis zwischen Nadir- und Rückblick.

Im Prinzip kann das Orientierungsbildverfahren für die Korrektur systematische Effekte auf Polynome höherer Ordnung erweitert werden. Möglich sind beispielsweise kubische Splines, die c_1 - beziehungsweise c_2 -Kontinuität besitzen (Fritsch 1991). In diesem Fall wird ein kubisches Polynom

$$p(t) = a_0 + a_1(t - T_j) + a_2(t - T_j)^2 + a_3(t - T_j)^3 \quad (2.32)$$

angesetzt, das analog zu den Gleichungen (2.26) bis (2.29) reparametrisiert wird zu

$$\begin{aligned} p(t) &= a \cdot f(T_j) + b \cdot f'(T_j) + c \cdot f(T_{j+1}) + d \cdot f'(T_{j+1}) \\ &= \left[1 - 3 \frac{(t - T_j)^2}{(T_{j+1} - T_j)^2} + 2 \frac{(t - T_j)^3}{(T_{j+1} - T_j)^3} \right] f(T_j) \\ &\quad + \left[(t - T_j) - \frac{2(t - T_j)^2}{(T_{j+1} - T_j)} + \frac{(t - T_j)^3}{(T_{j+1} - T_j)^2} \right] f'(T_j) \\ &\quad + \left[\frac{3(t - T_j)^2}{(T_{j+1} - T_j)^2} - \frac{2(t - T_j)^3}{(T_{j+1} - T_j)^3} \right] f(T_{j+1}) \\ &\quad + \left[-\frac{(t - T_j)^2}{T_{j+1} - T_j} + \frac{(t - T_j)^3}{(T_{j+1} - T_j)^2} \right] f'(T_{j+1}) \end{aligned} \quad (2.33)$$

Durch diese Umformung wird die Schätzung der Polynomparameter a_0, a_1, a_2, a_3 durch die Schätzung der Funktionswerte $f(T_j), f(T_{j+1})$ beziehungsweise ihrer Ableitungen $f'(T_j), f'(T_{j+1})$ an den Stützstellen substituiert, die Stetigkeit von Funktionswert und erster Ableitung des zusammengesetzten Polynoms an den Stützstellen ist dadurch garantiert.

Die Modellierung der Bewegung der Kamera durch ein zusammengesetztes Polynom höherer Ordnung ist vor allem für die Auswertung von Satellitenbildern von Interesse. Aufgrund der glatten Bahn kann in diesem Fall auf eine direkte Messung der äußeren Orientierung verzichtet werden. In diesem Fall werden die Parameter der äußeren Orientierung ausschließlich durch die Auswertung der gemessenen Paß- und Verknüpfungspunkte für die Orientierungspunkte bestimmt. Anschließend kann dann aus diesen Orientierungsbildern die Orientierung der anderen Bildzeilen interpoliert werden. Ein Beispiel für den Einsatz von Polynomen höherer Ordnung für die Georeferenzierung von Satellitenbildern ist die Auswertung von MOMS-Bildern durch die Schätzung von Lagrange-Polynomen (Kornus 1999). Das Lagrange-Polynom ist ein Polynom G -ten Grades durch $G+1$ vorgegebene Stützpunkte, wobei der Funktionswert $p(t)$ zu einem beliebigen Zeitpunkt t wiederum unmittelbar in Abhängigkeit der Funktionswerte an den Stützstellen angegeben wird. Falls mehr als $G+1$ Stützpunkte existieren, werden nur die Funktionswerte der in unmittelbarer Nachbarschaft gelegenen Stützpunkte bestimmt, wobei die C_1 -Kontinuität, d.h. die Stetigkeit in der ersten Ableitung an den Stützpunkten verloren geht. Die allgemeine Parameterdarstellung lautet

$$p(t) = \sum_{k=1}^{G+1} p(T_k) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{G+1} \frac{t - T_j}{T_k - T_j} \quad (2.34)$$

Ausgeschrieben ergibt sich für Grad $G = 1$ die lineare Interpolationsformel

$$p(t) = p(T_j) \frac{(t - T_{j+1})}{(T_j - T_{j+1})} + p(T_{j+1}) \frac{(t - T_j)}{(T_{j+1} - T_j)}$$

für den Grad $G = 3$ gilt:

$$\begin{aligned}
p(t) = & p(T_{j-1}) \frac{(t-T_j)(t-T_{j+1})(t-T_{j+2})}{(T_{j-1}-T_j)(T_{j-1}-T_{j+1})(T_{j-1}-T_{j+2})} + \\
& + p(T_j) \frac{(t-T_{j-1})(t-T_{j+1})(t-T_{j+2})}{(T_j-T_{j-1})(T_j-T_{j+1})(T_j-T_{j+2})} + \\
& + p(T_{j+1}) \frac{(t-T_{j-1})(t-T_j)(t-T_{j+2})}{(T_{j+1}-T_{j-1})(T_{j+1}-T_j)(T_{j+1}-T_{j+2})} + \\
& + p(T_{j+2}) \frac{(t-T_{j-1})(t-T_j)(t-T_{j+1})}{(T_{j+2}-T_{j-1})(T_{j+2}-T_j)(T_{j+2}-T_{j+1})}
\end{aligned} \tag{2.35}$$

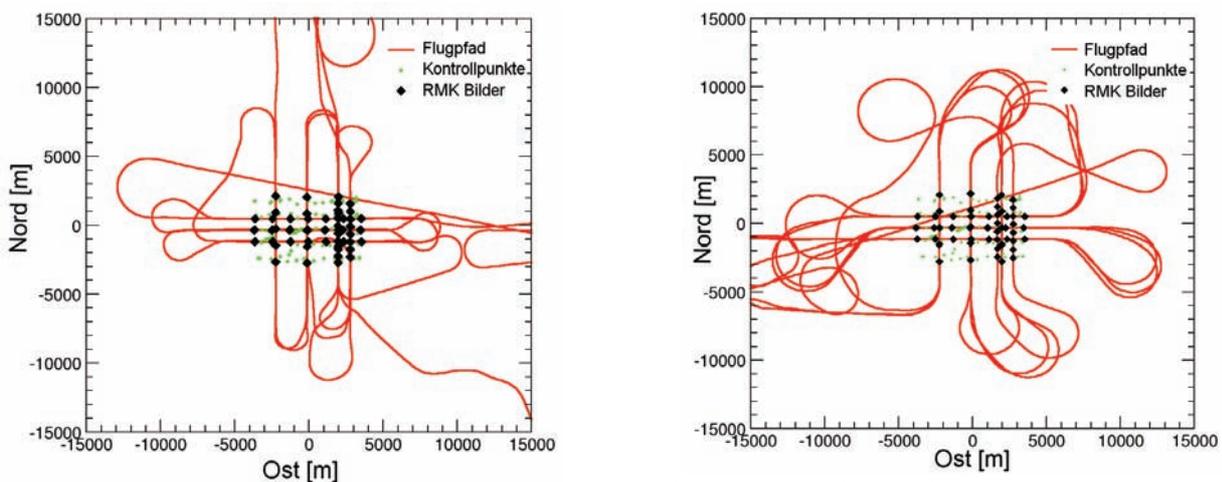
Polynome höherer Ordnung werden nur zur Auswertung von Satellitendaten eingesetzt. Bei flugzeuggetragenen Anwendungen genügt durch die zusätzliche Nutzung der direkten Georeferenzierung ein lineares Korrekturmodell.

2.4 Erreichbare Genauigkeiten und Anwendungsbeispiele

Zur Bestimmung des Genauigkeitspotential der direkten Georeferenzierung wurden vor allem während der Entwicklung flugzeuggetragener Zeilenkameras eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt. Für die Bewertung der Digitalen Photogrammetrie Ausstattung (DPA), der ersten speziell für photogrammetrische Bedürfnisse entwickelten Zeilenkamera, wurde beispielsweise das Testfeld Vaihingen/Enz mit einer großen Anzahl von signalisierten und koordinierten Punkten als Referenzwerte eingerichtet. Befliegungen dieses Testgebiets erfolgten mit der DPA-Kamera (Haala et al 1998) sowie mit den vom DLR entwickelten zeilenbasierten Kamerasystemen High Resolution Stereo Camera – airborne mode (HRSC-A) und Wide Angle Airborne Camera (WAAC) (Haala et al 2000). Daneben erfolgten über diesem Gebiet verschiedene Tests zur Untersuchung des Anwendungspotentials der direkten Georeferenzierung mit Standard-Luftbildkameras (Cramer et al 2000) (Cramer 2001).

2.4.1 Untersuchungen mit Standard-Luftbildkameras

Ein Vorteil von Untersuchungen zur direkten Georeferenzierung mit Standard-Luftbildkameras liegt darin, dass die äußere Orientierung der Kamera auch unabhängig von der direkten Messung durch das GPS/inertial-System mit einer Standard-Aerotriangulation bestimmt werden kann. Damit stehen im Gegensatz zur Auswertung von Zeilenbildern für jeden Kamerastandpunkt zwei unabhängige Messungen der Parameter der äußeren Orientierung zur Verfügung, die vergleichende Untersuchungen ermöglichen. Diese sollen im folgenden anhand von Tests über dem Gebiet Vaihingen/Enz mit den GPS/inertial-Systemen POS/AV 510 DG der Firma Applanix (Mostafa et al 2001) und AEROcontrol IId der Firma IGI (Kremer 2001) aufgezeigt werden.



a) Systemtest Applanix POS/AV (12/98)

b) Systemtest IGI AEROcontrol (6/00)

Abbildung 2-9: Testflugdesign zur Untersuchung der direkten Georeferenzierung.

Abbildung 2-9a) und Abbildung 2-9b) zeigen die Aufnahmekonfigurationen der mit einer Standard-Luftbildkamera RMK-Top durchgeführten Tests. Der Flugpfad ist dabei als rote Linie, die Bildmitten sind als schwarze und die signalisierten Punkte als grüne Punkte dargestellt. Um für Untersuchungen zur Langzeitstabilität Messungen über größere Zeitintervalle zu erhalten, wurden in einer Flughöhe von 2000m mehrfach Kreuzbefliegungen bestehend aus 3 Längs- und 3 Querstreifen durchgeführt. Die zusätzliche Erfassung von zwei Querstreifen in halber Flughöhe bei 1000m sollte darüber hinaus Untersuchungen der direkten Georeferenzierung für unterschiedliche Bildmaßstäbe ermöglichen. Für die Tests standen Bilder im Maßstab von 1:13000 und 1:7500 zur Verfügung, die bei einer Brennweite der Kamera von 153mm erfasst wurden.

GPS/INS	Bildmaßstab	RMS Positionen [cm]			RMS Orientierung [arc sec]		
		ΔX_0	ΔY_0	ΔZ_0	$\Delta \omega$	$\Delta \varphi$	$\Delta \kappa$
POS/AV 510	13000	15.1	17.5	30.8	3.2	3.0	5.9
	6000	9.9	7.1	13.5	3.0	2.0	3.9
AEROControl	13000	11.5	7.0	5.9	2.5	2.3	5.3
	6000	3.1	6.6	8.4	2.3	1.8	6.7

Tabelle 2-2: Vergleich zwischen gemessener äußerer Orientierung und Aerotriangulation.

Eine erste Abschätzung der Qualität der direkten Georeferenzierung ist durch einen Vergleich zu den Parametern der äußeren Orientierung aus der Standard-Aerotriangulation möglich. In *Tabelle 2-2* sind die Differenzen beider Verfahren für die untersuchten Systeme POS/AV und AeroControl jeweils für den Maßstab 1:13000 und 1:6000 aufgeführt. Für den Vergleich im Bildmaßstab 1:13000 wurden jeweils zwei Bildblöcke bestehend aus je 3 Längs- und 3 Querstreifen mit insgesamt 72 Bildern verwendet. Die Werte für den Maßstab 1:6000 wurden jeweils aus einem aus 2 Streifen bestehenden Block abgeleitet.

Neben den Parametern der äußeren Orientierung lassen sich mit einer Aerotriangulation auch die jeweils zugehörigen Standardabweichungen bestimmen. Bei den in *Tabelle 2-2* dokumentierten Untersuchungen ergibt sich für den Bildmaßstab 1:13000 eine innere Genauigkeit von 6.4cm für die horizontalen Positionen X_0 und Y_0 , die Standardabweichung der vertikalen Komponente Z_0 beträgt 2.9cm. Für den Maßstab 1:6000 liegen die Werte bei 2.8cm beziehungsweise 1.8cm. Die Standardabweichung der Orientierungen liegt bei 0.4'' für ω und φ sowie bei 0.07'' für κ . Diese hohe innere Genauigkeit ist ein Ergebnis der durchgeführten Kreuzbefliegung, die zu sehr starken Überdeckung und damit einer extrem stabilen Blockgeometrie führt. Damit liefert die Standard-Aerotriangulation im Vergleich zur direkten Georeferenzierung die Parameter der äußeren Orientierung in übergeordneter Genauigkeit und kann so zumindest theoretisch als Referenzmessung verwendet werden. Durch die Aerotriangulation werden Strahlenbündel, die durch innere Orientierung und die Bildkoordinaten definiert sind, optimal in die zugehörigen Pass- und Verknüpfungspunkte eingepasst. Damit geht bei einer Standard-Aerotriangulation eine nicht optimale Kamerakalibrierung direkt in die berechneten Parameter der äußeren Orientierung ein, ohne dass dies einen großen Einfluss auf die Qualität der photogrammetrische Punktbestimmung haben muss. Für praktische Untersuchungen ist damit der direkte Vergleich zwischen der gemessenen äußeren Orientierung und den Werten aus der Aerotriangulation wie in *Tabelle 2-2* nur bedingt zulässig.

Ein Beispiel für mögliche Differenzen zwischen den physikalisch gültigen und den durch die Aerotriangulation berechneten Parameter der äußeren Orientierung ist die Flughöhe. Diese ist hoch korreliert mit der Brennweite der Kamera. Eine fehlerhafte Kammerkonstante resultiert so in einer Verschiebung der berechneten Vertikalkomponente Z_0 des Projektionszentrums, die Trennung beider Parameter ist nur mit Aufnahmen möglich, die auf unterschiedlichen Flughöhen erfasst wurden. Nach *Tabelle 2-2* ergeben sich für das Systems POS/AV große Differenzen zwischen direkt gemessener und durch Aerotriangulation bestimmter Kameraposition in der Vertikalkomponente ΔZ_0 . Diese Differenz verringert sich jedoch bei halbem Bildmaßstab und damit halber Flughöhe um den Faktor zwei. Dies lässt vermuten, dass diese Differenzen auf eine Abweichung der tatsächlichen Kammerkonstante zum Wert der Laborkalibrierung zurückzuführen ist. Wie bereits in Abschnitt 2.2.2 diskutiert, kann eine solche Änderung der Kammerkonstante durch thermische Effekte entstehen, in Tests zur direkten Georeferenzierung mit Standard-Luftbildkameras wurden beispielsweise Abweichungen der Kammerkonstante von 28 μ m nachgewiesen (Greening et al 2000).

Untersuchungen zur Qualität der direkten Georeferenzierung sollten deshalb die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung als entscheidendes Kriterium heranziehen. Dabei werden signalisierte Punkte als Referenz

verwendet, deren Koordinaten mit übergeordneter Genauigkeit terrestrisch eingemessen sind. Die photogrammetrische Bestimmung der Objektkoordinaten erfolgt dann über einen Vorwärtsschnitt. Hierfür werden die korrespondierenden Bildkoordinaten, die gemessenen Parameter der äußeren Orientierung aus dem GPS/inertial-System, sowie optional die durch eine kombinierte Aerotriangulation bestimmten Kalibrierparameter verwendet.

System	Anzahl der Bilder, Aufnahmekonfiguration	Anzahl der Kontrollpunkte	RMS [cm]			Max. Abweichung [cm]		
			ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
POS/AV 510	36, Kreuzbefliegung	135	6.4	9.0	15.7	20.0	31.9	37.1
	7, Einzelstreifen	84	15.0	13.9	23.9	30.8	47.3	63.7
	7, Einzelstreifen	95	7.1	16.1	25.2	22.8	35.2	59.0
AERO- Control	36, Kreuzbefliegung	84	7.5	12.1	12.1	19.3	37.8	34.4
	7, Einzelstreifen	50	12.8	9.7	18.7	24.1	27.9	55.4
	7, Einzelstreifen	49	8.5	8.4	17.2	21.0	18.4	43.2

Tabelle 2-3: Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung mittels direkter Georeferenzierung.

Die Abweichungen der photogrammetrisch mittels direkter Georeferenzierung bestimmten Objektkoordinaten zu den terrestrisch eingemessenen Referenzwerten ist in Tabelle 2-3 für den Bildmaßstab 1:13000 dargestellt. In der ersten Spalte wurde zur photogrammetrischen Punktbestimmung für beide Systeme jeweils die komplette Kreuzbefliegung mit 36 Bildern ausgewertet. Diese Kreuzbefliegung resultiert in einer 22-30-fache Überdeckung jedes Punktes. Werden alle diese Bildpunkte genutzt, so führt die große Zahl von Beobachtungen zu einer hohen Redundanz. Gegenüber praktischen Anwendungen, für die lediglich 2-3-fache Punktüberdeckungen zu erwarten sind ergibt sich damit einen zu optimistischen Wert für die Genauigkeit der berechneten Objektkoordinaten. Aus diesem Grund wurden auch einzelne Flugstreifen ausgewertet, um so durch die Reduktion der Überdeckungen realistischere Genauigkeiten der direkten Georeferenzierung zu erhalten. Die daraus resultierenden Punktgenauigkeiten sind in Tabelle 2-3 für beide untersuchten GPS/inertial-System jeweils in der zweiten und dritten Zeile aufgeführt.

Insbesondere bei der Auswertung der Kreuzbefliegung entspricht die Genauigkeit der photogrammetrischen Objekt-punktbestimmung mittels direkter Georeferenzierung nahezu der Qualität einer photogrammetrischen Punktbestimmung durch eine klassische Aerotriangulation. Bei der direkten Georeferenzierung werden mit beiden Systemen im Mittel eine horizontale Genauigkeit von 8.8cm und eine vertikale Genauigkeit von 13.9cm erreicht. Die theoretische Genauigkeit der durch klassische Aerotriangulation bestimmten signalisierten Punkte liegt für Weitwinkelaufnahmen bei $\sigma_{x,y} = \pm 4 \mu\text{m}$ im Bild für die horizontale und bei $\sigma_z = \pm 0.005\%$ der Flughöhe über Grund für die vertikale Komponente (Kraus 1997). Dies ergibt für die untersuchte Aufnahmekonfiguration Werte von $\sigma_{x,y} = 5\text{cm}$ und $\sigma_z = 10\text{cm}$. Demgegenüber ist die Genauigkeit der direkten Georeferenzierung bei der Auswertung der Einzelstreifen mit Werten von 11.4cm für die horizontale und 21.3cm für die vertikale Komponente deutlich geringer.

Version	Anzahl Passpunkte	Anzahl Kontrollpunkte	σ_0 [μm]	RMS [cm]		
				ΔX	ΔY	ΔZ
a) Aerotriangulation ohne Selbstkalibrierung	9	122	4.79	5.6	6.2	20.3
b) mit Selbstkalibrierung	9	122	4.24	4.5	6.5	12.1
c) Direkte Georeferenzierung	0	131	10.8	8.8	11.9	17.8
d) Direkte Georeferenzierung und AT mit Selbstkalibrierung	1	130	4.46	5.2	9.2	13.3

Tabelle 2-4: Genauigkeiten der photogrammetrischen Punktbestimmung für unterschiedliche Konfigurationen.

Bei einer Standard-Aerotriangulation gehen Fehler der inneren Orientierung aufgrund der großen Korrelationen zu einem großen Teil in die lediglich als Rechengrößen verwendeten Parametern der äußeren Orientierung ein. Im Ge-

gensatz dazu sind bei einer direkten Georeferenzierung die gemessenen Parameter der äußeren Orientierung fest vorgegeben, Fehler der inneren Orientierung gehen damit direkt in die berechneten Objektpunktkoordinaten ein. Damit ist die Bestimmung einer korrekten Kamerakalibrierung für die direkte Georeferenzierung von entscheidender Bedeutung. Wie bereits in Abschnitt 2.2.1 diskutiert, kann im Rahmen einer Aerotriangulation die innere Orientierung durch eine Selbstkalibrierung verbessert werden.

Der Einfluss dieses Prozesses auf die Qualität der photogrammetrischen Punktbestimmung ist in Tabelle 2-4 dargestellt. Diese Untersuchungen wurden auf einen aus zwei Streifen bestehenden Sub-Block beschränkt, um den positiven Einfluss der starken Blockgeometrie bei der Kreuzbefliegung zu vermeiden und so realistischere Genauigkeitswerte zu erhalten. Zunächst wurde eine Aerotriangulation ohne beziehungsweise mit Selbstkalibrierung durchgeführt. Zur Berechnung der Ergebnisse in Reihe a) wurden jeweils 9 gut verteilte Passpunkte in den Ecken des Blocks genutzt. Die anschließende Berechnung einer Selbstkalibrierung für die radiale Linsenverzeichnung und Dezentrierung führte zu einer deutlichen Reduktion des Fehler in der Vertikalkomponente. In Reihe b) sind deshalb die Abweichungen auf 5cm beziehungsweise 12cm für die Horizontalkomponente und für die Vertikalkomponente verringert. Die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung mittels direkter Georeferenzierung in Reihe c) ist demgegenüber deutlich geringer. Wird jedoch wie in Reihe d) die direkte Georeferenzierung mit einer Aerotriangulation zur Bestimmung von Kalibrationsparametern kombiniert, so ist die erreichte Genauigkeit nahezu identisch mit den Ergebnissen der Standard-Aerotriangulation. In diesem Fall wurde für die kombinierte Aerotriangulation mit direkter Georeferenzierung lediglich ein Passpunkt in der Mitte des Blocks verwendet.

Generell zeigen die Tests, dass mit der direkten Georeferenzierung für Bilder analoger Weitwinkelkameras in einem mittleren Maßstab Genauigkeiten der photogrammetrischen Punktbestimmung in der Größenordnung von 5-20cm für die horizontale und 10-25cm für die vertikale Komponente möglich sind. Die unterschiedlichen Genauigkeiten ergeben sich dabei auch aus den unterschiedlichen untersuchten Blockgeometrien, da durch den Schnitt einer größeren Anzahl von Bildstrahlen verbleibende Fehler in den Orientierungsparametern kompensiert werden können.

2.4.2 Untersuchungen mit flugzeuggetragenen Zeilenkameras

Im Vergleich zu Tests mit Luftbildkameras ermöglichen Untersuchungen zur direkten Georeferenzierung von Zeilenbildern zusätzlich noch die Möglichkeit, hochfrequente Effekte in den gemessenen Parametern der äußeren Orientierung zu erfassen. Für das Gebiet Vaihingen/Enz standen Testdaten zeilenbasierter System aus Befliegungen mit der DPA-Kamera sowie den Kamerasystemen High Resolution Stereo Camera – airborne mode (HRSC-A) und Wide Angle Airborne Camera (WAAC) zur Verfügung.

	WAAC	DPA	HRSC	RMK ^a (Weitwinkel)	
Kammerkonstante [mm] ^b	21.7/	80/40	175/175	153/153	a: als Vergleich b: Stereo/Multispektral Modul
Öffnungswinkel [deg]	80	74	12	74	c: nur Stereomodul d: Scanauflösung : 15 µm
Anzahl Stereobildzeilen	3	3	5		e: Flughöhe über Grund: 2000m
Anzahl der MS-Zeilen	-	4	4		f: Pixelgröße am Boden
CCD-Zeile [pixel] ^c	5184	12000	5184	15300 ^d	
Pixelgröße Bild [µm]	7	10	7	15 ^d	
Schwadtbreite [m] ^e	3360	3000	415	3000	
Pixelgröße Boden [m] ^e	0.65	0.25	0.08	0.20	

Tabelle 2-5: Parameter der untersuchten Kamerasysteme.



a) WAAC, Flughöhe 3000 m, Pixelgröße 1m



b) DPA , Flughöhe 2000m, Pixelgröße 25cm



c) HRSC, Flughöhe 3000 m, Pixelgröße 12 cm



d) RMK, Flughöhe 2000m, Pixelgröße 20 cm

Abbildung 2-10: Bildbeispiele für die untersuchten Kamerasysteme.

Abbildung 2-10a) bis Abbildung 2-10c) zeigen zur Darstellung der unterschiedlichen Bildauflösungen für einen identischen Bereich jeweils Bildausschnitte der untersuchten Testdaten. Um einen Vergleich zu einer traditionellen Luftbildaufnahme zu ermöglichen, enthält Abbildung 2-10d) zusätzlich einen digitalisierten Bildausschnitt einer analogen Aufnahme mit einer RMK-Kamera.

Einen Überblick über die Systemparameter der untersuchten Kameras sowie die Aufnahmegeometrie bei den durchgeführten Untersuchungen gibt Tabelle 2-5. Die Pixelgröße am Boden bezieht sich in Tabelle 2-5 jeweils auf eine nominelle Flughöhe über Grund von 2000m. Im Gegensatz dazu entsprechen die in Abbildung 2-10a) bis Abbildung 2-10d) aufgeführten Werte der jeweiligen Flughöhe, aus der die Bilder tatsächlich aufgenommen wurden. Wie Abbildung 2-10a) zeigt, standen Bilddaten der WAAC-Kamera nur mit einer relativ geringen Bodenpixelauflösung von 1m zur Verfügung. Aus diesem Grund wurden die Untersuchungen zu der mit direkter Georeferenzierung erreichbaren Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung auf die geometrisch höher auflösenden Systeme DPA und HRSC beschränkt.

Untersuchungen der DPA-Kamera

Mit dem DPA-System ist die Aufzeichnung von Inertialdaten nur bei einer gleichzeitigen Erfassung von Bildern möglich. Aus diesem Grund standen für die Untersuchungen die Inertialdaten nicht kontinuierlich über längere Zeiträume, sondern lediglich für einzelne Bildstreifen zur Verfügung. Aufgrund der Beschränkung der Messungen auf relativ kurze Intervalle war damit die sinnvolle Anwendung eines Standard-Kalmanfilters für die Auswertung der GPS/inertial Daten nicht möglich. Da vor allem für die Korrektur der Lagedaten die Kombination der GPS und Inertialdaten über einen längeren Zeitraum notwendig ist, sind so bei Auswertungen des DPA-Systems relativ große Fehler für die berechneten Orientierungsparameter zu erwarten.

Die Bestimmung der Parameter der äußeren Orientierung der DPA-Kamera erfordert die Mechanisierung der inertialen Messdaten, wobei die GPS-Positionen und Geschwindigkeiten zur Stützung eingesetzt werden können. Aufgrund der streifenweisen Erfassung der Inertialdaten ist hierfür zunächst die Bestimmung einer Anfangsorientierung zu Beginn jedes Bildstreifens notwendig. Unter der Annahme einer genäherten Erfassung von Nadirbildern wird bei der Auswertung der Wert für den Roll- und Nickwinkel zunächst zu Null gesetzt, eine grobe Schätzung für den Azimut ergibt sich aus der verfügbaren GPS-Trajektorie. Aufgrund dieser nur groben Annahmen sind die berechneten Orientierungen mit einem konstanten Fehler behaftet, die wie in Abschnitt 2.3 diskutiert, zu zusätzlichen zeitabhängigen Effekten führen.

Für die Tests wurden Bilddaten in einer Flughöhe von 2000m über Grund mit einer Bodenpixelauflösung von 25cm verwendet. Die Auswertung erfolgte nach dem in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen streifenweisen Integrationsansatz. Dabei wurden iterativ konstante und linear zeitabhängige Korrekturdaten für die Mechanisierung aus einer Aerotriangulation bestimmt. Die Auswertung der Bilddaten nach diesem Ansatz ergab eine Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung (RMS) an signalisierten Kontrollpunkten von 30 bis 40 μ m beziehungsweise 3 bis 4 Pixel im Bildraum. Die zugehörige Genauigkeit im Objektraum lag damit bei 0.7 bis 1.0m für die horizontale und 1.5m bis 2.0m für die vertikale Komponente. Mit diesen Ergebnissen konnten die eigentlich erwarteten Genauigkeiten im Subpixelbereich nicht verifiziert werden. Weder die Integration von zusätzlichen Passpunkten noch der Einsatz von Polynomen höherer Ordnung zur Bestimmung zur Korrektur der äußeren Orientierung ergaben signifikante Verbesserungen. Dies führte neben weiteren Analysen der Inertialdaten zur Vermutung, dass die großen Fehler vermutlich durch nicht korrigierte Fehler des inertialen Meßsystems der DPA verursacht wurden.

Untersuchungen der HRSC-Kamera

Die Messung der Parameter der äußeren Orientierung erfolgte bei den Untersuchungen mit der HSRS-Kamera durch das Standard-GPS/inertial-System POS/DG. Damit war ein unmittelbarer Vergleich zu den in Abschnitt 2.4.1 beschriebenen Untersuchungen analoger Kameras möglich. Für die geometrischen Genauigkeitsuntersuchungen der HRSC Kamera wurden über dem Testgebiet Vaihingen/Enz insgesamt drei Flugzeilen in Ost-West-Richtung mit einer Länge von 10km erfasst. Aufgrund der schmalen Schwadtbreite der HRSC-Kamera von 600m und zeitlicher Vorgaben wurde dabei nur der Mittelteil des Testgebiets bedeckt. In dieser Konfiguration standen 63 signalisierte Punkte für die Genauigkeitsuntersuchungen zur Verfügung. Die Flughöhe über Grund von 3000m führte zu einem Bildmaßstab von 1:17000. Die Bilder wurden dabei mit einer Datenrate von 440Hz aufgezeichnet. Durch die nicht optimal gewählte Fluggeschwindigkeit ergaben sich bei dem Test rechteckige Bodenpixel von 17cm in und 12cm senkrecht zur Flugrichtung. Für die Georeferenzierung der Bilddaten wurde das GPS/inertial-System POS/DG genutzt, das eine Auswertung der Messungen durch einen Kalmanfilter mit Hilfe der zugehörigen Standard-Software PosPac ermöglicht.

Aufgrund der hohen Qualität des verwendeten GPS/inertial-Systems ist im Prinzip keine Korrektur der gemessenen Parameter der äußeren Orientierung notwendig. Die kombinierte Aerotriangulation wurde deshalb nach Gleichung (2.21) lediglich zur Bestimmung des Orientierungsunterschieds zwischen dem Körperkoordinatensystem der inertialen Messeinheit und dem Kamerakoordinatensystem genutzt. Da sich für die Vertikalkomponente der GPS-Referenzstation Ungereimtheiten ergaben, wurde zusätzlich noch ein konstanter Faktor zur Korrektur der gemessenen Höhe als unbekannter Parameter eingeführt. Die kombinierte Aerotriangulation wurde sowohl für jeden Bildstreifen getrennt, als auch für den kompletten, aus drei Streifen bestehenden Block durchgeführt.

Zur Untersuchung des Einflusses des Kalman-Filters auf die Qualität der direkten Georeferenzierung wurden zusätzlich die GPS Positionen und die ursprünglichen, ungefilterten Inertialmessungen des LR68 Systems mit dem streifenweisen Integrationsansatz prozessiert. Analog zu dem für die Auswertung der DPA-Daten entwickelten Ansatz sind durch die Beschränkung auf die ungefilterten inertialen Messungen systematische Fehler der Lageparameter zu erwarten. Aus diesem Grund wurden durch die Einführung zusätzlicher Parameter in die kombinierte Aerotriangulation

konstante und lineare Korrekturterme \mathbf{a}_0^{ω} und \mathbf{a}_1^{ω} für die Mechanisierung der Inertialdaten geschätzt und iterativ angebracht. Die Auswertung wurde zunächst für jeden Bildstreifen getrennt und anschließend für den komplette Block bestehend aus den drei Streifen durchgeführt. Bei den durchgeführten Untersuchungen war die Konvergenz jeweils nach drei Iterationen erreicht. Die Bestimmung der Genauigkeiten erfolgte analog zu den Untersuchungen mit Standard-Luftbildkameras durch den Vergleich der photogrammetrisch bestimmten Objektkoordinaten signalisierter Punkte mit den terrestrisch eingemessenen Referenzkoordinaten.

Streifen	Anzahl Punkte	σ_0 [μm]	Ost [cm]	Nord [cm]	Vertikal [cm]
I	17	6.4	17.2	3.9	17.7
II	40	4.6	8.3	3.3	16.0
III	14	4.3	8.2	3.4	23.7
Block	63	6.4	11.5	3.3	13.5

Streifen	Anzahl Punkte	σ_0 [μm]	Ost [cm]	Nord [cm]	Vertikal [cm]
I	17	5.9	19.4	7.8	37.6
II	40	5.1	12.0	4.3	18.3
III	14	6.1	11.4	4.8	18.4
Block	63	6.0	21.6	7.3	15.0

a) äußere Orientierung aus Kalman-Filter

b) Orientierung aus ungefilterten inertialen Messungen

Tabelle 2-6: Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung für Zeilenkamera HRSC.

Die bei den Untersuchungen erreichten Genauigkeiten der photogrammetrischen Punktbestimmung sind in Tabelle 2-6 dargestellt. Tabelle 2-6a zeigt das Ergebnis der kombinierten Aerotriangulation unter Verwendung der mittels Kalmanfilter aus den GPS/inertial-Daten abgeleiteten Parametern der äußeren Orientierung. In Tabelle 2-6b sind die entsprechenden Werte bei einer Berechnung der Orientierungsparameter aus den ungefilterten inertialen Messungen zusammengefasst. In beiden Fällen zeigt der im Vergleich zur Pixelgröße von $7\mu\text{m}$ kleinere Wert der Standardabweichung σ_0 a posteriori, dass mit der kombinierten Aerotriangulation im Bildraum eine Genauigkeit im Subpixelbereich erreicht werden kann. Mit den Parametern der äußeren Orientierung aus dem Kalman-Filter liegen die Fehler der Objektpunktkoordinaten, die sich durch den Vergleich zu den Referenzwerten an den signalisierten Punkten ergeben, bei 10cm für die Ost-Komponente und bei 5 cm für die Nord-Komponente. Die maximalen Abweichungen betragen 30cm für die Ost-, 10cm für die Nord- und 30cm für die Vertikalkoordinate. In der Testkonfiguration lag die Ost-Komponente jeweils in Flugrichtung und die Nord-Komponente dementsprechend senkrecht dazu. Die zugehörige Pixelgröße am Boden betrug 17cm für die Ost- und bei 12cm für die Nordkomponente. Tabelle 2-6b zeigt die entsprechenden Ergebnisse bei der Verwendung der Parameter der äußeren Orientierung aus den ungefilterten Inertialdaten. Die maximalen Abweichungen liegen in diesem Fall bei 50cm für die Ost-, 20cm für die Nord- und 50cm für die Vertikalkoordinate.

Während der Prozessierung mit dem Kalmanfilter werden Fehlergrößen der Inertialdaten wie Offsets der gemessenen Drehraten oder die Fehlausrichtung des Systems durch die Stützung mit den GPS-Daten eliminiert. Bei der Verwendung der Orientierungsdaten aus den ungefilterten inertialen Messungen werden im Prinzip die selben Größen durch die kombinierte Aerotriangulation bestimmt und im Rahmen des streifenweisen Integrationsansatzes iterativ in die Mechanisierung der Inertialdaten integriert. Im Prinzip sollte sich damit in beiden Ansätzen eine nahezu identische Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung ergeben. Die im Vergleich zu Tabelle 2-6a etwas geringere Genauigkeiten in Tabelle 2-6b lassen sich dadurch erklären, dass mit der kombinierte Aerotriangulation lediglich die systematischen Fehler in den gemessenen Parametern der äußeren Orientierung eliminiert werden. Ein eventuelles Rauschen in den Lagedaten bleibt dabei allerdings erhalten, so dass sich im Vergleich zu den im Kalmanfilter geglätteten Werten etwas größere Fehlern im Objektraum ergeben können. Die Differenzen zwischen den mit beiden Verfahren bestimmten Orientierungswinkeln weisen eine empirische Standardabweichungen von $4''$ und $7''$ für den Roll- und Nickwinkel sowie von $5''$ für den Azimut auf.

Eventuelle hochfrequente Fehler der direkten Georeferenzierung im Subpixelbereich lassen sich durch die photogrammetrische Punktbestimmung an signalisierten Punkten nur schwer nachweisen. Durch eine Entzerrung der Zeilenbilder mit den gemessenen Parametern der äußeren Orientierung ist jedoch zumindest eine visuelle Abschätzung der Fehlergrößen möglich. Während der Entzerrung wird jede Bildzeile mit der zugehörigen äußeren Orientierung auf eine horizontale Ebene projiziert, die vertikale Komponente dieser Ebene ergibt sich dabei aus der mittleren Geländehöhe des beflogenen Gebiets. Üblicherweise ist die Entzerrung ein wichtiger Vorverarbeitungsschritt bei der Auswertung von Zeilenbilder um Störungen zu eliminieren, die sich durch Lageänderungen der Kamera während der Aufnahme der einzelnen Zeilen eines Bildstreifens ergeben.

Das Ergebnis der Entzerrung mit unterschiedlichen Parametern der äußeren Orientierung ist für die untersuchten HRSC-Bilddaten in Abbildung 2-11 dargestellt. Abbildung 2-11a zeigt das Ergebnis für die mit Kalmanfilter prozessierten Daten, Abbildung 2-11b zeigt die Entzerrung mit Orientierungsparametern aus den ungefilterten Inertialdaten. Besonders an feinen regelmäßigen Strukturen sind in beiden Bildern noch verbleibende Fehler zu erkennen. Zur Elimination dieser Effekte wurde empirisch eine Zeitdifferenz von 6 Bildzeilen zwischen der Messung der äußeren Orientierung durch das GPS/inertial-System und der Bildaufnahme bestimmt. Dies entspricht bei der Zeilenfrequenz von 440 Hz einem Fehler in der ursprünglichen Synchronisierung von 13,6msec. Wird diese Zeitdifferenz angebracht, sind bei der Entzerrung mit ungefilterten Orientierungsdaten in Abbildung 2-11d keine Flugbewegungen mehr erkennbar. Wie Abbildung 2-11c zeigt, führt eine entsprechende Zeitdifferenz für die Parameter der äußeren Orientierung aus dem Kalmanfilter zu keiner vollständigen Elimination der verbleibenden Bildfehler. Dies legt die Vermutung nahe, dass durch den Glättungsprozess des Kalmanfilters hochfrequenten Anteile der Kamerabewegung eliminiert werden. Ein signifikanter Einfluss der Zeitdifferenz auf die Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung war bei den verwendeten Testdaten jedoch nicht nachzuweisen.



a) gefilterte Orientierung, keine Zeitdifferenz



b) ungefilterte Orientierung, keine Zeitdifferenz



c) gefilterte Orientierung, Zeitdifferenz 6 Zeilen



d) ungefilterte Orientierung, Zeitdifferenz 6 Zeilen

Abbildung 2-11: Entzerrung mit unterschiedlichen Orientierungsdaten.

Ähnliche Genauigkeiten der direkten Georeferenzierung für Aufnahmen des HRSC-Systems in Verbindung mit dem GPS/inertial-System POS sind auch für andere Tests dokumentiert (Scholten et al 2001). Der diesen Untersuchungen zugrundeliegende Ansatz nutzt jeweils die mit dem Kalmanfilter berechneten Parameter der äußeren Orientierung. Als Unbekannte, durch eine kombinierte Aerotriangulation zu bestimmende Parameter verbleiben damit der Orientierungsunterschied zwischen dem Körperkoordinatensystem der inertialen Messeinheit und dem Kamerakoordinatensystem. Zusätzlich werden im Rahmen dieser Aerotriangulation potentielle konstante und lineare Fehler der GPS-

Trajektorie geschätzt. Auch bei diesen Untersuchungen ergaben sich bei der Bestimmung der Lageparameter selbst für lange Bildstreifen mit über 60km Länge keine Hinweise auf Drifteffekte in den durch Kalmanfilter bestimmten Rotationswinkeln. In diesem Ansatz wird ein konstanter Fehler in der Zeitzuordnung zwischen den Messungen der äußeren Orientierung und der Bildaufnahme über ein heuristisches Verfahren bestimmt. In der Regel ergab sich Synchronisationsfehler in der Größenordnung von 5 – 10 ms. Drifteffekte und konstante Fehler in den GPS-Positionen können häufig durch die Nutzung einer Referenzstation in der Nähe des Testgebiets vermieden werden. Damit ist eine kombinierte Aerotriangulation mit Verknüpfungspunkten im Prinzip für die Georeferenzierung von Zeilenbildern ausreichend. Auf die Erfassung von Querstreifen kann verzichtet werden, Passpunkte werden für eine Steigerung der Genauigkeit nicht benötigt und dienen damit lediglich für die Erhöhung der Zuverlässigkeit. Insgesamt dokumentieren die Untersuchungen in Abschnitt 2.4.2, dass mit der Verfügbarkeit hochwertiger GPS/inertial-Systeme eine qualitativ hochwertige photogrammetrische Auswertung von zeilenbasierten Systemen möglich ist.

Darüber hinaus zeigen die in Abschnitt 2.4.1 dokumentierten Untersuchungen mit Standard-Luftbildkameras neben ähnlichen, von der OEEPE initiierte Untersuchungen (Heipke et al 2001), dass durch die direkte Georeferenzierung eine der Standard-Aerotriangulation nahezu gleichwertige Genauigkeit für die photogrammetrische Punktbestimmung erreicht werden kann. Dadurch ist im Prinzip ein Verzicht auf die Messung von Passpunkten bei der photogrammetrischen Datenerfassung möglich. Zusammen mit dem zusätzlichen Vorteil der wegfallenden Beschränkungen durch die vorgegebene Blockgeometrie gegenüber der Standard-Aerotriangulation ergeben sich eine Reihe von Anwendungen, bei denen die direkte Georeferenzierung auch unter Berücksichtigung der zusätzlichen Kosten für ein inertiales Meßsystem vorteilhaft ist. Passpunkte werden jedoch auch weiterhin – wenn auch in geringerem Umfang - für die Kalibrierung des Gesamtsystems und gegebenenfalls für die Korrektur der gemessenen Orientierungsdaten benötigt.

Für die in diesem Kapitel vorgestellten Untersuchungen wurden die signalisierten Punkte manuell eingemessen. Generell ist für eine effizientere geometrische Auswertung von Bilddaten eine Automatisierung dieser Passpunktmessung anzustreben. Ein entsprechender Ansatz zur GIS-basierten Georeferenzierung wird in Kapitel 5 am Beispiel terrestrischer Bilder vorgestellt. Die Realisierung dieses Prozesses erfordert jedoch eine automatische Interpretation der erfassten Bilddaten. In den Kapitel 3 und 4 dieser Arbeit soll deshalb zunächst aufgezeigt werden, wie auch eine automatische Interpretation durch die Kombination unterschiedlicher Sensordaten gestützt werden kann.

3 Segmentierung und Klassifizierung von Bild- und Höhendaten

Die Interpretation von Bilddaten zur Extraktion topographischer Objekte wie Gebäude, Strassen, Bäume, Felder und Gewässer stellt neben der geometrisch orientierten Aufgabe der Georeferenzierung den zweiten Schwerpunkt der photogrammetrischen Auswertung dar. Der hierfür angestrebte Einsatz der automatischen Bildinterpretation ist jedoch trotz der erreichten Erfolge noch weit davon entfernt, eine im Vergleich zum menschlichen visuellen System auch nur annähernd gleichwertige Anpassungsfähigkeit, Zuverlässigkeit und damit Auswertequalität zu erreichen. Durch die Kombination komplementärer Datenquellen kann jedoch die automatische Erfassung topographischer Objekte erheblich vereinfacht und damit unterstützt werden. Eine solche Datenfusion ist dabei ein Prozess, der Information aus verschiedenen Quellen nutzt, um bessere Entscheidungen während des Interpretationsprozesses zu ermöglichen (Hall 1992). Diese Fusion von Daten verschiedener Sensoren kann dabei auf einer signalbasierten, pixelbasierten, merkmalsbasierten oder symbolischen Ebene des Interpretationsprozesses erfolgen.

Die signalbasierte Fusion verwendet Signale unterschiedlicher Sensoren um ein neues Signal der gleichen Form aber mit besserer Qualität zu generieren. Ein Beispiel ist die Kombination von mehreren Radarbildern zur Unterdrückung des Speckle-Rauschens. Bei einer pixelbasierten Fusion wird der Informationsgehalt jedes Pixels erhöht, in dem ein neuer Datensatz aus der Kombination mehrerer Bilder erzeugt wird. Eine typische Anwendung ist die Fusion eines geometrisch hochauflösenden panchromatischen Bildes mit einem Multispektralbild zur Erzeugung hochauflösender Multispektralaufnahmen (Albertz 1991). Während die signal- und pixelbasierte Integration auf einer Prozessierung auf der untersten Ebene des Interpretationsprozesses beruht, entspricht die Fusion auf symbolischer Ebene einer Prozessierung auf der höchsten Abstraktionsebene. Dabei wird bestimmten Bereichen auf der Basis von einem oder mehreren Datensätzen eine Bedeutung zugewiesen, die anschließend durch eine zusätzliche Datenquelle überprüft oder erweitert wird. Ein Beispiel hierfür ist die automatische Nachführung von GIS-Daten durch automatische Klassifizierungsverfahren, bei denen die existierenden Geodaten gleichzeitig der automatischen Erzeugung von Trainingsgebieten dienen (Walter 1999).

In diesem Kapitel wird die gemeinsame Auswertung von Bild- und Höhendaten am Beispiel der Fusion auf einer merkmalsbasierten Ebene des Interpretationsprozesses diskutiert. Der dabei durchgeführten Nutzung hochgenauer, dichter Höhendaten für die Erfassung topographischer Objekte liegt die Idee zugrunde, dass durch die Beschränkung dieser Daten auf rein geometrische Information eine Vereinfachung der automatischen Interpretation ermöglicht wird. Für den Erfolg eines solchen Ansatzes ist dabei die Qualität dieser geometrischen Information von großer Bedeutung. Aus diesem Grund werden in Abschnitt 3.1 zunächst die gängigen Verfahren zur Erfassung von Höhendaten und die dabei erreichbaren Genauigkeiten diskutiert.

Generell ist die Integration von Höhendaten vor allem für Bereiche von Interesse, die wie bebauten Gebiete eine dreidimensionale Strukturierung aufweisen. Zudem ist in solchen Gebieten eine automatische Erfassung topographischer Objekte ausschließlich aus Bilddaten aufgrund der großen Komplexität der Szenen in der Regel nicht möglich. In Abschnitt 3.2 wird das Potential der Kombination von Bilddaten mit Digitalen Oberflächenmodellen für die Erfassung topographischer Objekte wie Bäume, Strassen oder Häuser durch eine Klassifizierung bebauter Gebiete demonstriert (Haala & Brenner 1999a), (Haala & Walter 1999). Im Gegensatz zu der dabei angestrebten Erfassung zweidimensionaler GIS-Daten ermöglicht die in Abschnitt 3.3 vorgestellte bildgestützte Segmentierung Digitaler Oberflächenmodelle die Extraktion dreidimensionaler Primitive. Eine solche Segmentierung von Bruchkanten oder ebener Regionen ist dabei ein wichtiger Vorverarbeitungsschritt für die anschließende dreidimensionale Rekonstruktion topographischer Objekte. Dies wird am Beispiel der Erfassung von 3D Gebäudemodellen aufgezeigt.

3.1 Erfassung Digitaler Oberflächenmodelle (DOM)

Neben der Bestimmung von äußerer und innerer Orientierung einer Aufnahme stellt die dreidimensionale Rekonstruktion abgebildeter Oberflächen die zweite geometrisch orientierte Grundaufgabe der photogrammetrischen Auswertung dar. Neben den Methoden der automatischen Stereobildzuordnung hat sich hierfür das flugzeuggestützte Laserscanning verstärkt in der photogrammetrischen Praxis durchgesetzt. Dieses Verfahren wird auch als LIDAR (Light Detection And Ranging) bezeichnet. Als dritte Alternative gilt das interferometrische SAR (IfSAR), das ebenso wie Laserscanning ein aktives Verfahren ist. Eine Gegenüberstellung von Kosten und DOM-Qualität für die unterschiedlichen Verfahren gibt Abbildung 3-1 (Mercer 2001). Bei den flugzeuggestützten Verfahren zeigt sich deutlich, dass interferometrisches Radar mit einer Genauigkeit von einigen Dezimetern bis 2m der Luftbildphotogrammetrie und LIDAR

deutlich unterlegen ist (Mercer & Schnick 1999) (Mercer & Gill 1998). Diesem Nachteil steht jedoch ein günstigerer Preis gegenüber, der aus der großen Flächenleistung und der Allwettertauglichkeit von IFSAR Verfahren resultiert.

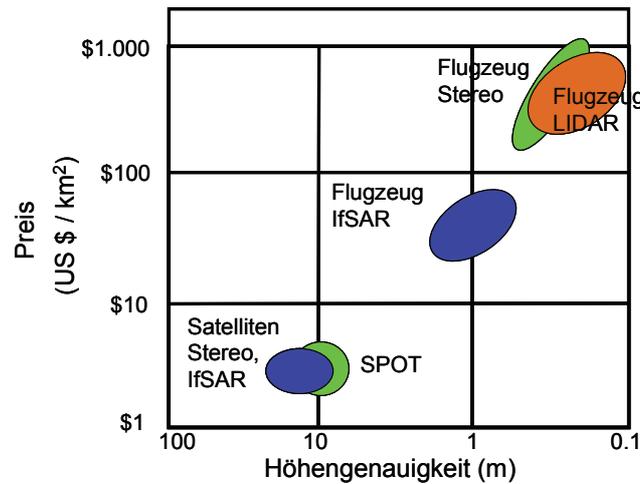


Abbildung 3-1: Kosten und Qualität von DOM-Datenquellen nach (Mercer 2001).

Die in dieser Arbeit diskutierten Verfahren zur topographischen Objekterkennung basieren auf dem Einsatz hochgenauer, dichter Höhendaten. Diese können nach Abbildung 3-1 nur durch Stereobildzuordnung oder Laserscanning erfasst werden.

3.1.1 Automatische Stereobildzuordnung

Die Methoden der Stereobildzuordnung werden üblicherweise in merkmalsbezogenen und flächenbezogenen Verfahren unterteilt. Da die wesentlichen Eigenschaften der Verfahren in der Literatur ausführlich beschrieben werden (Heipke 1995) (Maas 1997), sollen hier die jeweiligen Vor- und Nachteilen lediglich im Hinblick auf den geplanten Einsatzbereich – die Datenerfassung in bebauten Gebieten – kurz diskutiert werden.

Flächenbezogene Bildzuordnungsverfahren nutzen einfache, gut untersuchte Konzepte, die vor allem aus den Gebieten der digitalen Signalverarbeitung und der Ausgleichsrechnung übernommen wurden. Ein einfaches aber leistungsfähiges Verfahren zur Bildzuordnung basierend auf den Grauwerten eines lokalen Bildfensters ist die Korrelation. Dabei wird ein Ausschnitt aus dem Referenzbild, die sogenannte Mustermatrix, über einen bestimmten Bereich des zweiten Bildes, der Suchmatrix, geschoben. In jeder Position wird der Kreuzkorrelationskoeffizient

$$\rho = \frac{\sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} (g_1(r, c) - \bar{g}_1) \cdot (g_2(r, c) - \bar{g}_2)}{\sqrt{\sum_{r=0}^{R-1} \sum_{c=0}^{C-1} (g_1(r, c) - \bar{g}_1)^2 \cdot \sum_{r=1}^R \sum_{c=1}^C (g_2(r, c) - \bar{g}_2)^2}}$$

zwischen der Mustermatrix und einem gleichgroßen Ausschnitt aus der Suchmatrix (Korrelationsfenster) bestimmt. Der maximale Wert dieses Koeffizienten entspricht dabei der besten Lageübereinstimmung zwischen Mustermatrix und dem entsprechenden Bereich der Suchmatrix. Überschreitet dieses Maximum einen festzulegenden Schwellwert, gilt das Punktepaar als zugeordnet. Die Korrelation modelliert nur eine Verschiebung der Bildausschnitte zueinander. Rotationen oder Skalierungen zur lokalen Kompensation perspektivischer Verzerrungen werden nicht berücksichtigt.

Diese Einschränkungen werden mit der Kleinsten-Quadrate-Bildzuordnung als einer Erweiterung des Korrelationsverfahrens überwunden. Dabei wird die geometrische Transformation zweier korrespondierender Bildausschnitte durch eine Affintransformation

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \end{pmatrix}$$

beschrieben, die eine Verschiebung, Rotation oder Skalierung der Fenster erlaubt (Grün 1996). Zur Stabilisierung der Zuordnung wird zusätzlich zu der geometrischen Umbildung der Mustermatrix eine radiometrische Transformation

$$g_1 = r_1 \cdot g_2 + r_0$$

angesetzt. Die Grundidee der Kleinsten-Quadrate-Bildzuordnung liegt darin, die gesuchten Transformationsparameter durch die Minimierung der Quadratsumme der Grauwertdifferenzen zwischen Muster- und Suchmatrix zu schätzen. Die postulierte Affintransformation setzt dabei nur schwache perspektive Verzeichnungen zwischen Muster- und Suchmatrix sowie glatte Objektoberflächen voraus. Die Annahme kontinuierlicher Oberflächen ohne Bruchkanten wird darüber hinaus zur Elimination von Fehlzuordnungen sowie zur Beschleunigung des Verfahrens verwendet. Eine Verallgemeinerung dieses Kleinst-Quadrate Ansatzes zur Bildzuordnung stellt die Verbindung der Mehrpunktzuordnung mit dem Adaptiven Kleinst-Quadrate Algorithmus dar (Wrobel 1987) (Ebner et al 1987). Dieser Ansatz beruht auf der Beschreibung der Objektoberfläche durch verknüpfte Oberflächenmaschen. Das verwendete geometrische und radiometrische Modell verknüpft die zugrundeliegenden Bilddaten direkt mit den Geometrie- und Grauwertparametern eines Oberflächenmodells im Objektraum. Dieser objektraumorientierte Rekonstruktionsansatz ermöglicht somit die simultane Nutzung einer beliebigen Anzahl von Bildern zur Oberflächenbestimmung. Durch diese Mehrbildzuordnung können so vor allem bei großmaßstäbigen Luftbildern komplett verdeckte Bereiche vermieden werden, in denen keine Zuordnung möglich ist. Damit ist ein solcher Ansatz insbesondere für die bildbasierte Erfassung von DOM in Ortslagen von Interesse (Schlüter 1999).

Verfahren der merkmalsbezogenen Bildzuordnung nutzen korrespondierende Primitive wie Punkte, Konturpunktketten, Linien- oder Flächenstücke, die in einem Vorverarbeitungsschritt aus den Bildern abgeleitet werden (Förstner 1993), (Schenk 1999a). Die Auswahl der markanten Primitive nach Kriterien wie Deutlichkeit, Stabilität und Seltenheit erfolgt dabei in beiden Bildern unabhängig voneinander. Jedem Primitiv werden Attribute zugeordnet, die bestimmte Eigenschaften charakterisieren. Liegen diese Attribute für ein Paar von Primitiven in einem vorgegebenen Wertebereich, wird dieses Paar als mögliche Zuordnung in eine Objektliste aufgenommen. Zur Definition und Extraktion der Merkmale sowie zur Bestimmung des Ähnlichkeitsmaßes im Rahmen der Zuordnung hat sich bisher allerdings noch kein einheitliches Konzept durchgesetzt. Um eine endgültige Zuordnung der Primitive zueinander zu ermöglichen, werden neben den eigentlichen Attributen und semantischen Informationen, die eine Bildzuordnung auf einer höheren Ebene gestatten, zum Teil auch klassische Bildverarbeitungsprozeduren wie die Korrelation herangezogen. Um Mehrdeutigkeiten in der Zuordnung extrahierter Primitive zu vermeiden wird zudem häufig analog zu den gebietsbasierten Verfahren von einer kontinuierlichen Oberfläche ausgegangen. Ein Beispiel ist die Finite-Elemente Beschreibung der rekonstruierten Oberfläche, mit der die Konsistenz der Zuordnungen benachbarter Primitive einfach überprüft werden kann. Die Höheninformation ist bei merkmalsbasierten Verfahren auf die zugeordneten Primitive beschränkt, so dass in den Zwischenbereichen eine Interpolation erforderlich ist. Dies setzt wiederum einen kontinuierlichen Verlauf der zu rekonstruierenden Oberflächen voraus.

Sowohl flächen- als auch merkmalsbasierte Verfahren gehen damit von einer kontinuierlichen Oberfläche ohne Bruchkanten aus. Eine explizite Behandlung von Verdeckungen und Oberflächendiskontinuitäten findet nicht statt. Dies führt lediglich in offenem Gelände zu guten Ergebnissen. Im Bereich bebauter Gebiete sind diese Grundvoraussetzung nicht erfüllt, so dass dort häufig Schwierigkeiten auftreten können. Die Probleme in diesen Gebieten verschärfen sich zusätzlich bei fehlender Textur auf den Gebäudedächern oder bei schwachem Kontrast zwischen Dach- und Geländeoberfläche. Das Fehlen ausreichender radiometrischer Information führt dann zu mehrdeutigen, keinen oder fehlerhaften Lösungen (Price & Huertas 1992).

3.1.2 Laserscanning

Auch aufgrund der Probleme der automatischen Stereobildzuordnung hat sich in den letzten Jahren das flugzeuggetragene Laserscanning als alternatives Verfahren zur Erfassung von Höhendaten durchgesetzt (Wehr & Lohr 1999) (Ackermann 1999) (Baltasvias 1999) (Schenk 1999b) (Huising & Gomes Pereira L. M. 1998) (Flood 1999). Ebenso wie viele multispektrale Scanner basieren Laserscanner auf einer opto-mechanischen, scannenden Systemkonfiguration. Laserscanner sind jedoch aktive Systeme, die einen Laserstrahl als Messträger verwenden, um den Abstand zwischen dem Sensor und dem beleuchteten Fußpunkt auf der zu erfassenden Oberfläche zu messen. Zur Bestimmung der Strecke durch Laufzeitmessung der Lichtpulse wird der ausgesendete Laserstrahl und der wieder empfangene Anteil dieses Strahls registriert. Analog zu einer tachymetrischen Datenerfassung werden dann die Koordinaten der Laserfußpunkte durch polares Anhängen bestimmt. Zusätzlich zu dem Abstand zwischen Sensor und Fußpunkt und dem Auslenkwinkel des Laserstrahls muss deshalb die Position und Orientierung des Sensors durch ein GPS/INS-System erfasst werden. Flugzeuggetragene Systeme verwenden in der Regel optisch gepulste Laser mit circa 10ns kurzen Pulsen mittlerer oder hoher Energie sowie eine Strahldivergenz in der Größenordnung von 1mrad. Die Frequenzen der eingesetzten Laser liegen im Bereich von 500-1500nm, wobei Werte von 1040-1060nm die Regel sind. Derzeit ver-

fügbare flugzeuggestützte Systeme erreichen Messpunktdichten von einem Punkt für einer Fläche von $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ bei einer Punktgenauigkeit von 0.1m bis 0.2m.

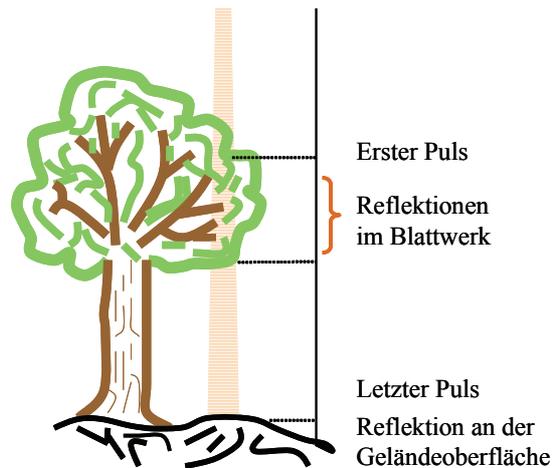
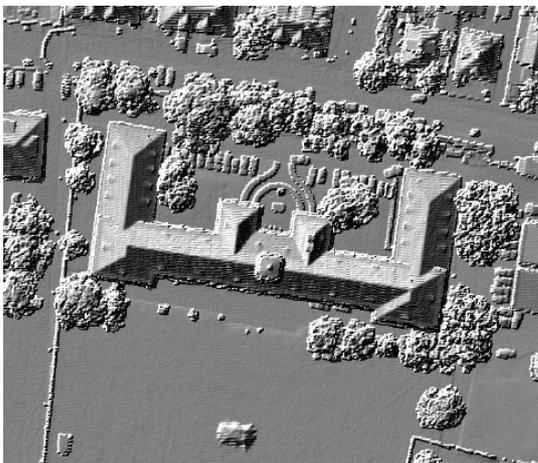


Abbildung 3-2: Reflexionsverhalten von Laserpulsen an Bäumen.



a) erste erfasste Reflexion

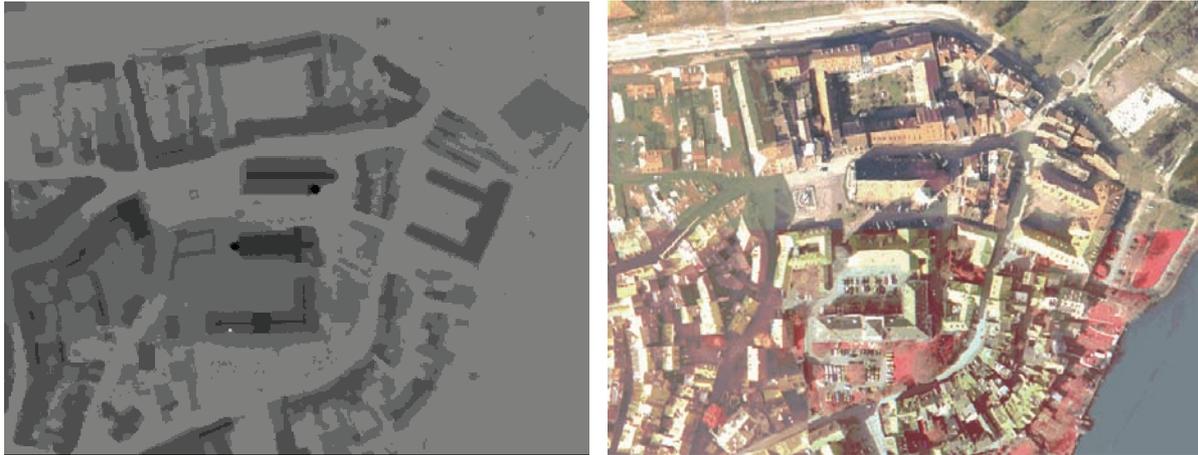


b) letzte erfasste Reflexion

Abbildung 3-3: Schattierte Darstellung eines DOM aus erster und letzter erfasster Reflexion.

Speziell für die Datenerfassung in Bereichen mit Vegetation kann bei LIDAR-Systemen zusätzliche Information in Form des ersten und letzten gemessenen Impulses erfasst werden. Dies ist in Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 dargestellt. Trifft, wie schematisch in Abbildung 3-2 dargestellt ein Laserpuls auf die einen Baum, so wird ein Teil des Lichts von Blättern oder Ästen reflektiert. Ein weiterer Teil durchdringt die Krone und wird erst von der Geländeoberfläche reflektiert. Aufgrund des kürzeren Weges des von der Krone reflektierten Pulses wird dieser sogenannte first-pulse zuerst registriert, wogegen die Reflexion am Boden als zuletzt als last-pulse erfasst wird. In Abbildung 3-3a ist deutlich erkennbar, dass die first-pulse Messungen noch Bäume und Büsche beinhaltet, wogegen diese in last-pulse Messungen wie in Abbildung 3-3b nicht mehr vorhanden sind.

Teilweise werden Laserscannersysteme bereits mit Kameras kombiniert, um für die anschließenden Auswerteschritte sowohl geometrische als auch radiometrische Information bereitzustellen. Abbildung 3-4 zeigt Daten des Systems TOPOSYS II (Lohr 2001) bei dem zusätzlich zu den Höhendaten ein Luftbild in vier spektralen Kanälen NIR, rot, grün und blau durch eine integrierte Zeilenkamera erfasst wird. Die Auflösung der Bilder beträgt 0.5m und ist damit doppelt so hoch wie die Auflösung des DOM. Abbildung 3-4b zeigt das bereits aus den Luftbildern abgeleitete Orthobild.



a) Digitales Oberflächenmodell

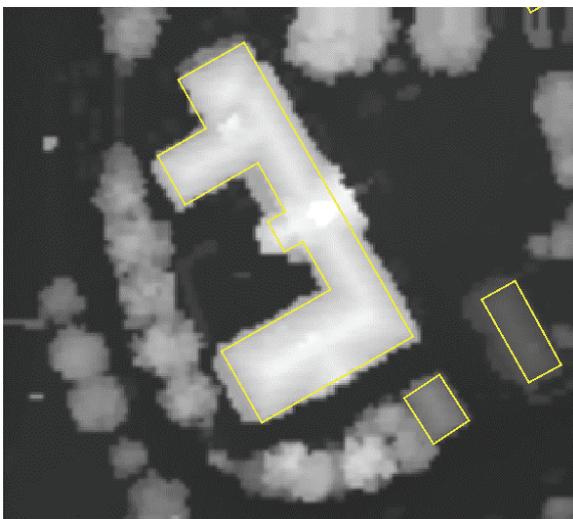
b) Orthobild

Abbildung 3-4: Simultan erfasste Bild- und Höhendaten des Systems TOPOSYS II.

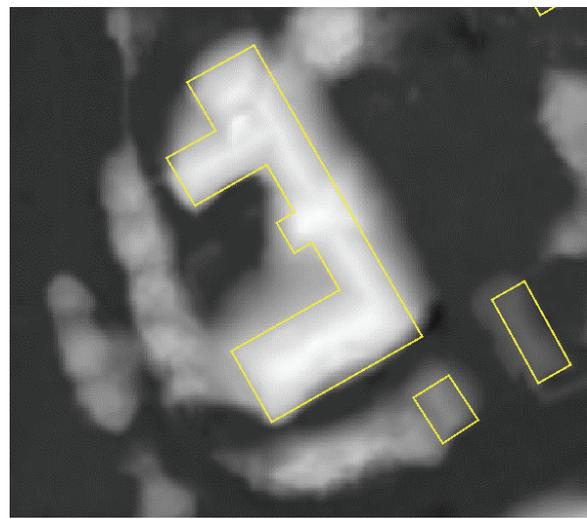
3.1.3 Qualität von Höhendaten in bebauten Gebieten

Ziel der in diesem Kapitel vorgestellten Ansätze ist die Stützung der automatischen topographischen Objekterfassung in bebauten Gebieten durch die Integration von Bild- und Höhendaten. Im Rahmen der dabei durchgeführten Untersuchungen werden sowohl mit einem LIDAR-Sensor erfasste DOM als auch Höhendaten aus einer automatischen Stereobildzuordnung eingesetzt. Um einen Vergleich dieser Eingangsdaten zu ermöglichen, wurde für einen identischen Bereich durch beide Verfahren jeweils ein DOM mit einer Rasterweite von 1m erfasst. Für die Erfassung des LIDAR-DOM wurde das System TOPOSYS eingesetzt (Lohr 2001). Die Stereobildzuordnung erfolgte mit dem kommerziellen Programmpaket MATCH-T. Als Datengrundlage dienten dabei Luftbilder, die bei einer Brennweite von 305mm im Maßstab 1:5000 befliegen wurden.

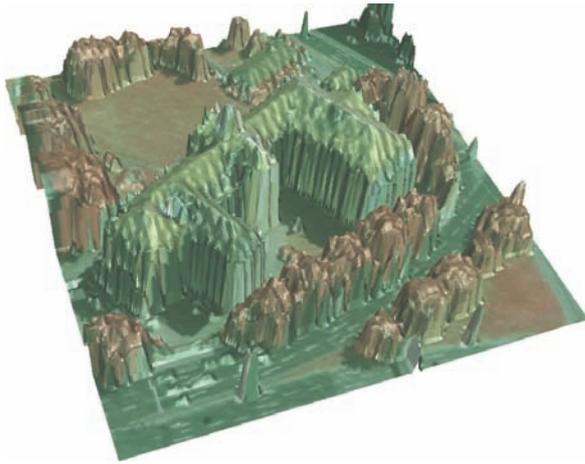
Ein typischer Ausschnitt der in den nachfolgenden Auswertungen verwendeten Höhendaten ist in Abbildung 3-5 dargestellt. Abbildung 3-5a und Abbildung 3-5c zeigen dabei das DOM aus Laserscanning jeweils als grauwertkodierte beziehungsweise dreidimensionale Darstellung. Das durch Stereobildzuordnung erfasste DOM ist in Abbildung 3-5b und Abbildung 3-5d dargestellt. Um eine bessere visuelle Bewertung des DOM im Bereich von Dachbruchkanten zu ermöglichen, ist jeweils in den grauwertkodierten Darstellungen die tatsächliche Bruchkante durch ein gelbes Polygon markiert. Diese Bruchkante ist durch den terrestrisch eingemessenen Gebäudegrundriss definiert. Insbesondere in den so markierten Bereichen ist deutlich erkennbar, dass das DOM aus Laserscanning im Vergleich zu dem relativ glatten DOM aus Stereobildzuordnung deutlich schärfere Höhenübergänge beinhaltet.



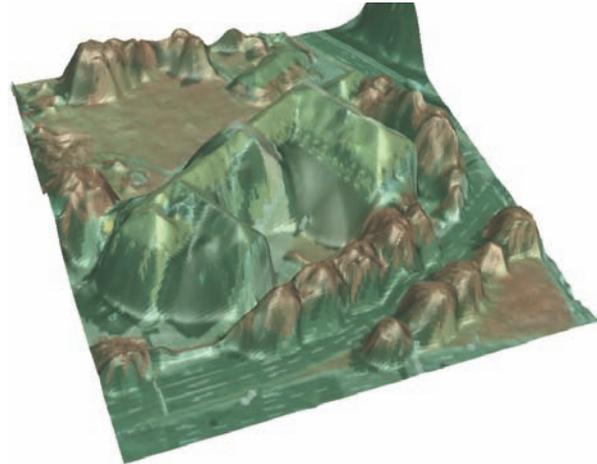
a) Grauwertkodierte Darstellung - Laserscanning



b) Grauwertkodierte Darstellung - Stereobildzuordnung



c) Dreidimensionale Darstellung - Laserscanning



d) Dreidimensionale Darstellung - Stereobildzuordnung

Abbildung 3-5: Vergleich von Höhendaten aus Laserscanning und Stereobildzuordnung.

Ziel des in Abschnitt 3.2 beschriebenen Verfahrens ist die Integration der in DOM enthaltenen geometrischen Information in ein Verfahren zur automatischen Erfassung topographischer Objekte. Dazu werden neben den Höhendaten noch multispektrale Bilddaten genutzt, die Integration erfolgt innerhalb einer gemeinsamen Klassifizierung der beiden Datenquellen.

3.2 Klassifizierung bebauter Gebiete mit Bild- und Höhendaten

Die Nutzung multispektraler Daten für die Erfassung topographischer Objekte und die Bestimmung von Landnutzungsarten ist ein klassisches Aufgabengebiet der Fernerkundung (Hall 1992) (Abidi & Gonzales 1992) (Lillesand & Kiefer 1994). Durch eine pixelbasierte Klassifizierung ist es dabei möglich, aus der multispektralen Information Rückschlüsse über die Oberflächenbeschaffenheit der abgebildeten Objekte zu gewinnen und so Klassen von Objekten zu bilden. Traditionell werden für die Klassifizierung Satellitendaten eingesetzt. Ein typisches Fernerkundungssystem wie IRS-1 C liefert beispielsweise eine Auflösung von 6m für die panchromatischen und 23m für die multispektralen Kanäle. Ähnliche Größenordnungen erreicht das System SPOT mit einer Größe der Bodenpixel von 10m beziehungsweise 20m. Mittlerweile sind jedoch mit kommerziellen satellitengestützten Systemen auch deutlich höhere räumliche Auflösungen möglich. Beispiele sind das System Ikonos der Firma Space Imaging mit einer panchromatischen beziehungsweise multispektralen Auflösung von 1m und 4m oder das System QuickBird-2 mit Auflösungen von 61cm im panchromatischen beziehungsweise 2.44m im multispektralen Bereich. Auf der anderen Seite liefern die derzeit auf den Markt kommenden digitalen Luftbildkameras Bilder in einer radiometrischen Auflösung und Qualität, wie sie seither nur bei Satellitenmission möglich war. In kommerziellen Systemen wie der DMC-Kamera der Firma Z/I-Imaging (Hinz et al 2000) oder der ADS40 von LH Systems (Tempelmann et al 2000) sind jeweils Aufnahmekanäle für den roten, grünen, blauen und nahen Infraroten Spektralbereich integriert. Dadurch ist die flugzeuggestützte Aufnahme von qualitativ hochwertigen Multispektraldaten mit räumlichen Auflösungen bis hinunter zu 10cm möglich.

Die durch digitale Luftbildkameras beziehungsweise durch hochauflösende Satellitensysteme erfassten Daten ermöglichen so die Auswertung multispektraler Daten durch Techniken der Fernerkundung auch für große Maßstäbe. Neben den traditionellen Aufgaben der Fernerkundung wie der großräumigen Erfassung von Landnutzungsarten werden damit im Prinzip auch Anwendungen wie die Kartierung komplexer anthropogener Strukturen möglich. Speziell bei der Auswertung geometrisch hochauflösender Aufnahmen von komplexen Landoberflächen führt jedoch der Einsatz von Standard-Klassifizierungsverfahren häufig nicht zu den erforderlichen Genauigkeiten und Zuverlässigkeiten. Traditionelle Aufnahmesysteme liefern Bilddaten, in denen die Komplexität anthropogener und natürlicher Strukturen bereits durch die grobe räumliche Auflösung stark vereinfacht ist. In bebauten Gebieten werden so einzelne Pixel bereits als eine Mischung verschiedener Szenenkomponenten wie Vegetation und Gebäude erfasst. Die resultierenden Mischpixel besitzen allerdings eine unterscheidbare spektrale Signatur und können damit auch durch ein konventionelles pixelbasiertes Klassifizierungsverfahren als Objektklasse Vorstadt identifiziert werden. Bei einer höherer räumlicher Auflösung der Aufnahmesysteme werden demgegenüber einzelne Komponenten wie Gebäude, Vegetation, Boden und asphaltierte Flächen getrennt abgebildet und müssen damit auch als getrennte Objektklassen erfasst werden. Durch die sich so vergrößernde Zahl von Objektarten wird jedoch gleichzeitig die spektrale Unterscheidbarkeit der einzelnen Klassen reduziert. Zudem können speziell in urbanen Gebieten auch verschiedene

der einzelnen Klassen reduziert. Zudem können speziell in urbanen Gebieten auch verschiedene Objektoberflächen und –zustände zu nahezu identischen spektralen Signaturen führen. Dadurch wird die spektrale Information geometrisch hochauflösender Bilder in ihrer Aussagekraft mehrdeutig. Eine pixelweise Differenzierung städtischer Objektklassen ausschließlich basierend auf dieser Information ist in diesem Fall nicht mehr möglich.

Für die Klassifizierung multispektraler Bilder ist damit vor allem in urbanen Gebieten eine Stützung notwendig. Diese wird in dem vorgeschlagenen Ansatz durch die Integration eines Digitalen Oberflächenmodelles erreicht. Die mit Laserscanning oder Stereobildzuordnung erfassten DOM beschreiben neben der Geometrie des Geländes auch Objekte wie Bäume, Büsche, Gebäude oder Fahrzeuge. Somit enthalten DOM implizit Information über die lokale Höhe von Objekten über der Geländeoberfläche. Da Objekte wie Bäume und Gebäude höher als ihre Umgebung sind, können sie basierend auf dieser Information relativ gut von ihrer Umgebung getrennt werden. Auf der anderen Seite lässt sich anhand von spektraler Information Vegetation wie Bäume und Grünflächen gut von bebauten Bereichen wie Strassen oder Gebäuden unterscheiden. Die gemeinsame Nutzung von spektraler und geometrischer Information im Rahmen einer pixelbasierten Klassifizierung ermöglicht somit auch gute Ergebnisse bei der Prozessierung geometrisch hochauflösender Daten in bebauten Gebieten. Als wichtige Voraussetzung für diese kombinierte Klassifizierung müssen zunächst die relative Höhe der topographischen Objekte über der Geländeoberfläche aus dem verfügbaren DOM abgeleitet werden. Hierfür können die in Abschnitt 3.2.1 diskutierten morphologischen Filteroperationen eingesetzt werden. Anschließend erfolgt dann, die Integration der Höhendaten als zusätzlicher Informationskanal in einer multispektralen Klassifizierung.

3.2.1 Morphologische Filterung von Höhendaten

DOM repräsentieren die Geometrie der Geländeoberfläche einschließlich der sich darauf befindenden Objekte. Objekte wie Bäume oder Gebäude, die aus der Geländeoberfläche herausragen bilden sich somit als lokale Maxima im DOM ab. Die Detektion dieser Maxima erlaubt so zumindest näherungsweise die Lokalisierung von Gebäuden (Haala 1994) (Weidner & Förstner 1995).

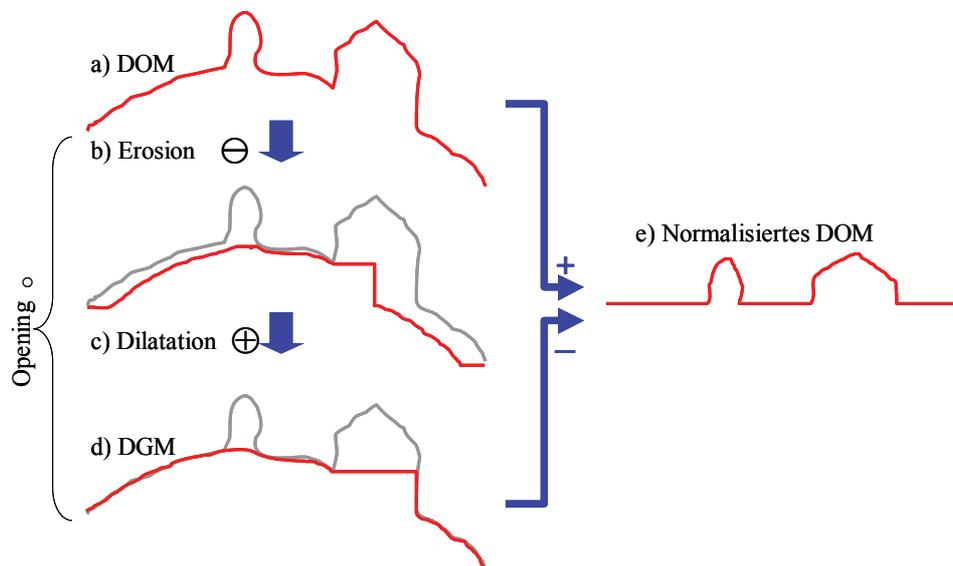


Abbildung 3-6: Morphologische Operationen für die Bearbeitung von DOM.

Eine Bestimmung von DOM-Maxima ist, wie skizzenhaft in Abbildung 3-6 dargestellt, durch die Bearbeitung des DOM mit Operatoren der Grauwertmorphologie möglich (Brenner 2000a). Die hierfür eingesetzten Verfahren wurden ursprünglich als Filteroperationen der digitalen Bildverarbeitung entwickelt. Dabei fand zunächst eine Erweiterung der ursprünglichen binären morphologischen Operationen der Dilatation und Erosion zu Minimum und Maximum Operationen für die Prozessierung von Grauwertbildern statt (Haralick et al 1987). Wird das DOM durch ein regelmäßiges Raster repräsentiert, so lassen sich solche Filter der digitalen Bildverarbeitung für die Bearbeitung von Höhendaten sehr einfach einsetzen. Da jeder Lagepunkt eines DOM nur einen Höhenwert besitzt, liegt keine echte dreidimensionale Beschreibung vor. Damit besitzen DOM die Form eines Graphen $Z = f(X, Y)$ und sind deshalb lediglich 2.5-dimensional. Durch die Diskretisierung dieser kontinuierlichen Funktion mit einer konstanten Gitterweite ist eine weite-

re Vereinfachung möglich. Die daraus resultierende Rasterdarstellung des DOM entspricht dann einem Bild mit Fließkommawerten, das mit Operatoren der digitalen Bildverarbeitung ohne weitere Modifikationen bearbeitet werden kann.

Das Ziel der morphologische Prozessierung des DOM ist zunächst die Ableitung der Geländeoberfläche, die durch ein Digitales Geländemodell (DGM) repräsentiert wird. Zu diesem Zweck wird mit dem Strukturelement s auf der Matrix Z des DOM eine morphologische Erosion (Abbildung 3-6a)

$$\bar{Z} = Z \ominus s = \min_{(i,j \in s)} \{Z(X+i, Y+j) - s(i, j)\}$$

gefolgt von einer morphologischen Dilatation (Abbildung 3-6b)

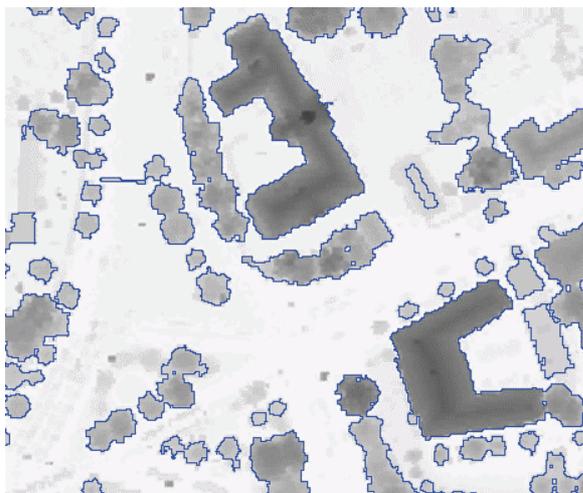
$$\bar{\bar{Z}} = \bar{Z} \oplus s = \max_{(i,j \in s)} \{Z(X-i, Y-j) + s(i, j)\}$$

durchgeführt. Die resultierende Kombination von Erosion und Dilatation ergibt dabei ein Opening

$$Z \circ s := (Z \ominus s) \oplus s$$

Durch das Opening werden lokale Maxima im DOM eliminiert, die kleiner als die gewählte Größe des zur Filterung verwendeten Strukturelements s sind. Aus diesem Grund muss sich die Größe des Strukturelements s nach der zu erwartenden Ausdehnung der zu eliminierenden Objekte richten. Im Idealfall können damit alle aus dem Gelände herausragenden Objekte wie Bäume und Gebäude eliminiert werden. In diesem Fall ergibt das Resultat des Opening das gesuchte DGM (Abbildung 3-6d). Durch die Subtraktion dieses DGM vom dem ursprünglich gemessenen DOM erhält man dann das normalisierte DOM (Abbildung 3-6e). Darin sind alle Objekte, die durch das Opening eliminiert wurden auf eine Horizontalebene bezogen, so dass jeweils die relative Höhe in Bezug auf die Geländeoberfläche angegeben ist. Nach einer Schwellwertbildung mit einer vorgegebenen minimalen relativen Höhe können so Objekte lokalisiert werden, die aus der Oberfläche herausragen und kleiner als der morphologische Operator s sind.

Ein Resultat der morphologischen Filterung ist exemplarisch in Abbildung 3-7 dargestellt. Die durch morphologisches Opening und Schwellwertbildung lokalisierten DOM-Maxima sind dabei durch Polygone dargestellt. Abbildung 3-7a zeigt das verwendete DOM in einer Grauwertrepräsentation, während Abbildung 3-7b zur besseren Visualisierung das zugehörige Orthophoto darstellt. Dieses Beispiel zeigt, dass in Bereichen mit relativ offenem Bewuchs beziehungsweise offener Bebauung Objekte wie Gebäude und Bäumen gut in Höhendaten lokalisiert werden können. Eine weitergehende Differenzierung zwischen Gebäuden und Vegetation kann im Prinzip durch eine Analyse der geometrischen Oberflächeneigenschaften erfolgen. Dabei kann beispielsweise nach unterschiedlich starker Änderungen der Neigungsrichtungen weiter differenziert werden. Eine solche Differenzierung erfordert jedoch eine Qualität und Auflösung der DOM-Daten wie sie üblicherweise nicht zur Verfügung steht.



a) normalisiertes DOM



b) Orthobild

Abbildung 3-7: Lokale DOM-Maxima aus morphologischer Filterung.

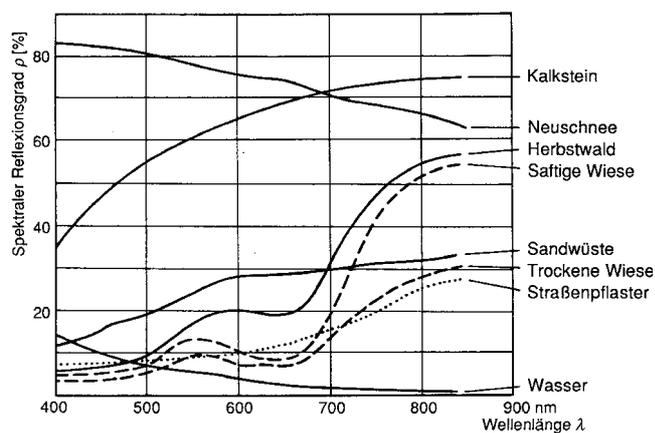
Die limitierte automatische Interpretierbarkeit von Höhendaten kann jedoch durch die zusätzliche Nutzung spektraler Daten verbessert werden, um so Information über das jeweils abgebildete Oberflächenmaterial in den Auswertepro-

zess zu integrieren. Als spektrale Datenquelle kann hierfür im Prinzip auch die Intensität des reflektierten Laserstrahls verwendet werden (Hug 1997). Üblicherweise ist jedoch eine Kombination des Laserscanners mit einer Kamera einfacher zu realisieren. Dies bietet den zusätzlichen Vorteil, dass mit einer Kamera auch unterschiedliche spektrale Kanäle im sichtbaren und nahen Infrarotbereich erfasst werden können. Diese kombinierte Datenerfassung ist deshalb bereits in einigen kommerziellen Systemen verwirklicht (Lohr 2001) (Toth et al 2001). Die Integration von Bild- und Höhendaten im Rahmen der Auswertung kann dann, wie im folgenden Abschnitt beschrieben, durch eine multispektrale Klassifizierung erfolgen, in die ein normalisiertes DOM als zusätzlicher Kanal integriert wird.

3.2.2 Integration von Höhendaten als zusätzlicher Informationskanal

Digitale Luftbildkameras erfassen spektrale Information im sichtbaren und nahen infraroten Spektrum. Gleiches gilt für die analoge Aufnahme von Farbinfrarot-Luftbildern, die empfindliche Filmschichten im grünen, roten und infraroten Spektrum besitzen. Diese Spektralbereiche sind insbesondere für Vegetationsuntersuchungen von Interesse. Darüber hinaus ist damit in der Regel auch eine einfache Trennung der Vegetation von anderen Objektarten möglich. Dabei macht man sich die Tatsache zu Nutzen, dass der Reflexionsgrad gesunder Vegetation bei $0,7 \mu\text{m}$ sprunghaft ansteigt, während unbewachsener Boden üblicherweise einen stetigen, geradlinigen Verlauf aufweist. Dies wird anhand des Verlauf der relativen Reflexion deutlich, der für verschiedene Oberflächen in Abbildung 3-8a dargestellt ist.

Bei der Aufnahme von Vegetation im roten Spektrum wird die einfallende Sonnenstrahlung weitgehend durch das in den Blätter enthaltenen Chlorophyll absorbiert. Im nahen Infrarot wird dagegen der Großteil der auftreffenden Strahlung vom Blattgewebe reflektiert. Je aktiver das Chlorophyll der Pflanzen ist, desto größer ist damit der Anstieg des Reflexionsgrades im nahen Infrarot. Dieser Umstand wird bei Vegetationsuntersuchungen häufig durch die Bildung des normierten Vegetationsindex (NDVI) genutzt. Dieser wird nach $\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{rot}) / (\text{NIR} + \text{rot})$ aus den spektralen Bändern im nahen Infrarot und im roten Bereich berechnet. Der rote Kanal liegt beispielsweise bei einer digitalen Luftbildkameras wie der DPA bei 610-685nm, nahes Infrarot wird im Bereich von 770-890nm erfasst. Bei einem System wie der ADS40 liegen diese Werte bei 610-660nm beziehungsweise 835-885nm. Die bei der Berechnung des NDVI durchgeführte Normierung aufgrund der Quotientenbildung führt zu einer Minderung topographischer und atmosphärischer Effekte, der Hauptvorteil liegt jedoch in der deutlichen Erkennbarkeit von Vegetation.



a) Reflexionsgrade von Oberflächen (Albertz 1991)



b) Normierter Vegetationsindex

Abbildung 3-8: Darstellung von Vegetation in Multispektraldaten.

Wie das in Abbildung 3-8b dargestellte Beispiel zeigt, sind Bäume und Grünflächen als helle Bereiche deutlich erkennbar. Diesem Beispiel liegt das in Abbildung 3-7b dargestellte Orthobild zugrunde. Zur Berechnung des Orthobildes wurde zunächst Farbinfrarot-Luftbild (Color-Infrared, CIR) gescannt, die Digitalisierung ergab drei digitale Bilder in den spektralen Bändern grün, rot und nahes Infrarot. Für die anschließende Berechnung des Orthobildes mit einer Bodenpixelgröße von $0,5\text{m}$ wurde neben der bekannten äußerer Orientierung des Luftbilds das in Abbildung 3-7 dargestellte DOM genutzt. Um eine weitere Differenzierung zu ermöglichen, wurde mit den verfügbaren spektralen Kanälen des Orthobilds eine Klassifizierung mit den vier Objektarten Gebäude, Baum, Strasse und Grünland durch ein Standardverfahren durchgeführt.

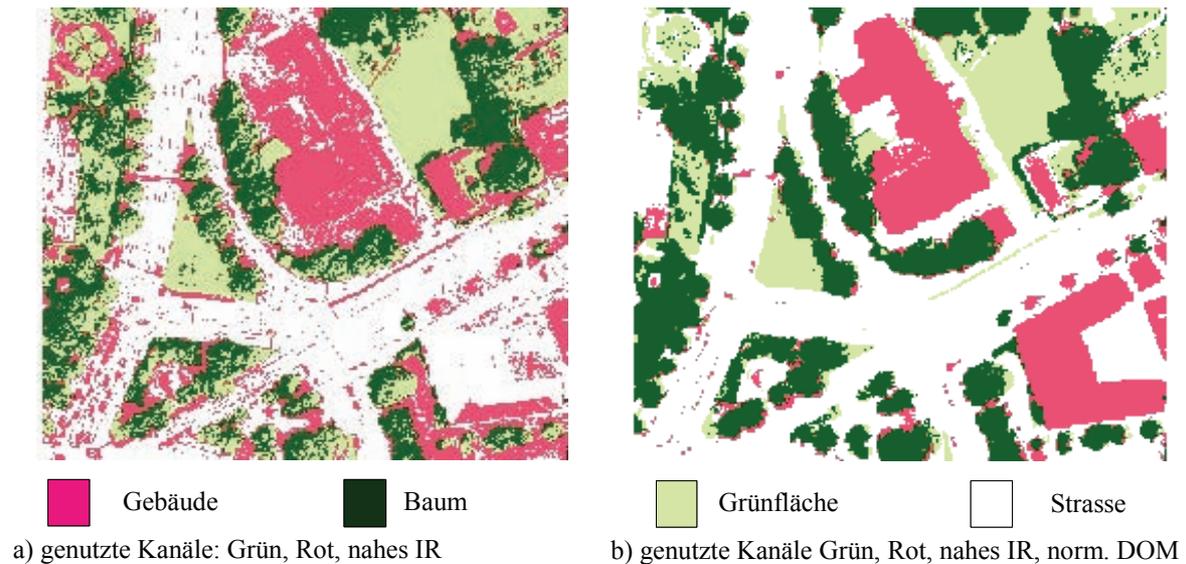


Abbildung 3-9: Verbesserung der Klassifizierung durch Integration von Höhendaten.

Das in Abbildung 3-9a dargestellte Ergebnis zeigt deutlich, dass für solche geometrisch hoch aufgelösten Multispektraldaten in komplexen urbanen Gebieten keine sinnvolle Objektbildung mittels pixelweiser Klassifikation möglich ist. Die Differenzierbarkeit der gewählten Objektarten kann jedoch durch die Integration zusätzlicher geometrischer Information gesteigert werden. Dazu wird das in Abbildung 3-7a dargestellte normalisierte DOM gemeinsam mit den verfügbaren spektralen Bändern als zusätzlicher Kanal für die Klassifizierung genutzt. Das Ergebnis ist in Abbildung 3-9a dargestellt. In diesem Fall werden basierend auf der multispektralen Information die Objektarten Gebäude und Strasse von Klassen mit Vegetation wie Baum und Grünfläche getrennt. Gleichzeitig ermöglicht die lokale Objekthöhe aus dem normalisierten DOM eine Trennung von Objektklassen über der Geländeoberfläche wie Gebäude und Baum von Objektklassen auf der Geländeoberfläche wie Strasse und Grünfläche. Der Vergleich beider Ergebnisse in Abbildung 3-9 macht deutlich, dass in dem vierdimensionalen Merkmalsraum eine erheblich bessere Trennung der unterschiedlichen Objektklassen erreicht wird.

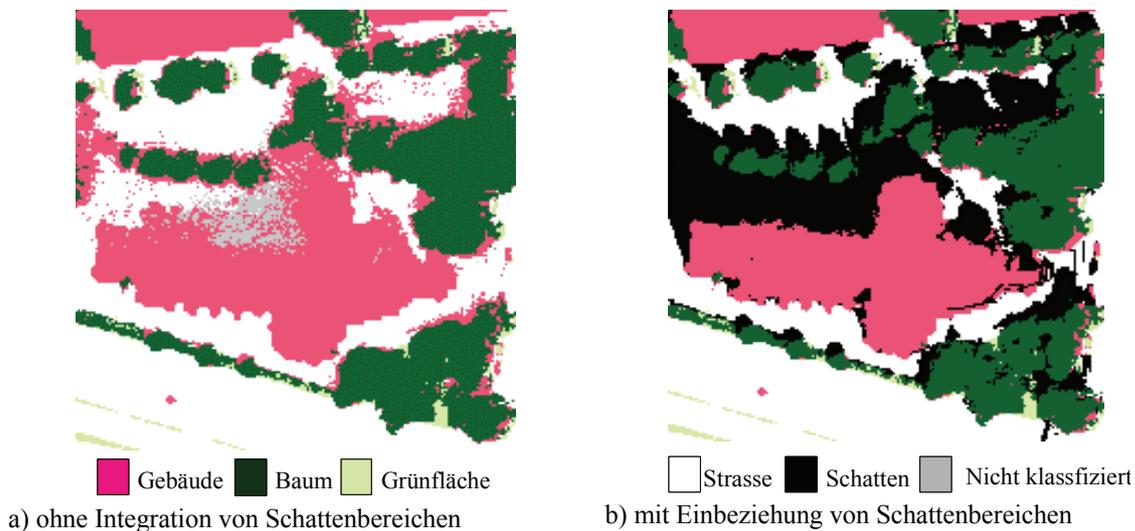


Abbildung 3-10: Verbesserung der Klassifizierung durch Vorbestimmung von Schattenbereichen.

Bereits der visuelle Vergleich der Klassifizierung in Abbildung 3-9b mit dem Orthophoto in Abbildung 3-7b zeigt eine Häufung von Fehlklassifikationen innerhalb von Schattenbereichen. Diese werden durch die Änderung der spektralen Signatur der abgebildeten Objektflächen aufgrund der unterschiedlichen Beleuchtung verursacht. Die durch Verschattung verursachten Fehler können jedoch ebenfalls mit Hilfe des verfügbaren DOM reduziert werden. Dazu werden Schattengebiete a priori durch einen einfachen Strahlverfolgungsalgorithmus berechnet. Die Bestimmung des hierfür benötigten horizontalen und vertikalen Einfallswinkels der Sonnenstrahlen während der Bildaufnahme kann

Die Nutzung der berechneten Klassifizierung für die Verifikation existierender GIS-Daten wird anhand des Beispiels in Abbildung 3-12 verdeutlicht. Darin sind die durch schwarze Polygone repräsentierten, aus Bild- und Höhendaten klassifizierten Gebäudebereiche einer existierenden Karte im Maßstab 1:5000 überlagert. Im nordwestlichen Teil sind die Unterschiede zwischen der Karte und dem die aktuelle Situation repräsentierenden Ergebnis der Klassifizierung erkennbar. Dieses Beispiel zeigt, dass durch die kombinierte Klassifizierung von Bild- und Höhendaten zumindest Inkonsistenzen zwischen aktuellen Fernerkundungs- und existierenden GIS-Daten automatisch aufgedeckt werden können. Auch wenn das Ergebnis der Klassifizierung für eine automatische Erfassung der GIS-Daten unter Umständen nicht zuverlässig und genau genug ist, so kann dadurch zumindest die zielgerichtete manuellen Nachführung der Daten und dadurch ein Operateur unterstützt werden.

In den vorigen Beispielen wurden die multispektralen Daten für die Klassifizierung aus analogen Farbfilmen digitalisiert. Im Vergleich zu dem in der Fernerkundung üblichen Einsatz von digitalen Aufnahmesensoren führt dies zu einem relativ ungünstigen Signal-Rauschverhältnis. Daneben ermöglichen analoge Farbfilme lediglich die Differenzierung von jeweils drei spektrale Bänder; Rot, Grün, Blau bei Echtfarb-Aufnahmen beziehungsweise Infrarot, Rot und Grün bei Farbinfrarot-Aufnahmen. Ein grundsätzliches Problem ist zudem die Änderung der photometrischen Eigenschaften bei analogen Filmen, die aufgrund der Lagerung oder während der Entwicklung entstehen. Dadurch ist es mit analogen Filme sehr schwierig, eine homogene, über längere Zeiträume konstante spektrale Qualität der erfassten Bilddaten bereitzustellen. Aus diesem Grund ist für die Klassifizierung die Nutzung von Bilddaten anzustreben, die mit einer digitalen Luftbildkamera erfasst wurden.

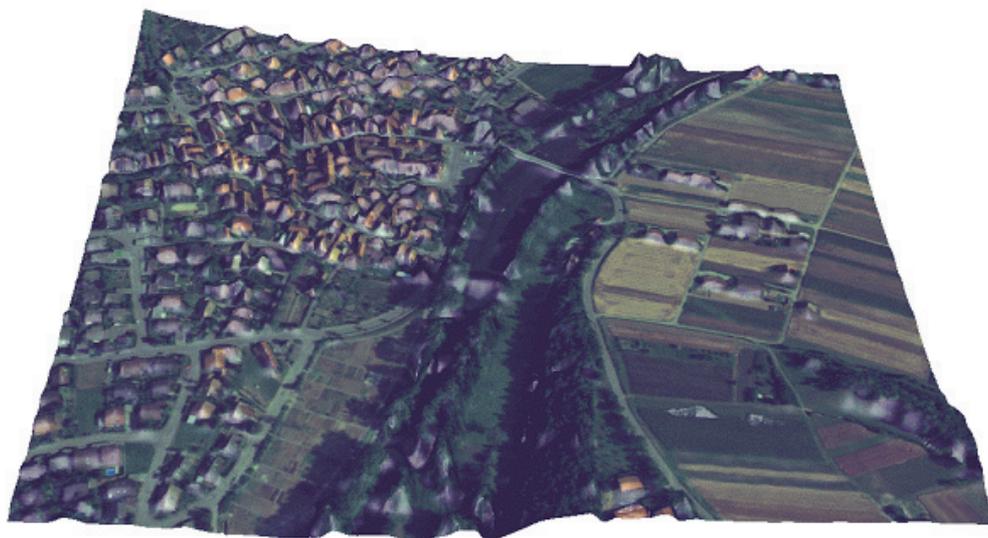
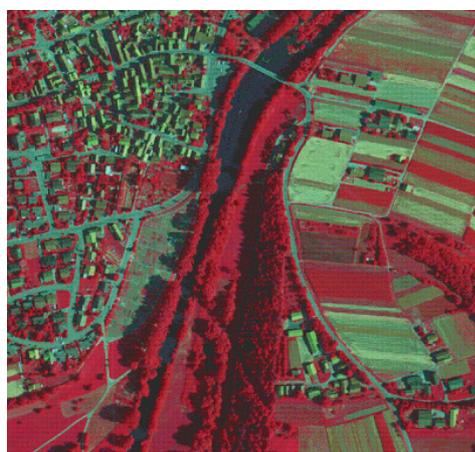


Abbildung 3-13: 3D Visualisierung des Testgebiets.



a) Normalisiertes DOM aus Stereobildzuordnung



b) Farbinfrarotbild

Abbildung 3-14: Datengrundlage für kombinierte Klassifizierung von DPA-Daten.

Ein Beispiel für ein solches digitales Aufnahmesystem ist die in Abschnitt 2.4.2 vorgestellte DPA-Kamera. Bei diesem System erfolgt durch die Kombination mehrerer CCD-Zeilen eine simultane Erfassung von Stereo- und Multispektraldaten. Neben den drei panchromatischen vor-, nadir-, und rückwärtsblickenden Stereo-Kanälen erfasst das System noch Daten in den vier spektralen Kanälen Blau (440-525nm), Grün (520-600nm), Rot (610-68nm) und Nahes Infrarot (770-890 nm). Abbildung 3-13 zeigt eine 3D Visualisierung eines durch Stereobildzuordnung berechneten DOM, das mit einem aus den roten, grünen und blauen Kanal erzeugten Echtfarbenbild überlagert wurde. Aus diesem DOM wurde durch morphologische Filterung das in Abbildung 3-14a dargestellte normalisierte DOM erzeugt. Dieses normierte DOM wurde als zusätzlicher Kanal in die Klassifizierung der vier multispektralen Kanäle integriert. Der dabei verwendete Ausschnitt des Orthobilds ist in Abbildung 3-14b durch ein Falschfarbeninfrarotluftbild repräsentiert, das aus der Überlagerung des grünen, roten und nahen infraroten Kanals erzeugt wurde.

Das Ergebnis der kombinierten Klassifizierung von DPA-Daten ist in Abbildung 3-15 dargestellt. Dabei wurden die vier multispektralen Kanäle sowie ein aus Stereobildzuordnung gewonnenes normalisiertes DOM eingesetzt um die Objektklassen Baum, Grünfläche, Gebäude, Strasse und Gewässer zu unterscheiden. In diesem Beispiel resultierte die nur prototypische Implementierung des automatischen Bildzuordnungsverfahrens zur Generierung des DOM aus den Zeilenbildern in Verbindung mit der systembedingten eingeschränkten geometrischen Qualität der Bilddaten in einer relativ geringen Qualität der Höhendaten. Dies wirkte sich auch negativ auf Qualität der Klassifizierung aus. Die grundsätzliche Anwendbarkeit dieses Ansatzes auf Daten einer digitalen Luftbildkamera nach dem Pushbroom-Verfahren konnte jedoch durch diese Versuche nachgewiesen werden (Haala et al 1999).

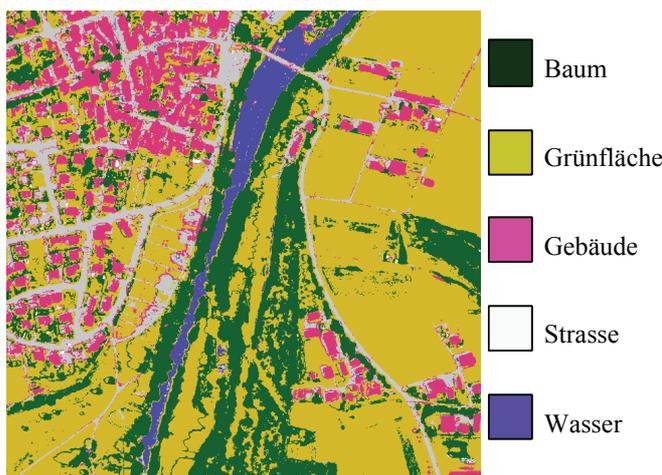


Abbildung 3-15: Klassifizierung mit DPA-Daten.

Untersuchungen zur kombinierten Klassifizierung von Bild- und Höhendaten wurden auch basierend auf der digitalen Pushbroom-Kamera HRSC-A durchgeführt (Hoffmann 2001). Dabei wurde durch die simultane Mehrfachbildzuordnung aller drei panchromatischer Zeilen in Vor- Nadir- und Rückblick ein qualitative Verbesserung des DOM gegenüber der sonst üblichen Zuordnung eines Bildpaars erreicht. Die Integration der Höhendaten erfolgte in diesem Ansatz durch eine hierarchische Klassifizierung. Dabei wurden zunächst Objekte, die aus der Geländeoberfläche ragen durch eine morphologische Analyse extrahiert. Im Anschluss daran erfolgte eine weitere Unterteilung dieser Bereiche mittels der spektralen Information in Gebäude und andere Objekte wie Büsche oder Bäume. Beide Verfahren zur Kombination von Bild- und Höhendaten - die hierarchische Klassifizierung und die in diesem Kapitel diskutierte Integration des normierten DOM als zusätzlicher Kanal - nutzen jedoch die komplementären Eigenschaften der eingesetzten Datenquellen zur Objektextraktion in komplexen bebauten Gebieten. Die verwendeten Höhendaten können im Prinzip sowohl durch Laserscanning erfasst, als auch durch automatische Stereozuordnung aus den vorhandenen Bilddaten abgeleitet werden. Dem Nachteil der geringeren DOM-Qualität aus Stereobildern steht dabei der Vorteil gegenüber, dass alle benötigten Daten von einem einzigen Sensor bereitgestellt werden.

3.3 Bildgestützte Segmentierung von Digitalen Oberflächenmodellen

Von LIDAR-Sensoren erfasste Höhendaten dienen häufig als Datengrundlage zur Ableitung von Geländemodellen in Stadt- und Waldgebieten (Kraus 2001). Für Anwendungen des Gewässerschutzes und der Analyse von Überflutungsrisiken müssen dabei zusätzlich Strukturelemente wie Uferlinien oder Geländebruchkanten extrahiert werden (Gomes_Pereira & Wicherson 1999) (Brockmann & Mandelburger 2001). Eine Segmentierung solcher dreidimensionaler Primitive ist zudem ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einer automatischen dreidimensionalen Erfassung von Gebäuden aus DOM-Daten. Während Kapitel 4 die Kombination von 2D GIS und Höhendaten für die Erfassung von 3D Stadtmodellen zum Schwerpunkt hat, wird in diesem Abschnitt die Integration von Bildinformation für die Segmentierung von DOM als wichtigem Vorverarbeitungsschritt für eine solche Objektrekonstruktion diskutiert. Im Rahmen von Verfahren der 3D Gebäuderekonstruktion hat die Segmentierung häufig die Extraktion gerader Kanten

oder ebener Flächen zum Ziel, um daraus Polyeder zu konstruieren, die zur Beschreibung der Gebäude verwendet werden.

Eine Segmentierung dreidimensionaler Bruchkanten und ebener Flächen ist aus DOM in ausreichender Qualität gut möglich. Insbesondere für die Segmentierung ebener Flächen aus solchen Daten stehen zudem eine Reihe von Verfahren zur Verfügung (Hoover et al 1996). Die im Vergleich zu Bildern geringe räumliche Auflösung eines DOM resultiert jedoch häufig in einer zu geringen Genauigkeit und Detaillierung der daraus extrahierten Primitive. Die für eine bessere Bestimmung der Bruchkanten benötigte höhere Messpunktdichte ist jedoch bei flugzeuggestützten LIDAR-Systemen nur sehr aufwendig zu realisieren. Die in diesem Abschnitt vorgestellte kombinierten Segmentierung von Bild- und Höhendaten zielt deshalb auf eine genauere Lokalisierung der gesuchten Primitive durch die Nutzung der höheren Auflösung von Bilddaten. Durch die Kombination bleiben die Vorteile der Höhendaten, die sich aus der zielgerichteten Extraktion dreidimensionaler Primitive durch die Beschränkung auf geometrische Information ergeben, erhalten. Die kombinierte Segmentierung von Bild- und Höhendaten zur Gewinnung von 3D Primitiven für eine automatische Gebäuderekonstruktion wird im folgenden am Beispiel linearer räumliche Segmente (Abschnitt 3.3.1) und ebener Regionen diskutiert (Abschnitt 3.3.2).

3.3.1 Lineare räumliche Segmente

Eine Extraktion gerader Linien aus einem DOM kann durch die Adaption eines ursprünglich zur Linienextraktion aus Bildern entwickelten Verfahrens erfolgen (Haala 1996). In dem ursprünglichen Verfahren von (Burns et al 1986) werden innerhalb des Intensitätsbildes $I(x, y)$ Regionen gebildet, indem benachbarte Pixel ähnlicher Gradientenrichtung

$$\varphi_G = \arctan\left(\frac{\partial I}{\partial y} / \frac{\partial I}{\partial x}\right) \quad (3.1)$$

zusammengefasst werden. Diese Regionen ähnlicher Gradientenrichtung definieren Rampen im Intensitätsgebirge $I(x, y)$. Nach der Regionenbildung wird die Rampe durch eine ausgleichende Ebene approximiert. Dazu wird durch eine Kleinste-Quadrate-Schätzung diejenige Ebene bestimmt, für die der senkrechte Abstand aller Punkte der segmentierten Region zum Minimum wird. Das Gewicht p_i jedes Punktes $P_i = (x_i \ y_i \ I_i(x_i, y_i))^T$ ergibt sich dabei aus dem Gradientenbetrag

$$p = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2}$$

Dadurch werden Bildpunkte mit starker Intensitätsänderung bei der Bestimmung der Ebenenparameter stärker berücksichtigt, als Punkte am Rand des segmentierten Gebiets, bei denen der Gradient häufig sehr klein ist. Anschließend wird diese die Grauertrampe approximierende Ebene mit einer zweiten, horizontalen Ebene geschnitten um so die gesuchten geraden Grauwertkanten zu extrahieren. Die vertikale Komponente der horizontalen Ebene ergibt sich dabei aus der mittleren Intensität der segmentierten Region.

Soll das Verfahren für die Extraktion von DOM-Buchkanten eingesetzt werden, so ist eine Modifikation notwendig, die eine Detektion von Bereichen maximaler Krümmung erlaubt. In diesem Fall wird nicht mehr wie bei der Extraktion von Grauwertkanten nach Maxima der ersten Ableitung, sondern nach den Maxima der zweiten Ableitung gesucht. Der ursprüngliche Algorithmus wird deshalb so modifiziert, dass im ersten Schritt nicht mehr Regionen aus benachbarten Pixel gleicher Gradientenrichtung φ_G , sondern aus benachbarten Pixel gleicher Krümmungsrichtung φ_K gebildet werden. Die resultierenden Regionen definieren in diesem Fall nicht mehr Rampen im Intensitätsgebirge $I(x, y)$, sondern Flächen gleicher Neigungsänderung im DOM $Z(X, Y)$. Die Gradientenrichtung nach Gleichung (3.1) wird somit durch die Krümmungsrichtung

$$\varphi_K = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2 \frac{\partial Z}{\partial X} \frac{\partial Z}{\partial Y}}{\frac{\partial^2 Z}{\partial X^2} - \frac{\partial^2 Z}{\partial Y^2}}\right) \quad (3.2)$$

definiert. Zur Berechnung von φ_K wird wie bei der in Abschnitt 3.2.1 diskutierten morphologischen Filterung wiederum von einem DOM in Rasterform ausgegangen. Die in Gleichung (3.2) benötigten diskreten Ableitungen des DOM-Graphen $Z = f(X, Y)$ können damit durch Faltung mit den diskreten Ableitungsoperatoren $\mathbf{d}_x = [-1 \ 1]$, $\mathbf{d}_y = [-1 \ 1]^T$ bestimmt werden. Diese können ähnlich zu den bekannten Sobel-Masken zur Minderung der Rauschempfindlichkeit der ersten und zweiten Ableitung mit einer Mittelung $\mathbf{d}_0 = \frac{1}{2} [1 \ 1]$ verbunden werden. Damit ergeben sich die Operatoren

$$\frac{\partial Z}{\partial X} = \mathbf{D}_X = \mathbf{d}_X * \mathbf{d}_0^T * \mathbf{d}_0 * \mathbf{d}_o = \frac{1}{8} (-1 \ 1) * (1 \ 1) * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial Y} = \mathbf{D}_Y = \mathbf{d}_Y * \mathbf{d}_0^T * \mathbf{d}_0 * \mathbf{d}_o = \frac{1}{8} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} * (1 \ 1) * (1 \ 1) = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial X} \frac{\partial Z}{\partial Y} = \mathbf{D}_{XY} = \mathbf{d}_X * \mathbf{d}_0 * \mathbf{d}_Y * \mathbf{d}_o^T = \frac{1}{4} (-1 \ 1) * (1 \ 1) * \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial X^2} = \mathbf{D}_{XX} = \mathbf{d}_X * \mathbf{d}_X * \mathbf{d}_0^T * \mathbf{d}_o^T = \frac{1}{4} (-1 \ 1) * (-1 \ 1) * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 2 & -4 & 2 \\ 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial Y^2} = \mathbf{D}_{YY} = \mathbf{d}_Y * \mathbf{d}_Y * \mathbf{d}_0 * \mathbf{d}_o = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} * (1 \ 1) * (1 \ 1) = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ -2 & -4 & -2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Alternativ kann die Bestimmung der diskreten Ableitungen durch eine Kleinste-Quadrate-Schätzung lokaler bivariater Polynome mit einer anschließenden analytische Bestimmung der Ableitungen aus den Polynomkoeffizienten erfolgen (Haralick 1984). Dieser Ansatz ist für die Segmentierung von Distanzdaten gut geeignet (Besl 1988). Die Kleinste-Quadrate-Schätzung der partiellen Ableitungen wird in diesem Ansatz auf eine Faltung des DOM mit den separierbaren Masken

$$\begin{aligned} \mathbf{D}_x &= \mathbf{d}_0 * \mathbf{d}_1^T, & \mathbf{D}_y &= \mathbf{d}_1 * \mathbf{d}_0^T, \\ \mathbf{D}_{xx} &= \mathbf{d}_0 * \mathbf{d}_2^T, & \mathbf{D}_{yy} &= \mathbf{d}_2 * \mathbf{d}_0^T, & \mathbf{D}_{xy} &= \mathbf{d}_1 * \mathbf{d}_1^T, \end{aligned} \quad (3.8)$$

reduziert. Die Filtermasken $\mathbf{d}_0, \mathbf{d}_1, \mathbf{d}_2$ werden mit $u \in U = \{-M, -M+1, \dots, M\}$ basierend auf den normierten polynomiellen Basisfunktionen $b_i(u) = \phi_i(u)/P_i(M)$ mit

$$\phi_0(u) = 1, \quad \phi_1(u) = u, \quad \phi_2(u) = (u^2 - M(M+1))/3$$

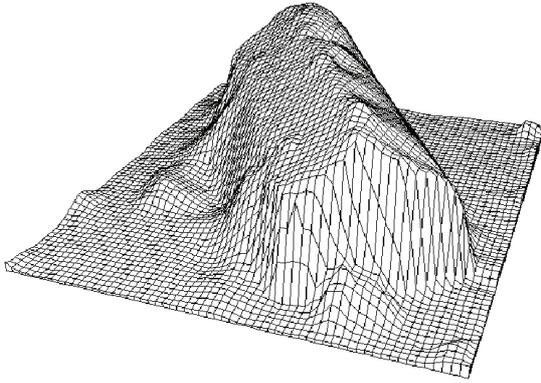
und den drei sich aus $P_i(M) = \sum_u \phi_i^2(u)$ ergebenden Normierungskonstanten

$$\begin{aligned} P_0(M) &= 2M+1, & P_1(M) &= \frac{2}{3}M^3 + M^2 + \frac{1}{3}M \\ P_2(M) &= \frac{8}{45}M^5 + \frac{4}{9}M^4 + \frac{2}{9}M^3 - \frac{1}{9}M^2 - \frac{1}{15}M \end{aligned}$$

abgeleitet. Für die Maskengröße $M = 5$ ergibt sich somit

$$\mathbf{d}_0 = \frac{1}{5} (1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)^T, \quad \mathbf{d}_1 = \frac{1}{10} (-2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2)^T, \quad \mathbf{d}_2 = \frac{1}{14} (2 \ -1 \ -2 \ -1 \ 2)^T \quad (3.9)$$

Nach der richtungsbasierten Segmentierung der ausgleichenden Ebene mit der Krümmungsrichtung φ_K werden die Geradenstücke wie bei dem ursprünglichen Verfahren nach (Burns et al 1986) durch Schnitt mit einer zweiten Ebene bestimmt. Im Gegensatz zu der durch den mittleren Grauwert definierten Horizontalebene bei der Extraktion von Grauwertkanten wird bei der Extraktion von Bruchkanten die horizontale Ebene durch die mittlere Höhenänderung innerhalb der zuvor segmentierten Region definiert.



a) Digitales Oberflächenmodell



b) Extrahierte Bruchkanten im zugehörigen Bildausschnitt

Abbildung 3-16: Extraktion von DOM-Bruchkanten.

Ein Beispiel für die Extraktion von Geradensegmenten durch die Suche nach DOM-Bruchkanten ist in Abbildung 3-16 dargestellt. Abbildung 3-16a zeigt eine 3D Darstellung des für die Linienextraktion genutzten DOM, in Abbildung 3-16b sind die durch Krümmungsanalyse gewonnenen Kanten zur besseren Darstellung als schwarze Liniensegmente in den zugehörigen Ausschnitt eines Luftbilds projiziert.



Abbildung 3-17: Gebäuderekonstruktion aus DOM-Bruchkanten.

In diesem Beispiel wurde die Extraktion der Gebäudekanten auf potentielle Gebäudebereiche beschränkt. Diese Bereiche wurden durch die in Abschnitt 3.2.1 vorgestellten morphologischen Filterverfahren aus dem DOM bestimmt.

Die so extrahierten dreidimensionalen Liniensegmente werden im weiteren Verlauf des Verfahrens zunächst zu Rechtecken gruppiert und anschließend zur Bestimmung eines parametrischen Gebäudemodells verwendet (Haala 1996). Die Parameter des Gebäudemodells werden dabei mittels einer Kleinste-Quadrate-Schätzung bestimmt, die den Abstand der segmentierten Linien zu den zugehörigen zu rekonstruierenden Modelllinien minimiert. Das Ergebnis der so gewonnenen vollautomatischen Gebäuderekonstruktion aus DOM-Bruchkanten zeigt Abbildung 3-17. Zur Visualisierung wurden die Drahtmodelle der rekonstruierten Gebäude als weiße Polygone und die zur Rekonstruktion verwendeten DOM-

Bruchkanten als schwarze Linien in den zugehörigen Luftbildausschnitt projiziert. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Qualität der DOM Bruchkanten für eine automatische Rekonstruktion der Gebäude ausreichend ist. Die in Abbildung 3-17 dargestellten Resultate zeigen jedoch auch Abweichungen zwischen den rekonstruierten Drahtmodellen und den zugehörigen Dachkanten im Luftbild. Die Abweichungen zwischen Bild, extrahierten Bruchkanten und rekonstruiertem Drahtmodell sind somit auf die geringe Genauigkeit der verwendeten Objektkoordinaten zurückzuführen. Ein

Grund für die relativ großen Fehler der extrahierten DOM-Bruchkanten ist die dabei die geringe Auflösung des DOM von 0.5m.

Trotz der geringeren geometrischen Genauigkeit bietet die Gebäuderekonstruktion aus Bruchkanten jedoch auch erhebliche Vorteile gegenüber einer Rekonstruktion aus Grauwertkanten. Während DOM-Kanten immer auf Änderungen der Oberflächengeometrie zurückzuführen sind, werden Grauwertkanten noch durch viele andere Effekte wie Änderung der Beleuchtung oder Unterschiede im Oberflächenmaterial hervorgerufen. Durch die a priori Beschränkung auf geometrische Information sind deshalb DOM bei einer geometrisch orientierten Aufgabenstellung wie der automatischen Gebäuderekonstruktion einfacher zu interpretieren. Auf der anderen Seite sind aus Luftbildern extrahierte Grauwertkanten aufgrund der hohen Bildauflösung in der Regel exakt zu lokalisieren und liefern deshalb auch genauere Rekonstruktionsergebnisse. Um die Vorteile beider Datenquellen – einfachere Interpretierbarkeit des DOM durch die Beschränkung auf geometrische Information beziehungsweise hohe Auflösung und große geometrische Qualität im Fall von Luftbildern – zu nutzen wird eine bildgestützte Verbesserung des Rekonstruktionsergebnisses durchgeführt. Durch die Nutzung des bereits aus dem DOM rekonstruierten Gebäudes wird in diesem Fall die Interpretation des Bildes erheblich vereinfacht.



Abbildung 3-18: Stereobildpaar mit extrahierten Grauwertkanten.



a) näherungsweise Rekonstruktion aus DOM-Kanten



b) verbesserte Rekonstruktion aus Grauwertkanten

Abbildung 3-19: Verbesserung der Rekonstruktion durch dreidimensional bestimmte Grauwertkanten.

Für die bildbasierte Verbesserung der Rekonstruktion werden zunächst aus dem verfügbaren Stereobildpaar Geraden-segmente extrahiert und anschließend über eine Stereozuordnung dreidimensional bestimmt. Das Ergebnis dieser Geradenextraktion ist in Abbildung 3-18 dargestellt. Die Extraktion der Geradensegmente wurde wiederum auf potentielle Gebäuderegionen beschränkt, die durch lokale Maxima des DOM definiert sind. Diese Regionen sind in Abbildung 3-18 durch weiße Umringspolygone repräsentiert. Die aus dem Stereobildpaar extrahierten geraden Grauwertkanten werden anschließend durch eine Stereozuordnung dreidimensional bestimmt, wobei das DOM zur Näherungswertbeschaffung verwendet wird. Die resultierenden dreidimensionalen linearen Segmente sind in Abbildung 3-18 als schwarze Linien dargestellt.

Abbildung 3-19 zeigt exemplarisch die Verbesserung der geometrischen Rekonstruktion eines Gebäudes durch die Verwendung solcher dreidimensional bestimmten Grauwertkanten. Die näherungsweise Rekonstruktion aus DOM-Bruchkanten ist in Abbildung 3-19a dargestellt. Analog zu Abbildung 3-17 wurden dem zugehörigen Bildausschnitt die verwendeten Bruchkanten als schwarze Linien und das Drahtmodell des Gebäudes als weiße Linien überlagert. Abbildung 3-19b zeigt das Drahtmodell des aus Grauwertkanten rekonstruierten Gebäudes, dessen Dachkanten exakt mit dem zugehörigen Luftbildausschnitt übereinstimmen. Für die Vorauswahl der schwarz dargestellten dreidimensional bestimmten Grauwertkanten wurde die näherungsweise Rekonstruktion aus den DOM-Kanten verwendet. Dadurch konnte durch die Nutzung von Bildinformation eine Genauigkeitssteigerung erreicht werden, ohne dass bei der Suche nach geeigneten Grauwertkanten ein zu großer Lösungsraum entsteht.

Bei dem in diesem Abschnitt vorgestellten Beispiel erfolgt die Segmentierung der zur Objektrekonstruktion genutzten linearen Segmente getrennt sowohl im DOM als auch im Stereoluftbild. Die Integration beider Datenquellen erfolgt auf einer symbolischen Ebene, in dem die Rekonstruktion aus DOM-Daten Näherungswerte für die anschließende Verbesserung aus Bildinformation liefert. Demgegenüber wird im nächsten Abschnitt am Beispiel der Segmentierung von Ebenen eine Fusion von Bild- und Höhendaten auf einer merkmalsbasierten Ebene vorgestellt. Das Ziel des Verfahrens ist wiederum die automatische Erfassung eines dreidimensionalen Gebäudemodells.

3.3.2 Segmentierung von Ebenen

Für die automatische Erfassung eines Gebäudepolyeders können neben linearen 3D Kanten, d.h. potentielle Dachbruchkanten auch ebene 3D Regionen, d.h. ebene Dachflächen verwendet werden. Für die Segmentierung dieser 3D Primitive werden auch in diesem Beispiel Stereoluftbilder eingesetzt, aus denen in einem ersten Schritt durch eine automatische Stereobildzuordnung ein DOM abgeleitet wird. Durch die morphologische Filterung des DOM lässt sich die Segmentierung ebener 3D Flächen wiederum auf solche Bereiche beschränken, in denen ein Gebäude zu erwarten ist. Im Gegensatz zu dem in 3.3.1 beschriebenen Verfahren wird in diesem Beispiel eine gemeinsame Segmentierung der Bild- und Höhendaten durchgeführt, es findet damit eine Fusion auf merkmalsbasierter Ebene statt. Für die Segmentierung der Ebenen wird zunächst innerhalb von potentiellen Gebäuderegionen eine Segmentierung des Luftbildes durch ein Bereichswachstumsverfahren durchgeführt (Fritsch & Ameri 1998).



a) Potentielle 2D Dachflächen aus Bildsegmentierung



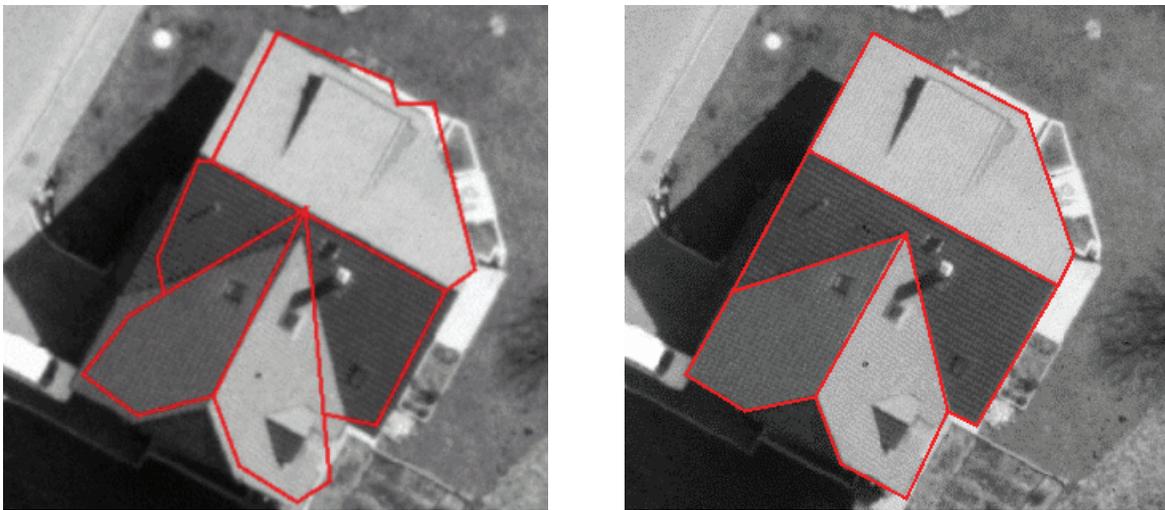
b) DOM mit 3D Flächen im Objektraum

Abbildung 3-20: Kombinierte Segmentierung potentieller Dachflächen aus Bild- und Höhendaten.

Abbildung 3-20a zeigt, dass aufgrund der vergleichsweise hohen Auflösung der verfügbaren Luftbilder und der deutlichen Abbildung der Objektgrenzen eine vergleichsweise gute Qualität für die Extraktion von Regionen möglich ist. Um aus den segmentierten 2D Bildflächen die in Abbildung 3-20b dargestellten dreidimensionalen Primitive zu erhalten, werden die Bildelemente zunächst mittels der Kollinearitätsgleichung auf die DOM-Oberfläche projiziert (Ameri 2000). Dies ist über die bekannte äußere Orientierung der Luftbilder einfach möglich. Die Ebenenparameter der jeweiligen Regionen R_j werden anschließend durch eine robuste Schätzung aus den darin enthaltenen DOM-Rasterpunkten $P_i(X_i, Y_i, Z_i(X_i, Y_i))^T$ bestimmt. Da das DOM, wie bereits diskutiert in einer 2.5-dimensionalen Repräsentation vorliegt, kann hierfür die explizite Ebenengleichung

$$Z = AX + BY + D$$

verwendet werden. Durch die Ausgleichung werden damit die unbekannten Ebenenparameter A_j, B_j, C_j ausgehend von dem funktionalen Modell $Z_i + v_i = AZ_i + BY_i + D$ bestimmt. Mit der in Abbildung 3-20 dargestellten kombinierten Segmentierung wird somit die räumliche Ausdehnung der potentiellen Dachflächen durch die Analyse des Bildes bestimmt, während sich die Lage dieser Ebenen im Objektraum durch die Analyse des DOM ergibt.



a) Gebäudemodell aus Verschneidung der 3D Flächen. b) Verbesserung durch Einpassung der Grauwertkanten

Abbildung 3-21: Bildbasierte Verbesserung der Gebäuderekonstruktion.

Im weiteren Verlauf des Verfahrens wird ausgehend von den so segmentierten 3D-Flächen eine Randflächenbeschreibung des Gebäudedaches in Form eines allgemeinen Polyeders abgeleitet. Dazu werden die topologischen Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den extrahierten Regionen bestimmt und die benachbarten Flächen miteinander verschritten (Ameri 2000). Abbildung 3-21a zeigt das so erhaltene polyedrische Gebäudemodell nach der Projektion in den zugehörige Luftbildausschnitt. Die Differenzen zwischen den durch die Schnittlinien der Ebenen definierten Dachkanten und den zugehörigen Grauwertkanten im Bild ergeben sich dabei aus der unzureichenden Qualität der verwendeten Ebenen. Diese Unzulänglichkeit resultiert aus der im Vergleich zu den Luftbildern geringeren Auflösung und geometrischen Genauigkeit des DOM, auf dem die Schätzung der Ebenenparameter basiert. Wie Abbildung 3-21 zeigt, ist jedoch eine bildbasierte Verbesserung der Gebäuderekonstruktion möglich. Dabei wird die Form des Gebäudedaches im Rahmen einer Ausgleichung neu geschätzt, in dem der Abstand zwischen den Linien des Gebäudepolyeders und den zugehörigen Grauwertkanten minimiert wird. Eine zusätzliche Steigerung der Genauigkeit wird dadurch erreicht, dass in diesem Schritt die Grauwertkanten mehrerer Bilder verwendet werden können. Da aus der Verschneidung der 3D-Flächen bereits eine näherungsweise Rekonstruktion zur Verfügung steht, ist die Zuordnung der Grauwertkanten zu den zugehörigen Linien der Dachstruktur einfach möglich. Die Einpassung der Modellkanten in die verfügbaren Luftbilder stellt damit wie das in Abschnitt 3.3.1 beschriebene Verfahren wiederum eine Fusion von Bild- und Höhendaten auf symbolischer Ebene dar.



Abbildung 3-22: Ergebnis der automatischen 3D Gebäuderekonstruktion.

Die mit dem vorgestellten Verfahren rekonstruierten Gebäude des Testgebiets sind in Abbildung 3-22 dargestellt. Dieses Beispiel zeigt, ebenso wie das Ergebnis der Erfassung aus linearen räumlichen Segmenten in Abbildung 3-17, dass basierend auf der Kombination von DOM und Bilddaten eine vollautomatische Rekonstruktion relativ einfacher, freistehender Gebäude möglich ist. Eine automatische Erfassung sehr komplexer Bereiche, wie sie in Innenstädten mit dichter Bebauung anzutreffen sind ist mit solchen Verfahren jedoch nur sehr eingeschränkt möglich. Ein Grundproblem ist dabei die kaum noch zu beherrschende Größe des Suchraums während des Aufbaus der topologischen Beziehungen zwischen den extrahierten Primitiven. Eine Vereinfachung und damit Lösung dieses Problems lässt sich jedoch erreichen, wenn in den automatischen Prozess zusätzliche Information über die Struktur der jeweiligen Gebäude integriert wird. Dies kann durch die Kombination von Höhendaten mit Gebäudegrundrissen erfolgen, so dass in diesem Fall einer automatische Erfassung von 3D Stadtmodellen möglich ist.

4 Kombination von 2D GIS und Höhendaten zur Erfassung von 3D Stadtmodellen

Photogrammetrisch erfasste 3D Stadtmodelle haben sich in den letzten Jahren zu einer Datenquelle von zunehmender Bedeutung entwickelt. Flächendeckend wurden 3D Stadtmodelle, die neben einem DGM eine dreidimensionale Beschreibung von Gebäuden als wichtigsten Bestandteil enthalten, erstmals für die Planung von Sendeanlagen für Mobilfunkanlagen eingesetzt. Mittlerweile liegt der Schwerpunkt der Anwendungen bei Visualisierungen von Planungsprozessen. Zudem werden derzeit auch durch Stadtinformationssysteme und Navigationsanwendungen weitere Einsatzbereiche erschlossen. Aufgrund der stark wachsenden Nachfrage nach virtuellen 3D Stadt- und Landschaftsmodellen ist die Entwicklung von Werkzeugen zur kostengünstigen und schnellen Erfassung solcher Daten mittlerweile ein wichtiger Aufgabenbereich photogrammetrischer Forschungsarbeiten.

In diesem Kapitel soll das Potential der Kombination von dichten Digitalen Oberflächenmodellen und Gebäudeumrissen aus existierenden 2D GIS-Daten für die automatische Erfassung von 3D Stadtmodellen aufgezeigt werden. Zunächst werden in Abschnitt 4.1 die bei der automatischen Erfassung von 3D Gebäudemodellen auftretenden spezifischen Schwierigkeiten, die bisher die Entwicklung von vollautomatischen Verfahren verhindern, diskutiert. Eine Möglichkeit zur Überwindung dieser Probleme ist die Integration zusätzlicher Information. Existierende GIS-Daten wie vorhandene Grundrisse sind das Ergebnis einer bereits erfolgten Interpretation. Aus diesem Grund beinhalten sie sehr wertvolle Zusatzinformation für die Stützung einer automatisierten Gebäuderekonstruktion. In Abschnitt 4.2 wird zunächst aufgezeigt, wie durch die Verwendung von Gebäudegrundrissen die Segmentierung von Höhendaten unterstützt werden kann (Haala & Brenner 1998). Dadurch ist eine Extraktion hochwertiger geometrischer Primitive für die anschließende Gebäuderekonstruktion möglich. Im Rahmen einer Gebäuderekonstruktion kann zudem topologische Information genutzt werden, die ebenfalls aus den Grundrissen abgeleitet wird. Eine solche grundrissgestützte Erzeugung von Gebäudetopologien wird exemplarisch in Abschnitt 4.3 diskutiert. Die dabei vorgestellten Verfahren sind die Dachausmittlung (Haala & Brenner 1998) sowie die grundrissbasierte Zerlegung der Gebäude in einfache Grundelemente (Haala & Brenner 1999b). Neben der dadurch möglichen geometrischen Rekonstruktion der Gebäude muss vor allem für Visualisierungsanwendungen Bildtextur auf die erfassten Fassaden und Dachflächen aufgebracht werden. Der Prozess der Texturierung und die sich aus den unterschiedlichen Anwendungen ergebenden Anforderungen an die Qualität der verwendeten Bilddatenquellen wird in Abschnitt 4.4 diskutiert.

4.1 Erfassung von 3D Gebäudemodellen

Die dreidimensionale Erfassung von Gebäuden ist im Prinzip mit Luftbildern als alleiniger Datenquelle gut möglich. Ein menschlicher Operateur kann relativ problemlos Gebäude aus einem Stereobildpaar extrahieren und dreidimensional rekonstruieren. Die Automatisierung dieses Prozesses ist jedoch aufgrund der großen Komplexität von Bildern speziell in dicht bebauten Gebieten sehr schwierig. Die auszuwertenden Grau- beziehungsweise Farbwerte der Luftbilder stellen die Geometrie der aufgenommenen Objekte dar, sie hängen jedoch auch von einer Vielzahl weiterer Faktoren wie Beleuchtung, Oberflächenmaterial oder Textur ab. Neben den unterschiedlichen Faktoren, die einen Grauwert beeinflussen, erschwert zudem die große Menge der in Luftbildern enthaltenen Information die für eine automatische Bildinterpretation notwendige Trennung wichtiger Information von unwichtigen Details.

Wie bereits in Kapitel 3 aufgezeigt, kann eine Automatisierung der thematischen Auswertung von Luftbildern in bebauten Gebieten durch die Kombination mit Höhendaten erheblich vereinfacht werden. Am Beispiel der bildgestützten Segmentierung Digitaler Oberflächenmodelle in Abschnitt 3.3 wurde bereits das Potential der automatischen Gebäuderekonstruktion aus extrahierten Bruchkanten oder ebene Regionen aufgezeigt. Die in Abschnitt 3.3 dokumentierten Beispiele zeigen aber auch, dass die mit solchen automatischen Verfahren erreichbare Stabilität und Zuverlässigkeit der Objektrekonstruktion nur dann ausreicht, wenn die Komplexität der Szene durch Verdeckungen, Schatten oder kleinere Strukturen nicht zu hoch wird. Dies ist in der Regel nur in relativ locker bebauten Gebieten mit einzelnen Gebäuden der Fall. Die Verfügbarkeit vollautomatischer Verfahren zur flächendeckenden Erfassung von Gebäuden auch für erheblich komplexere Bereiche von Innenstädten ist deshalb zumindest mittelfristig nicht zu erwarten. Aus diesem Grund konzentrierte sich die Entwicklung verstärkt auf semi-automatische Verfahren, die automatische Module für die Erfassung von 3D Gebäudemodellen mit manuellen oder halbautomatische Komponenten für die Vor- oder Nachbearbeitung kombinieren. So wird bei diesen semi-automatischen Verfahren durch die Bereitstellung geeigneter Schnittstellen die Fähigkeit des menschlichen visuellen Systems zur Interpretation auch komplexer Szenen direkt in

den Auswerteprozess eingebracht. Dies ermöglicht die erfolgreiche Rekonstruktion aller in einem Gebiet vorhandenen Gebäude, so dass nach dem derzeitigen Stand der Technik die Erfassung von Gebäudegeometrie, Geländeoberfläche und Oberflächentextur auch im Rahmen größerer Projekte möglich ist. Dies zeigt sich auch durch die Tatsache, dass einige dieser Verfahren bereits kommerziell erhältlich sind beziehungsweise kurz vor der Kommerzialisierung stehen (Grün & Wang 2001) (Gülch & Müller 2001) (Hau 2001) (Wolf 1999) (Brenner 1999).

Üblicherweise werden Gebäude in einem 3D Stadtmodell durch Polyeder repräsentiert. In diesem Fall werden alle zu erfassenden Gebäude durch ebene Flächen und gerade Kanten sowie deren topologische Beziehungen dargestellt. Damit ist eine Unterteilung des Prozesses der Gebäuderekonstruktion in die Erfassung von dreidimensionalen geometrischen Primitiven wie Punkten, Linien oder Flächen und deren anschließende Strukturierung möglich. Die Erfassung der 3D Primitive erfolgt beispielsweise aus Stereoluftbildern mittels manueller oder halb-automatischer Messungen. Alternativ können wie bereits in Abschnitt 3.3 demonstriert, die benötigten Primitive auch durch eine kombinierte Segmentierung von Bild- und Höhendaten extrahiert werden. In einem weiteren Schritt werden dann Topologien zwischen den erfassten 3D Primitiven aufgebaut, um durch diese Strukturierung zu einer CAD-konformen Objektbeschreibung zu gelangen. Interaktive beziehungsweise semi-automatische Verfahren zur Gebäuderekonstruktion kombinieren häufig Extraktion und topologische Strukturierung der verwendeten Primitive. So werden beispielsweise 3D Punkte über die Reihenfolge der Erfassung oder eine Zuordnung zu Layern in strukturierter Form durch einen Operateur erfasst, um in einem anschließenden Schritt automatisch eine Randflächenbeschreibung des zu erfassenden Gebäudes abzuleiten (Grün & Wang 1998). Neben der direkten Erfassung einer Randflächendarstellung (Boundary Representation, BRep) ist alternativ die semi-automatische Rekonstruktion der Gebäude durch eine Menge höherwertiger Grundelemente möglich (Gülch et al 1999) (Gülch & Müller 2001) (Hau 2001) (Rottensteiner 2001). Für komplexe Gebäude werden dabei die Grundkörper mit Bool'schen Operatoren wie Vereinigung, Schnitt und Subtraktion kombiniert und durch sogenannte CSG-Bäume (Constructive Solid Geometry) beschrieben. Da diese Grundelemente aus einfach parametrisierbaren Körpern mit vorgegebener Form bestehen, ist die topologische Struktur der darin enthaltenen Punkte, Linien und Flächen bereits implizit vorgegeben. Während der Datenerfassung wählt ein Operateur jeweils passende Gebäudegrundkörper aus und passt sie näherungsweise in ein Luftbild ein. Die exakte Zuordnung des Modells zu den zugehörigen Grauwertkanten im Rahmen einer Parameterschätzung erfolgt dann in einem automatischen Schritt des Verfahrens.

Alternativ zu einer direkten Eingabe menschlichen Vorwissens über semi-automatische Schnittstellen ist die Bereitstellung dieser Art von Information zumindest teilweise auch indirekt durch die Nutzung existierender Gebäudegrundrisse möglich. Die hierfür genutzten Grundrisse werden durch einen Operateur erfasst und sind damit das Produkt menschlicher Interpretation. Durch die Verfügbarkeit des in den Grundrissen implizit enthaltenen menschlichen Wissens ist somit auch die Rekonstruktion komplexer Gebäude möglich, ohne dass eine unmittelbare Interaktion notwendig wäre. Ein großer Vorteil besteht darin, dass digitalisierte Gebäudegrundrisse, wie sie für die in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren benötigt werden, in den meisten Industriestaaten bereits zur Verfügung stehen und deshalb nicht mehr gesondert erfasst werden müssen. Ein Beispiel ist die in Deutschland nahezu flächendeckend vorhandene Automatisierte Liegenschaftskarte ALK, die unter anderem Umringbegrenzungen von Gebäuden enthält.

Die in diesem Kapitel diskutierten Ansätze zur Nutzung existierender 2D Grundrisse nehmen eine Sonderstellung bezüglich der begrifflichen Unterteilung in halbautomatische und vollautomatische Verfahren der 3D Gebäuderekonstruktion ein. Da die Grundrisse durch einen menschlichen Operateur erfasste Information beinhalten, müssen darauf aufbauende Verfahren streng genommen als halbautomatisch bezeichnet werden. Die in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren zur Ableitung der 3D Stadtmodelle arbeiten jedoch ohne weiteren Eingriff von außen, so dass diese Ansätze im weiteren Verlauf der Arbeit als vollautomatisch definiert werden. Eine bei Bedarf daran anschließende interaktive Kontrolle und Korrektur der Gebäuderekonstruktion wird demgegenüber als halbautomatischer Verfahrensschritt bezeichnet.

Im Prinzip können auch ausschließlich auf der Basis vorhandener 2D-GIS-Daten dreidimensionale Gebäude konstruiert werden (Anders 1997) (Schilcher et al 1999). Die Bildung von 3D Hypothesen ist dabei beispielsweise über eventuell bekannte Attribute wie die Zahl der Stockwerke eines Gebäudes möglich. Die tatsächliche dreidimensionale Gebäudeform lässt sich jedoch nur durch die Verwendung zusätzlicher Höheninformation bestimmen. In den in diesem Kapitel vorgestellten Verfahren werden zu diesem Zweck dichte, in der Regel durch flugzeuggetragenes Laserscanning erfasste Digitale Oberflächenmodelle verwendet. Ein wichtiger Vorverarbeitungsschritt ist dabei die Segmentierung des DOM, wobei auch dieser Prozess durch die Verwendung von Grundrissen gestützt werden kann.

4.2 Grundrissbasierte DOM-Segmentierung

Das Ziel der in diesem Abschnitt vorgestellten Segmentierungsverfahren ist die Extraktion ebener Regionen, die potentielle Dachflächen repräsentieren. Wie bereits in Abschnitt 3.3.2 diskutiert, liegt ein generelles Problem bei der Segmentierung von Dachflächen aus Bilddaten in einer potentiellen Übersegmentierung, die sich durch unterschiedliche Materialeigenschaften, Beleuchtung oder Schatten ergeben kann. Vor allem für komplexe Gebiete werden deshalb häufig sehr viele fehlerhafte Regionen extrahiert, die den anschließenden automatischen Aufbau topologischer Beziehungen im Rahmen der Gebäuderekonstruktion erschweren oder sogar unmöglich machen. Eine bereits diskutierte Möglichkeit zur Umgehung dieses Problems ist Beschränkung auf rein geometrische Information während der Merkmalsextraktion durch die Nutzung eines DOM. Allerdings wird die Segmentierung solcher Daten häufig durch die mangelnde Qualität und zu geringe räumliche Auflösung der verfügbaren DOM erschwert. Während in Abschnitt 3.3 die Probleme der Segmentierung von DOM durch eine gemeinsame Prozessierung mit Bilddaten zumindest teilweise gelöst wurden, nutzen die in diesem Abschnitt vorgestellten Verfahren Grundrissinformation für die Stützung und damit Verbesserung der Segmentierung. Dadurch ist auch auf der Basis eines DOM mit relativ geringer Qualität und Auflösung die Extraktion sehr hochwertiger 3D Primitive möglich.

Eine triviale Einsatzmöglichkeit von Grundrissen ist die Beschränkung der Segmentierung auf den dadurch definierten Gebäudebereich. Die so vorgegebenen Gebäudegrundflächen sind in der Regel deutlich genauer als das Ergebnis eine Gebäudelokalisierung durch morphologische Filterung des DOM nach dem in Abschnitt 3.2.1 vorgestellten Verfahren. Von noch größerer Bedeutung für die Stützung der Extraktion ebener (Dach)flächen aus dem DOM ist jedoch Richtungsinformation, die aus den vorhandenen Grundrissdaten abgeleitet werden kann. Die Nutzung dieser Neigungsrichtungsinformation ist dabei sowohl durch die in Abschnitt 4.2.1 beschriebene neigungsbasierte Segmentierung als auch durch die in Abschnitt 4.2.2 vorgestellte Auswahl und Zusammenfassung extrahierter Regionen möglich.

4.2.1 Neigungsbasierte Segmentierung

Bei der neigungsbasierten Segmentierung werden unter Verwendung der vorhandenen Grundrissinformation ebene Regionen durch die Zusammenfassung benachbarter, kompatibler DOM-Rasterelemente gebildet (Haala & Brenner 1998). Als Homogenitätskriterium für die Regionenbildung wird dabei die Neigungsrichtung der einzelnen DOM-Rasterpunkte verwendet. Zur Berechnung dient jeweils der zugehörige Normalenvektor \mathbf{N} .

Wird die Orientierung des Normalenvektors \mathbf{N} in Richtung der Z-Achse gewählt, so ergibt sich für das DOM der Form $Z = f(X, Y)$ jeweils

$$\mathbf{N} = \frac{1}{\sqrt{(\partial Z/\partial X)^2 + (\partial Z/\partial Y)^2 + 1}} \begin{pmatrix} -\partial Z/\partial X \\ -\partial Z/\partial Y \\ 1 \end{pmatrix}.$$

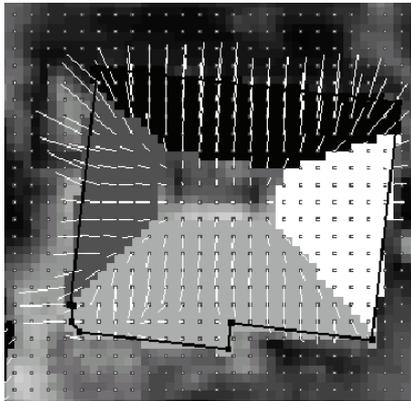
Die gesuchte Neigungsrichtung φ der einzelnen Punkte entspricht dann dem Richtungswinkel der Projektion des Normalenvektors \mathbf{N} und ergibt sich damit zu

$$\varphi = \arctan \left(\frac{-\partial Z/\partial Y}{-\partial Z/\partial X} \right). \quad (4.1)$$

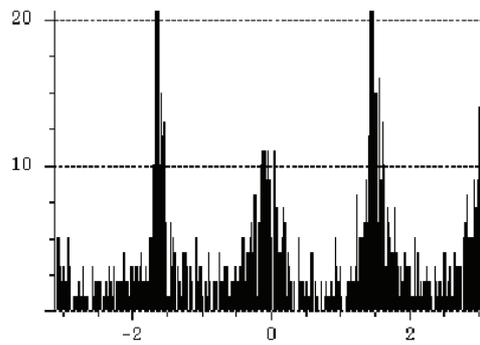
Liegt das DOM in Form eines Rasters vor, so können die zur Berechnung des Normalenvektors benötigten Gradienten $\partial Z/\partial X$ und $\partial Z/\partial Y$ analog zur Extraktion linearer räumlicher Segmente in Abschnitt 3.3.1 über diskrete Faltungsoperatoren nach Gleichung (3.3) und (3.4) beziehungsweise Gleichung (3.8) und (3.9) bestimmt werden.

Die Extraktion potentieller Dachflächen durch die neigungsbasierte Segmentierung ist exemplarisch in Abbildung 4-1 dargestellt. Abbildung 4-1a zeigt den Ausschnitt eines Orthophotos mit einem durch die schwarze Polygonlinie dargestellten Grundriss des Gebäudes. Zunächst wird für jedes DOM-Rasterelement der in die Horizontalebene projizierte Normalenvektor berechnet, dessen Betrag und Richtung durch die dünnen weißen Linien repräsentiert wird. Durch das Zusammenfassen von DOM-Rasterelementen ähnlicher Neigungsrichtungen nach Gleichung (4.1) bilden sich ebene Regionen. Diese sind in Abbildung 4-1a durch Flächen gleichen Grauwerts dargestellt. Abbildung 4-1b zeigt das

Histogramm der berechneten Flächennormalen für den in Abbildung 4-1a dargestellten Bereich. Für die Berechnung des Histogramms wurde die Häufigkeit der Neigungsrichtungen φ durch die Summation über alle DOM-Rasterelemente innerhalb des Gebäudegrundrisses gebildet. In Abbildung 4-1b sind für die Verteilung $\varphi \in [-\pi, \pi]$ deutlich vier Maxima zu erkennen. Diese Maxima legen Clusterzentren fest, so dass DOM-Rasterelemente mit zu diesen Richtungen kompatiblen Neigungsrichtungen jeweils zu Regionen zusammengefasst werden können. Als Kompatibilitätskriterium kann beispielsweise der Wertebereich zwischen den das Maximum umgebenden Minima definiert werden.



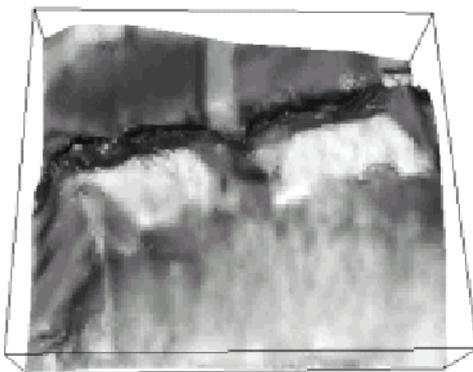
a) Neigungsvektoren und segmentierte Regionen



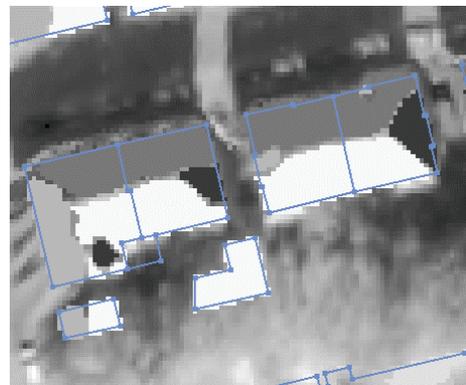
b) Histogramm der Neigungsrichtungen

Abbildung 4-1. Richtungsbasierte Segmentierung ebener Flächen.

Während für das in Abbildung 4-1 dargestellte Beispiel die Maxima und Minima der Verteilungsfunktion noch relativ klar definiert sind, wird vor allem bei geringerer DOM-Qualität und komplexen Dachflächen mit noch mehr verschiedenen Neigungsrichtungen die Festlegung der Clustergrenzen zunehmend problematischer. Die grundrissgestützte, richtungsbasierte Segmentierung nutzt deshalb zur Bestimmung der gesuchten Clustergrenzen die Tatsache, dass mögliche Neigungsrichtungen der Dachflächen durch den gegebenen Umriss des Gebäudes vorbestimmt sind.



a) 3D Ansicht des segmentierten DOM.



b) Segmentierte Flächen und Gebäudegrundriss

Abbildung 4-2: Neigungs-basierte Segmentierung eines DOM aus Stereobildzuordnung.

Die Neigungsrichtung φ einer ebenen Dachfläche ist immer senkrecht zu der Orientierung α der zugehörigen Trauflinie. Die Normalenrichtung $\alpha - 90^\circ$ der zur Trauflinie parallelen Grundrisskante gibt somit unmittelbar jeweils das Zentrum eines Clusters vor. Die aus dem Grundrisspolygon bekannten Orientierungen der Trauflinien können so als Vorinformation für die Segmentierung verwendet werden. Zur Bildung der Regionen in Abbildung 4-1a wurden deshalb diejenigen benachbarten DOM-Punkten zusammengefasst, die jeweils kompatibel zu einer durch eine Grundrisskante vorgegebene Richtung sind. Wird eine maximale Richtungsabweichung ε vorgegeben, so kann diese Kompatibilität für jedes DOM-Element durch das Skalarprodukt

$$\frac{1}{\sqrt{(\partial Z / \partial Y)^2 + (\partial Z / \partial X)^2}} \left\langle \begin{pmatrix} -\partial Z / \partial X \\ -\partial Z / \partial Y \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} g_x \\ g_y \end{pmatrix} \right\rangle > \cos(90^\circ - \varepsilon) \quad (4.2)$$

berechnet werden. Dabei jeweils der in die Ebene projizierten Normalenvektor $\mathbf{N} = \left(-\frac{\partial Z}{\partial X} \quad -\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)^T$ des DOM-Elements sowie der Normalenvektor $\mathbf{G} = (g_x \quad g_y)^T$ des jeweiligen Grundrisssegments verwendet. Da durch die Analyse des Grundrisses eine zuverlässige und stabile Festlegung der Clusterzentren möglich ist, können auch wie in Abbildung 4-2 dargestellt, mit qualitativ relativ schlechten DOM aus Stereobildzuordnung potentielle Dachregionen extrahiert werden.

4.2.2 Auswahl und Zusammenfassung ebener Regionen

Eine sinnvolle Segmentierung von qualitativ relativ schlechten DOM-Daten wird in manchen Fällen erst durch die Nutzung von Vorwissen aus der Analyse von Gebäudegrundrissen möglich. Bei der Bearbeitung hochwertiger DOM können jedoch die aus dieser Analyse entstehenden Vorgaben bereits zu unnötig starken Restriktionen führen. In diesem Fall ist es günstiger, zunächst eine rein DOM-basierte Segmentierung durchzuführen. Durch die Interpretation des Grundrisses können dann optional in einem zweiten Schritt zusammengehörige Regionen kombiniert und fehlerhafte Primitive eliminiert werden (Brenner 2000b). Analog zu dem in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Verfahren gilt auch bei diesem Ansatz die Annahme, dass die Neigung von Dachflächen senkrecht zu den zugehörigen Grundkanten des Dachpolygons ist. In dem zweistufigen Verfahren werden segmentierte Ebenen, die diesem vorgegebenen Modell nicht entsprechen lediglich markiert. Damit ist für die anschließende Rekonstruktion auch die Nutzung solcher unsicherer Primitive möglich. Auf diese Weise lassen sich zumindest potentiell auch Gebäudeteile erfassen, auf die im Grundriss keine Hinweise enthalten sind.

Zunächst wird eine regionenbasierte Segmentierung des DOM in ebene Regionen durch ein Bereichswachstumsverfahren durchgeführt. Nach diesem Ansatz werden ausgehend von einer Saatregion iterativ so lange Randpunkte zu der bearbeiteten Region hinzugefügt, bis eine Erweiterung ohne Verletzung eines zuvor definierten Homogenitätskriteriums nicht mehr möglich ist. Ein DOM-Rasterelement ist in diesem Fall homogen bezüglich einer ebenen Region, wenn der Abstand zwischen Ebene und Rasterelement unter einer vorgegebenen Schwelle liegt. Zur Berechnung kann die Differenz zwischen der Höhe $Z(X_i, Y_i)$ des DOM-Rasterpunkts und der zugehörigen Höhe $Z = AX_i + BY_i + D$ des Punktes auf der Ebene verwendet werden, die in diesem Fall in Hesse-Normalform parametrisiert ist. Mit dem vorgegebenen maximalen Abstand τ ergibt sich die Homogenitätsbedingung

$$\left|Z(X_i, Y_i) - (AX_i + BY_i + D)\right| < \tau. \quad (4.3)$$

Als zweites Homogenitätskriterium wird die Kompatibilität zwischen dem Normalenvektor \mathbf{N} des untersuchten DOM-Rasterelementes und dem Normalenvektor $\mathbf{E} = (E_x \quad E_y \quad E_z)^T$ der ebenen Region verwendet. In diesem Fall muss der Winkel zwischen den Vektoren unterhalb einer vorgegebenen Schwelle ε liegen. Für die Berechnung wird das Skalarprodukt

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)^2 + 1}} \left\langle \begin{pmatrix} -\frac{\partial Z}{\partial X} \\ -\frac{\partial Z}{\partial Y} \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \right\rangle < \cos \varepsilon \quad (4.4)$$

verwendet.

Abbildung 4-3b und Abbildung 4-4b zeigen zwei Beispiele für die Extraktion ebener Regionen durch dieses Bereichswachstumsverfahren. Hierfür wurden DOM-Rasterelemente auf Basis der in Gleichung (4.3) und Gleichung (4.4) definierten Homogenitätskriterien zusammengefasst. Zur Vermeidung einer Übersegmentierung erfolgte zudem eine Erweiterung des Bereichswachstumsverfahren um eine robuste Ebenenschätzung mittels der RANSAC-Methode (Brenner 2000a). Die Segmentierung wurde jeweils auf den durch das gelbe Grundrisspolygon gegebenen Bereich des Gebäudes beschränkt. Zusätzlich zum Ergebnis der Segmentierung ist jeweils in Abbildung 4-3a und Abbildung 4-4a eine 3D Ansicht des verwendeten DOM-Ausschnitts dargestellt. Während für das Beispiel in Abbildung 4-3 ein qualitativ hochwertiges DOM aus Laserscanning verwendet wurde, basiert das Beispiel in Abbildung 4-4 auf einem DOM geringerer Qualität aus einer Stereobildzuordnung.

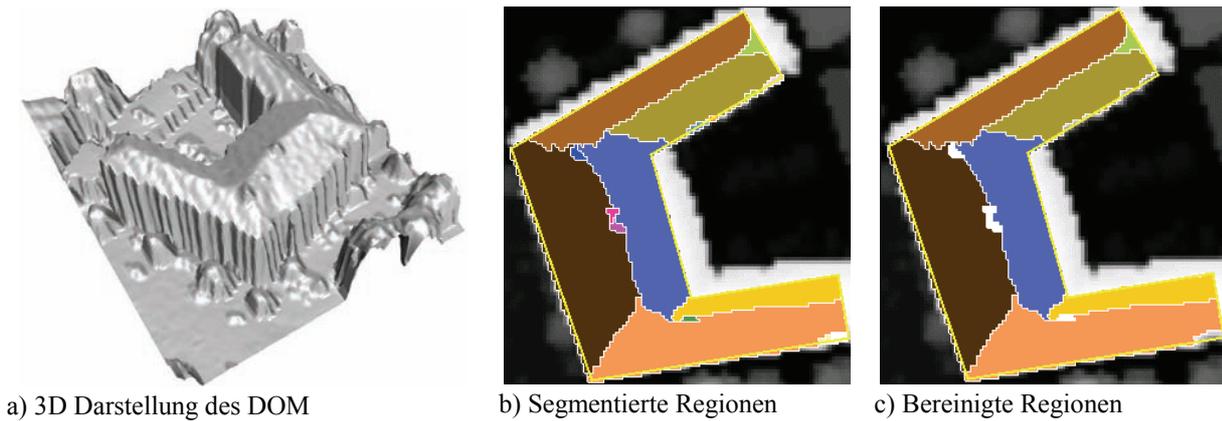


Abbildung 4-3: Extraktion und Auswahl ebener Flächen für DOM aus Laserscanning.

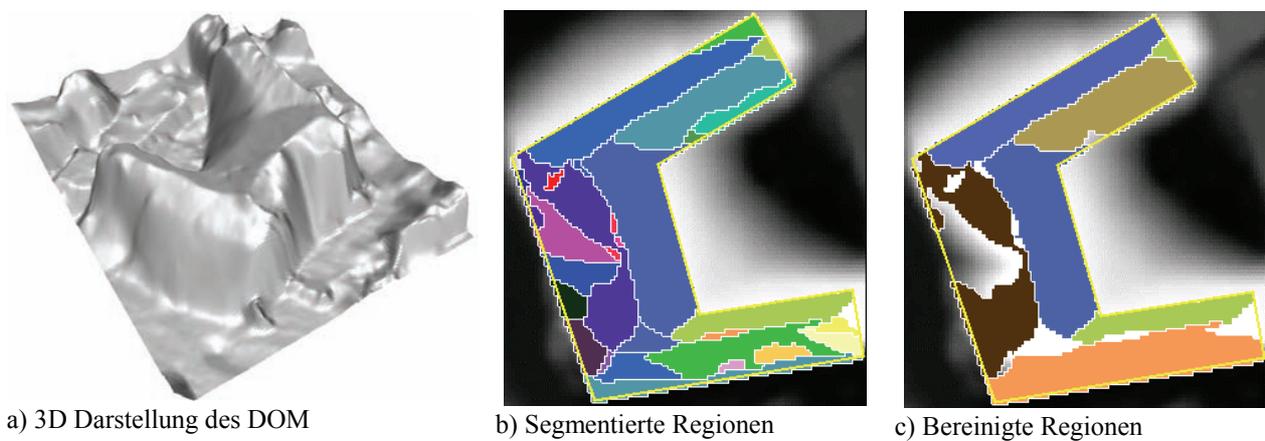


Abbildung 4-4: Extraktion und Auswahl ebener Flächen für DOM aus Stereobildzuordnung.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem DOM aus Laserdaten eine Extraktion hochwertiger Regionen möglich ist, während die Segmentierung des DOM aus Stereobildzuordnung zu fehlerhaften Regionen und einer starken Fragmentierung führt. Speziell in diesem Fall ist eine Verbesserung der Segmentierung durch die Integration von Grundrissinformation von Interesse. Ziel ist es dabei, durch eine Zuweisung der extrahierten Ebenen zu Segmenten des Grundrisspolygons zusammengehörige Regionen zusammenzufassen beziehungsweise fehlerhafte Regionen zu eliminieren. Eine Region wird nach diesem Ansatz einem Grundrisssegment zugewiesen, wenn der Winkel zwischen der Normalen des Grundrisssegments $\mathbf{G} = (g_x \ g_y)^T$ und dem in die Horizontalebene projizierten Normalenvektor $\mathbf{N} = (N_x \ N_y)^T$ der segmentierten Region unterhalb einer vorgegebenen Schwelle liegen. Zur Berechnung wird das Skalarprodukt

$$\left\langle \begin{pmatrix} N_x \\ N_y \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} g_x \\ g_y \end{pmatrix} \right\rangle > \cos(90^\circ - \varepsilon)$$

verwendet.

Das Ergebnis der grundrissbasierten Verbesserung der Segmentierung ist in Abbildung 4-3c beziehungsweise Abbildung 4-4c dargestellt. Regionen wurden entfernt, wenn sie keinem Element des Grundrisses zugeordnet werden konnten, beziehungsweise zusammengefasst, wenn sie identischen Grundrisselementen zugewiesen wurden. Aufgrund des qualitativ hochwertigen Segmentierungsergebnisses der Laserdaten werden durch die grundrissbasierte Verbesserung in Abbildung 4-3c nur sehr kleine fehlerbehaftete Bereiche eliminiert. Demgegenüber ergibt sich für die schlechtere Segmentierung des DOM aus Stereobildzuordnung eine deutliche Verbesserung des Ergebnisses durch die Eliminierung und Zusammenfassung der ursprünglichen Regionen in Abbildung 4-4c.

Als Eingangsdaten für die in diesem Abschnitt vorgestellten Segmentierungsverfahren wurden DOM in Form von regelmäßigen Rastern verwendet. Da DOM in dieser Form Fließkomma-Bildern entsprechen, ist ihre Verarbeitung mittels bestehender Bildverarbeitungsprogramme möglich. Zudem sind in dieser Form die direkten Nachbarn eines

DOM-Punktes jeweils implizit gegeben, so dass auf Nachbarschaft aufbauende Filter- und Segmentierungsalgorithmen relativ einfach zu implementieren sind. Trotz dieser Vorteile und der Tatsache, dass DOM in vielen Fällen bereits in Rasterform angeboten werden, ist es in manchen Fällen günstiger, die ursprünglich gemessenen Punkte zu erhalten. Dadurch lassen sich nachteilige Effekte der Regularisierung wie das Verschmieren von Fehlmessungen oder von Messungen auf sehr kleine Objekte zumindest teilweise vermeiden. Aus diesem Grund werden auch DOM in Form von triangulierten Netzen (triangulated irregular networks, TIN) genutzt. Da die Nachbarschaft bei TIN über eine ebene Triangulierung definiert ist, führt diese Darstellung jedoch zu relativ aufwendigen Verarbeitungsalgorithmen.

Eine grundrissgestützte Segmentierung ebener Regionen aus einem DOM in Form eines TIN wird von (Vosselman 1999) vorgeschlagen. Dazu werden die einzelnen DOM-Punkte über die Hesse-Normalform

$$Z = s_x X + s_y Y + d \quad (4.5)$$

in den zugehörigen Hough-Raum transformiert, der mit der Neigung s_x, s_y in X- und Y-Richtung sowie einem Skalar d in Normalenrichtung parametrisiert ist. Nach Gleichung (4.5) definiert jeder DOM-Punkt X, Y, Z im Objektraum eine Ebene der Form $d = z - s_x X + s_y Y$ im Hough-Raum. Koplanare Punkte im Objektraum ergeben damit im Hough-Raum mehrere Ebenen, die einen gemeinsamen Schnittpunkt bilden. Dieser Schnittpunkt lässt sich durch eine Clusteranalyse einfach detektieren. Dabei wird jedoch vorausgesetzt, dass die Anzahl der gesuchten Ebenen nicht zu groß wird. Dies lässt sich bei der Segmentierung von Dachflächen durch die Vorgabe des Gebäudegrundrisses erreichen, eine weitere Reduktion potentieller Flächen ist durch eine Zerlegung des Grundrisses in Teilbereiche möglich (Vosselman & Suveg 2001). Neben der Bestimmung von Teilbereichen kann diese Grundrisszerlegung wie in Abschnitt 4.3.2 dieser Arbeit diskutiert jedoch auch zur Gewinnung topologischer Information verwendet werden.

4.3 Nutzung von Grundrissinformation zur Erzeugung der Gebäudetopologie

Die Erfassung eines 3D Gebäudemodells erfordert neben der Segmentierung geeigneter Primitive auch den Aufbau topologischer Beziehungen zwischen den extrahierten Segmenten. Auch für diesen Schritt der automatischen Gebäuderekonstruktion liefern gegebene Grundrisse des Gebäudes wichtige Information. Auch wenn die Analyse eines Umrisses keine eindeutige dreidimensionale Rekonstruktion des zugrundeliegenden Gebäudes erlaubt, so ist dadurch zumindest eine Einschränkung der potentiellen Gebäudeformen möglich. Aus diesem Grund ermöglichen Hypothesen über mögliche Gebäudeformen, die a priori aus dem Gebäudeumriss abgeleitet werden, eine zielgerichtete und damit effektive Rekonstruktion der endgültigen Gebäudeform aus den ebenfalls vorhandenen Höhendaten.

Ein solches zweistufiges Vorgehen bestehend aus Hypothesenbildung und anschließender Verifikation und Parameterschätzung liegt beiden in diesem Abschnitt diskutierten Verfahren zugrunde. Bei dem in Abschnitt 4.3.1 vorgestellten Verfahren wird aus dem Grundriss des Gebäudes zunächst durch eine Dachausmittelung ein Gebäudepolyeder abgeleitet (Haala & Brenner 1998). Durch diese Skelettierung ist die Topologie des zu rekonstruierenden Gebäudes bereits vorgegeben. In einem zweiten Schritt werden dann unter Beibehaltung dieser Struktur die einzelnen Dachflächen in das gegebene DOM eingepasst um so die tatsächliche dreidimensionale Form des Daches zu rekonstruieren. Der zweite Ansatz basiert auf einer Kombination parametrischer Grundelemente für die automatische Gebäuderekonstruktion. Bei diesem in Abschnitt 4.3.2 vorgestellten Verfahren der Grundrisszerlegung werden komplexe Gebäude durch Kombination einfacher Grundelemente repräsentiert ((Haala & Brenner 1998) (Haala et al 1998b), (Haala & Brenner 1999b)). Die Zerlegung des Grundrisses in Rechtecke ermöglicht dabei eine Initialisierung der Grundelemente, die Auswahl passender Formen und die Bestimmung der unbekannt Parameter erfolgt dann wiederum durch die Analyse eines gegebenen DOM.

4.3.1 DOM-basierte Skelettierung von Grundrissen

Ausgehend von dem gegebenen Umriss eines Gebäudes kann die potentielle Struktur des Gebäudedaches durch eine Skelettierung bestimmt werden. Dabei definiert diese Struktur die gesuchten topologischen Relationen der einzelnen Dachsegmente. Algorithmen zur Skelettierung von Gebäudegrundrissen, die in der darstellenden Geometrie auch unter dem Begriff der Dachausmittelung bekannt sind, gehen zunächst von einer identischen Neigung für alle Dachflächen aus. Diese Algorithmen können jedoch ohne Probleme auch für den Fall variabler Dachneigungen genutzt werden. Damit gilt für die mit dem Verfahren DOM-basierten Skelettierung von Grundrissen rekonstruierten Gebäude ledig-

lich die Grundannahme, dass alle Segmente des verwendeten Grundrisses zu einer Dachfläche mit beliebiger Neigung führen und dass die durch den Grundriss definierte Trauflinie des Gebäudes eine konstante Höhe besitzt.

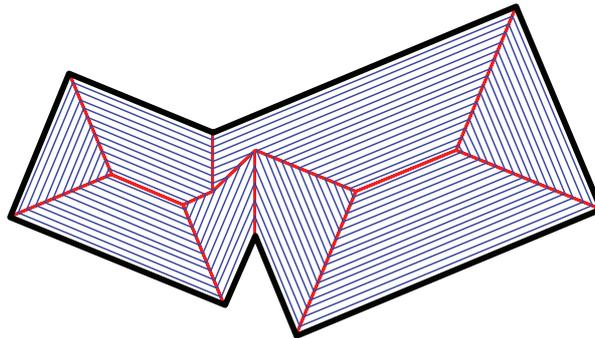
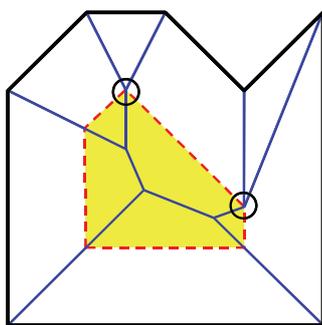
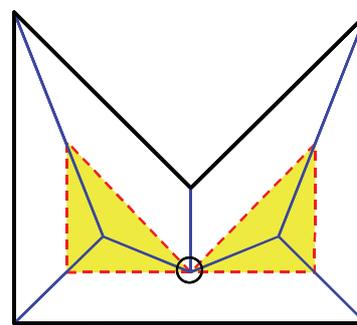


Abbildung 4-5: Skelettierung durch sukzessive Verkleinerung des Gebäudepolygons für identische Dachneigungen und konstante Traufhöhen.

Ein häufig eingesetztes Verfahren der Dachausmittlung basiert auf der sukzessiven Verkleinern des gegebenen Umrisspolygons (Aichholzer et al 1995) (Felkel & Obdržálek 1998) (Eppstein & Erickson 1999). Wie in Abbildung 4-5 nach (Belanger 2000) exemplarisch dargestellt, entstehen durch die infinitesimale Verkleinerung des ursprünglichen Umrisses an den Polygonsegmenten jeweils Wellenfronten, die sich selbstparallel mit identischer Geschwindigkeit nach innen bewegen. Die in Abbildung 4-5 ebenfalls dargestellten Spuren der Schnittpunkte dieser sich bewegenden Wellenfronten definieren dann das Skelett des Gebäudeumrisses. Zunächst bewegen sich die Schnittpunkte der Wellenfronten entlang der Winkelhalbierenden des gegebenen Umrisspolygons. Im weiteren Verlauf kann es jedoch zu Veränderungen in der Topologie des sich verkleinernden Polygons kommen, wodurch jeweils Anfangs- beziehungsweise Endpunkte von Linien des Skeletts definiert werden.



a) Zusammenfallen von Polygonpunkten



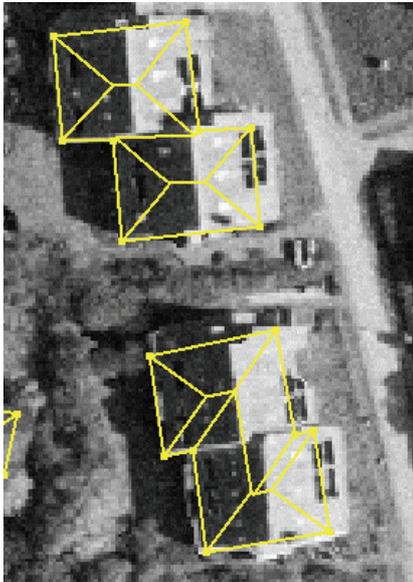
b) Teilung eines Polygons

Abbildung 4-6: Änderung der Topologie während der Verkleinerung des Umrisspolygons.

Wie in Abbildung 4-6 nach (Belanger 2000) dargestellt, ergibt sich eine Änderung der Topologie des sich verkleinernden Polygons entweder durch das Zusammenfallen von Polygonpunkten oder durch die Teilung eines Polygons. Für den Fall, dass wie in Abbildung 4-6a die aktuelle Ausdehnung einer Polygonkante im Verlauf der Verkleinerung auf einen Punkt degeneriert, so sind ab diesem Zeitpunkt die beiden an die degenerierte Kante angrenzenden Polygonsegmente benachbart. Existieren keine angrenzenden Segmente mit einer Länge größer Null, so verschwindet das komplette Polygon. Ein Beispiel für die Änderung der Topologie durch die Teilung des schrumpfenden Polygons zeigt Abbildung 4-6b. Dabei trifft der Schnittpunkt zweier Wellenfronten auf eine dritte Front. Die zu der dritten Front gehörige Kante wird darauf hin unterteilt, so dass zwei neue Polygone entstehen. Nach einer topologischen Änderung aufgrund der in Abbildung 4-6 dargestellten Ereignisse werden für die veränderten Polygone wiederum neue Wellenfronten generiert, deren Schnittpunkte zur Bildung des Skeletts weiter verfolgt werden.

Das Ergebnis einer Skelettierung gegebener Gebäudegrundrisse zeigt Abbildung 4-7. Ausgehend von der in Abbildung 4-7a dem Orthobild überlagerten Dachstruktur kann die in Abbildung 4-7b dargestellte Hypothese der dreidimensionalen Dachform abgeleitet werden. Entsprechend der vorgegebenen Grundannahme wird dabei für jedes Gebäude von einer konstanten Höhe der Dachtraufen ausgegangen. Zur Bestimmung dieser Traufhöhe werden entlang des Grundrisses Höhen aus dem verfügbaren DOM herausgegriffen und gemittelt. Da für die Skelettierung lediglich von identischen Dachneigungen ausgegangen wird, kann zur Ableitung der zugehörigen dreidimensionalen Dachform

mit Ausnahme einer vertikalen oder horizontalen Steigung eine beliebige Neigung für die Dachflächen gewählt werden. Für die Gebäude in Abbildung 4-7b wurde ein Wert von 45° vorgegeben. Durch Verlängerung der Trauflinien auf die Geländeoberfläche ergibt sich dann das komplette Gebäudemodell.



a) Skelettierte Grundrisse und Orthobild



b) Gebäudehypothese und DOM als 3D Darstellung

Abbildung 4-7: Gebäudehypothesen durch Skelettierung von Grundrissen.



a) rekonstruierte Dachstruktur und Orthobild



b) Rekonstruktion und DOM als 3D Darstellung

Abbildung 4-8: Skelettierung nach Anpassung an das DOM.

Der Vergleich des so erzeugten Modells mit dem texturierten DOM in Abbildung 4-7b macht deutlich, dass die so berechnete Form nicht der tatsächlichen Oberfläche der aufgenommenen Dachflächen entspricht. Für die Rekonstruktion der tatsächlichen Dachform werden deshalb die durch die Skelettierung initialisierten Dachflächen in das vorhandene DOM eingepasst. Dazu wird innerhalb der initialisierten Dachflächen nach kompatiblen DOM-Punkten gesucht, die anschließend die Bestimmung der individuellen Neigungen der zugehörigen Flächen ermöglichen. Jedes Element des Grundrisspolygons führt bei der Skelettierung zur Konstruktion einer Dachfläche. Ist ein DOM-Rasterpunkte kompatibel zu einer Dachfläche, so muss er gleichzeitig kompatibel zu dem Grundrisssegment sein, das die Konstruktion dieser Fläche im Rahmen der Skelettierung auslöste. Somit kann die Kompatibilität von DOM-Punkten zu einer Dachfläche durch die Berechnung des Winkels zwischen dem in die Ebene projizierte Normalenvektor des DOM-

Rasterpunkts und dem jeweiligen Grundrisssegment bestimmt werden. Analog zur grundrissgestützten DOM-Segmentierung wird für die Bestimmung kompatibler DOM-Punkte Gleichung (4.2) eingesetzt. Aus den so markierten Punkten wird dann durch eine Kleinste-Quadrate-Schätzung die wahre Neigung der Dachfläche bestimmt. Sind innerhalb einer Dachfläche keine kompatiblen DOM-Punkte vorhanden, so wird für diese Fläche von einer vertikalen Neigung ausgegangen. Nach der Bestimmung der individuellen Dachneigungen wird das Gebäude durch eine nochmalige Skelettierung des Grundrisses endgültig rekonstruiert. Das Ergebnis zeigt Abbildung 4-8.

Während der im ersten Schritt des Verfahrens eingesetzte Ansatz zur Dachausmittlung von identischen Dachneigungen ausgeht, muss in diesem Fall die Skelettierung mit unterschiedlichen Dachneigungen erfolgen. Unter Beibehaltung des prinzipiellen Konstruktionsansatz werden deshalb abhängig von den zuvor bestimmten Neigungen unterschiedliche Schrittweiten für die rekursive Verschiebung der einzelnen Segmente verwendet. Dies führt während der Verkleinerung des Umrisspolygons zu unterschiedlichen Geschwindigkeiten der zugehörigen Wellenfronten. Die Spur der Schnittpunkte der Wellenfronten entsprechen in diesem Fall nicht mehr der Winkelhalbierenden der jeweiligen Polygonlinien. Die Beispiele der Skelettierung mit identischen Dachneigungen für die beiden Gebäude in Abbildung 4-7 zeigen, dass nahezu identische Umrisse zu unterschiedlichen Dachformen führen können. Nach der Einpassung der Dächer in das DOM in Abbildung 4-8 führen jedoch beide Hypothesen zu nahezu identischen Ergebnissen der Gebäuderekonstruktion.

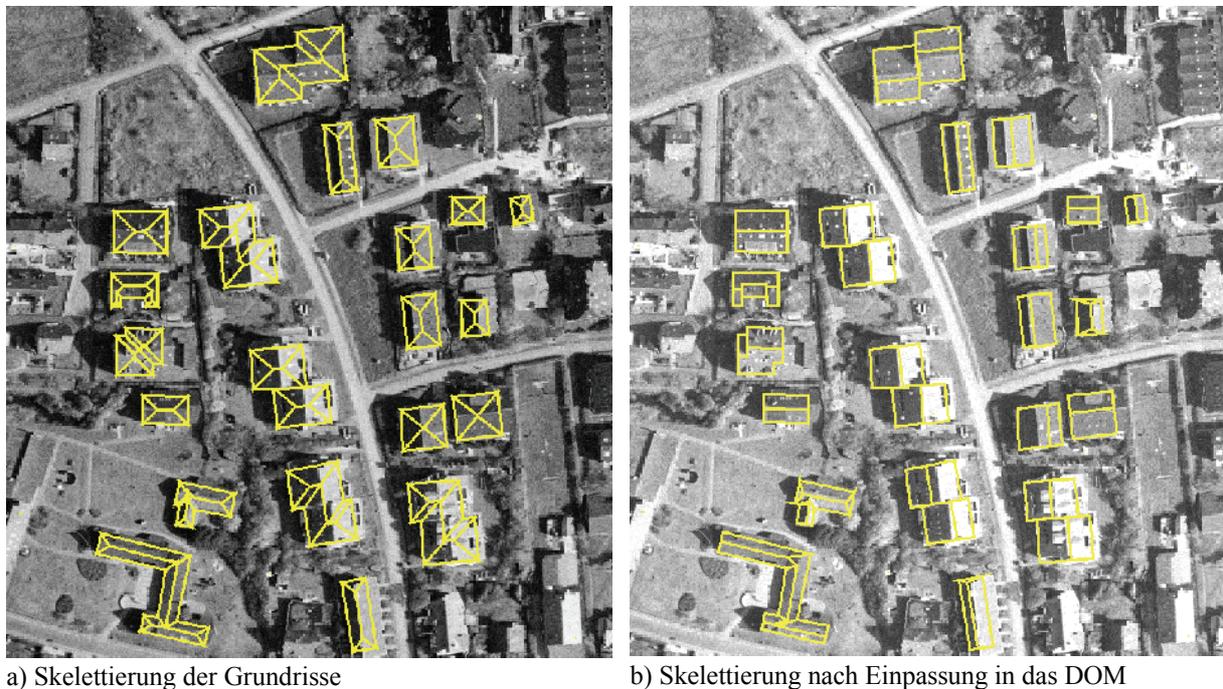


Abbildung 4-9: DOM-basierte Skelettierung von Grundrissen.

Das Ergebnis der DOM basierten Skelettierung für einen größeren Ausschnitt zeigt Abbildung 4-9. Das Resultat der Dachausmittlung ist dabei in Abbildung 4-9a, das Ergebnis der Skelettierung nach der Einpassung der Dachneigungen in das DOM in Abbildung 4-9b dargestellt. Abbildung 4-10 zeigt nochmals das Ergebnis der endgültigen Rekonstruktion in einer dreidimensionalen Darstellung.

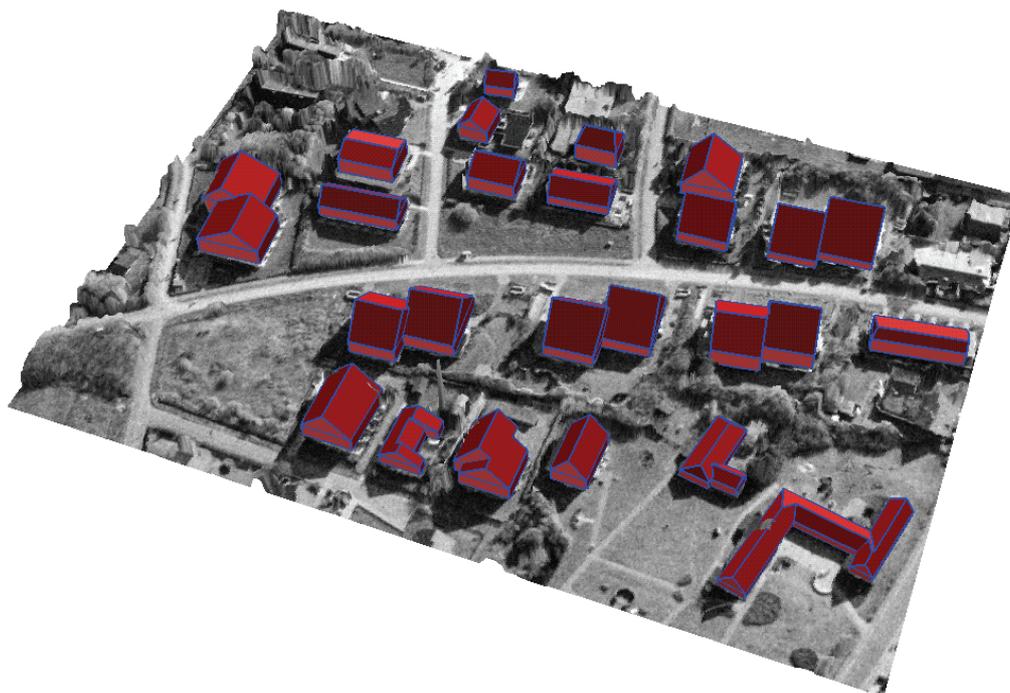


Abbildung 4-10: 3D Visualisierung der rekonstruierten Gebäude.

Das für die DOM-basierte Skelettierung von Grundrissen genutzte Verfahren der Dachausmittlung führt immer zu einer eindeutigen Lösung. Für komplexe Grundrisse können jedoch ausgehend von der genutzten Grundannahme, dass alle Traufen identische Höhen besitzen und jeweils zur Konstruktion einer Dachfläche führen, mehrere topologisch verschiedene Lösungen existieren. Aus diesem Grund wurde der hier vorgestellte Ansatz zu einem Suchverfahren erweitert, bei dem zunächst alle möglichen Topologien für den gegebenen Grundriss konstruiert werden (Brenner 2000a). Die Einpassung der Dachhypothesen die DOM-Daten erfolgt auch bei diesem Ansatz in einem zweiten Verfahrensschritt, bei dem unter Bewahrung der Topologie die jeweils optimalen Neigungen der individuellen Dachflächen bestimmt werden. Mit diesem Ansatz können so auch für komplexe Grundrisse alle möglichen Lösungen untersucht werden. Nach der Einpassung der Rekonstruktion in die DOM-Daten wird dann diejenige Alternative selektiert, die zu den geringsten Differenzen zwischen rekonstruiertem Dach und DOM führt.

Ein Nachteil der DOM-basierten Skelettierung ist die Beschränkung auf die Rekonstruktion von Dächern mit konstanter Traufhöhe. Zudem ist die Konstruktion eines Daches aus gegebenen Gebäudeumrissen vor allem bei dem Aufeinandertreffen konkaver Kanten sehr empfindlich gegenüber kleinen Digitalisierfehlern oder numerischer Ungenauigkeiten. Aufgrund der Tatsache, dass jede Trauflinie zur Konstruktion einer Dachfläche führt, besteht darüber hinaus keine Möglichkeit sehr kleiner Dachstrukturen zu generalisieren. Robustere Ergebnisse liefert in diesem Fall das in Abschnitt 4.3.2 vorgestellte Verfahren der Gebäuderekonstruktion durch Grundrisszerlegung.

4.3.2 Rekonstruktion durch Grundrisszerlegung

Durch die DOM-basierte Skelettierung von Grundrissen wird das zugrundeliegende Gebäude direkt in Form einer 3D Randbeschreibung rekonstruiert. Alternativ dazu kann, wie im in diesem Abschnitt vorgestellten Verfahren der Grundrisszerlegung die Gebäuderekonstruktion auch durch eine Kombination einfacher 3D Grundelemente oder Primitive erfolgen. Dabei werden die Gebäude durch eine kleine Zahl von Grundelementen beschrieben. Dadurch ist es möglich, die Rekonstruktion auch komplexer Gebäude auf die Erfassung und anschließende Kombination einfacher Grundelemente zu reduzieren. Ähnlich wie bei dem Verfahren der DOM-basierten Skelettierung ergibt sich bei der Grundrisszerlegung die topologischen Relationen der Gebäudestruktur aus der Analyse des vorhandenen Grundrisses; die dreidimensionale Ausprägung der Gebäudeform resultiert wieder aus einer Einpassung in das gegebene DOM. Somit ermöglicht auch in diesem Verfahren die Analyse des gegebenen Grundrisses eine zielgerichtete vollautomatische Rekonstruktion des Gebäudes aus dichten DOM Daten.

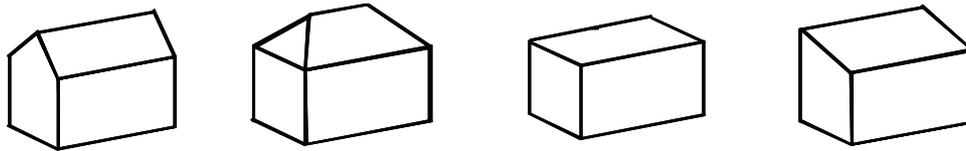


Abbildung 4-11: Grundelemente zur Konstruktion kombinierter parametrischer Gebäudemodelle.

Ziel des Verfahrens ist zunächst die Beschreibung des zu rekonstruierenden Gebäudes durch die in Abbildung 4-11 dargestellten Grundelemente. Als 3D Primitive stehen quaderförmige Grundkörper zur Verfügung, die durch unterschiedliche Dachformen erweitert sind. Möglich sind dabei Dachformen wie Satteldach, Walmdach, Flachdach oder Pultdach. Aufgrund des quaderförmigen Grundkörpers basieren alle verwendeten 3D Primitive auf einer rechteckigen Grundfläche. Diese Tatsache wird für die Initialisierung der Grundelemente genutzt, indem der gegebene Gebäudegrundriss in Rechtecke unterteilt wird. Jedes der dabei generierten Rechtecke definiert im Anschluss daran die Grundfläche eines im weiteren Verlauf durch die Analyse des DOM zu bestimmenden 3D Primitives.

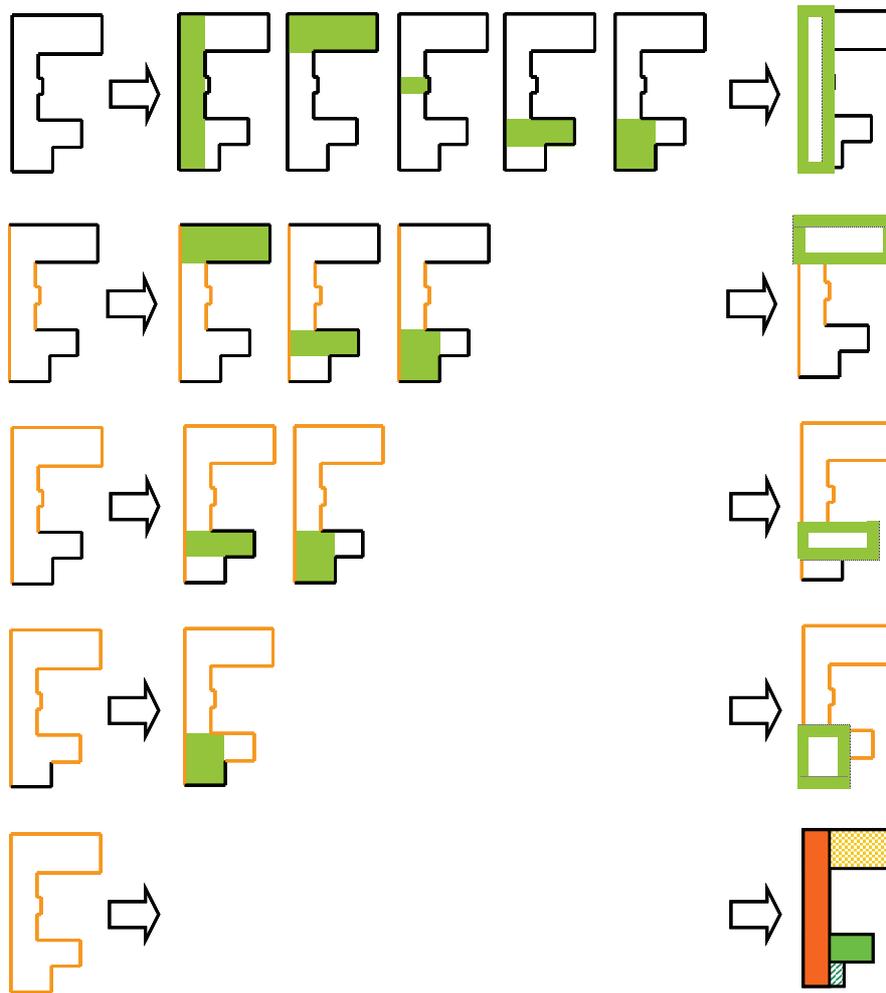


Abbildung 4-12: Arbeitsweise der Rechteckzerlegung.

Der Ablauf der zu diesem Zweck eingesetzten Grundrisszerlegung ist beispielhaft in Abbildung 4-12 dargestellt (Brenner 2000a). Jedes Linienelement des Grundrisspolygons löst zunächst die Konstruktion eines Rechtecks aus. Eine Seite des Rechtecks wird dabei jeweils durch die aktuelle Grundrisskante initialisiert, aus den verbleibenden Polygonsegmenten werden für diejenigen gewählt, die zu der Konstruktion des Rechtecks mit maximal möglicher Breite und Höhe führen. Das jeweils Größte der so gebildeten Rechtecke wird akzeptiert und die bei der Konstruktion des Rechtecks beteiligten Seiten des Umrisspolygons werden als bearbeitet markiert. Anschließend wird die Rechteckkonstruktion so lange iterativ für alle noch nicht als bearbeitet markierten Elemente durchgeführt, bis keine unbehandelten Grundrisskanten mehr verbleiben. Die Markierung der bearbeiteten Polygonsegmente erfolgt durch die Bildung eines Puffers um die Linien des konstruierten Rechtecks. Alle in diesem Puffer enthaltenen Segmente des

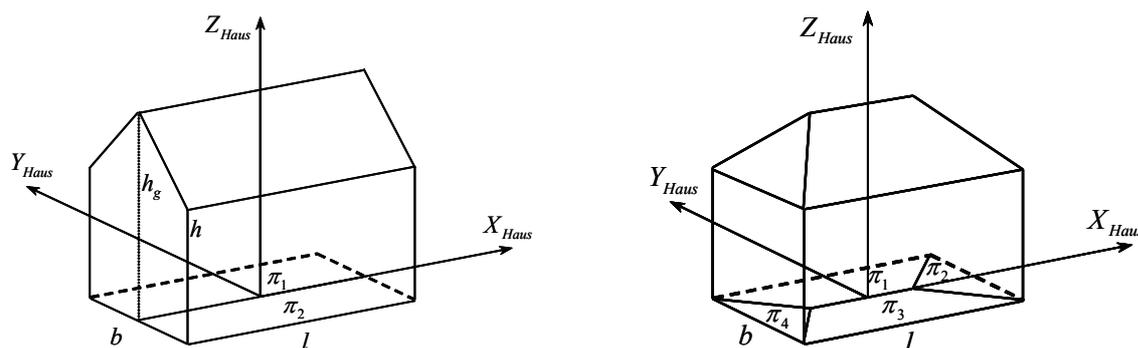
Grundrisspolygone werden in den weiteren Verarbeitungsschritten nicht mehr berücksichtigt. Da im Verlauf der Rechteckzerlegung kleinere Ausbuchtungen des Grundrisses komplett in den Puffer fallen können, ist es somit auch möglich, dass Polygonsegmente als bearbeitet markiert werden, ohne dass dadurch ein zugehöriges Rechteck erzeugt wird. Dadurch ist auch eine einfache Generalisierung möglich, die durch die Wahl einer entsprechenden Puffergröße gesteuert werden kann.

Im Anschluss an die Grundrisszerlegung initialisiert jedes der generierten Rechtecke die Rekonstruktion eines der in Abbildung 4-11 dargestellten Grundelemente. Da jedes Rechteck die Grundfläche des zugehörigen quaderförmigen Grundkörpers definiert, wird durch die Position und Orientierung des Rechtecks die horizontale Lage des zu rekonstruierenden Grundelements vorgegeben. Das gleiche gilt für die horizontale Ausdehnung des Grundelements, die durch Länge und Breite des Rechtecks bestimmt ist. Als Unbekannte verbleiben somit die Höhe des Grundkörpers und der jeweilige Dachtyp. Darüber hinaus müssen bei einem Giebel- Walm- oder Pultdach die jeweiligen Dachneigungen bestimmt werden. Die Bestimmung dieser verbleibenden Parameter erfolgt im Rahmen Kleinste-Quadrate-Schätzung, die eine Einpassung der zu rekonstruierenden Grundelemente in das DOM ermöglicht. In diesem Schritt erfolgt eine Schätzung der unbekannt Parameter durch eine vermittelnde Ausgleichung, bei der die Summe der Differenzen zwischen den DOM-Punkten und den zugehörigen Höhen der Dachflächen der Grundelemente minimiert werden. Für die Parameterschätzung werden jeweils nur Punkte des DOM verwendet, die kompatibel zu der sie enthaltenden Dachfläche sind. Dies führt zu einer größeren Robustheit gegenüber Messfehlern des DOM beziehungsweise gegenüber Messungen auf kleinere Teile des Daches, für die kein Grundelement bestimmt werden kann. Die Kompatibilität der DOM-Punkte ergibt sich jeweils aus ihrem Normalenvektor. Soll ein DOM-Punkt zur Schätzung eines Grundelements mit Flachdach verwendet werden, so darf der Winkel des Normalenvektors zur Vertikalen einen vorgegebenen Winkel nicht überschreiten. Für Primitive mit geneigten Dachflächen ist ein DOM-Punkt kompatibel bezüglich der jeweiligen Dachfläche, wenn sein in die Ebene projizierter Normalenvektor parallel zur Neigungsrichtung dieser Fläche ist. Da in diesem Fall der projizierter Normalenvektor senkrecht zur zugehörigen Kante des zugrundeliegenden Rechtecks ist, kann die Berechnung der Kompatibilität wiederum nach Gleichung (4.2) erfolgen.

Im einfachsten Fall der Rekonstruktion eines Gebäudeprimitives mit Flachdach wird lediglich die Höhe h des Quaders bestimmt. Dadurch reduziert sich die Parameterschätzung auf die Ermittlung der mittleren Höhe

$$\hat{h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i, \quad (4.6)$$

wobei die Berechnung auf allen n DOM Punkten $(X_i, Y_i) \in \pi_0$ basiert, die innerhalb der vorgegebenen Grundfläche liegen und die oben erwähnten Kompatibilitätsbedingung erfüllen.



a) Giebeldach

b) Walmdach

Abbildung 4-13: Koordinatensystem zur Parameterschätzung der Grundelemente.

Die Parametrisierung eines in Abbildung 4-13a dargestellten Gebäudeelements mit Giebeldachs erfolgt durch die Giebelhöhe h_g und die Dachsteigung $n = \frac{(h_g - h) \cdot 2}{b}$, da sich in diesem Fall eine lineare Beobachtungsgleichung für die Parameterschätzung ergibt. Die Parameterschätzung zur Bestimmung der dreidimensionalen Ausprägung der jeweiligen Grundelemente erfolgt zu Vereinfachung in einem lokalen Koordinatensystem. Wie Abbildung 4-13 zeigt, liegt der Ursprung dieses Systems jeweils im Schwerpunkt der rechteckigen Grundfläche des Gebäudeprimitives, die Orientierung der Achsen ist parallel zu den Seiten dieses Rechtecks. Die Schätzung der gesuchten Parameter basiert auf der Beobachtungsgleichung

$$Z_i + v_i = h_g - n \cdot |Y_i|. \quad (4.7)$$

Bei einer Einheitsgewichtung der beobachteten DOM-Punkte erhält man daraus als Normalgleichungsmatrix und Absolutglied

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \sum_i 1 & -\sum_i |Y_i| \\ -\sum_i |Y_i| & \sum_i Y_i^2 \end{bmatrix}, \mathbf{A}^T \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \sum_i Z_i \\ -\sum_i Z_i |Y_i| \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

und damit nach

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{I} = \begin{bmatrix} \hat{h}_g & \hat{n} \end{bmatrix}^T$$

die unbekannt Parameter h_g und n . Bei der Berechnung von Gleichung (4.8) erfolgt die Summation jeweils über alle $Z(X_i, Y_i)$ mit $(X_i, Y_i) \in \pi_1 \cup \pi_2$, die zudem kompatibel zu den jeweils zugehörigen Dachflächen π_1 und π_2 sind.

Das Grundelement mit Walmdach wird nach Abbildung 4-13b über die Giebelhöhe und Dachsteigung parametrisiert. Beim Aufbau der Beobachtungsgleichungen ergibt sich in diesem Fall eine Abhängigkeit von der Breite b und Länge l des zugrundeliegenden Rechtecks. Es gilt

$$\begin{aligned} Z_i + v_i &= h_g - n \cdot |Y_i| && \text{für } (X_i, Y_i) \in \pi_2 \cup \pi_4 \\ Z_i + v_i &= h_g - n \cdot \left(|X_i| - \frac{l-b}{2} \right) && \text{für } (X_i, Y_i) \in \pi_1 \cup \pi_3 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Um eine Parameterschätzung durchzuführen, muss zunächst für jedes Rechteck der optimale Dachtyp bestimmt werden. Dabei wird derjenige der vier möglichen Dachtypen gewählt, der zu der größten Anzahl von kompatiblen DOM-Punkten führt. Zudem darf bei einem Primitiv mit geneigter Dachfläche der relative Anteil von DOM-Punkten mit einem Normalenvektor in Richtung der Vertikalen einen bestimmten Schwellwert nicht überschreiten. Weiterhin wird die Annahme eines Primitives mit geneigter Dachfläche zugunsten eines Primitives mit Flachdach verworfen, wenn die rekonstruierten Dachflächen eine Mindestneigung nicht überschreiten. Ist eine eindeutige Entscheidung für einen Erfüllen Dachtyp aus diese Bedingungen nicht möglich, so wird für die endgültige Rekonstruktion das Grundelement gewählt, das nach der Parameterschätzung zu den geringsten verbleibenden Abweichungen zwischen rekonstruierten Dachflächen und DOM führt.



Abbildung 4-14: Rechteckzerlegung des Grundrisses.



Abbildung 4-15: Rekonstruierte Grundelemente.

Abbildung 4-14 zeigt für ein Beispiel das Ergebnis der automatischen Zerlegung eines Grundrisses. Die resultierenden Rechtecke wurden zur Initialisierung der zu bestimmenden Grundelemente verwendet, das Ergebnis der Parameter-

schätzung zeigt Abbildung 4-15 in einer dreidimensionalen Darstellung. Zur visuellen Beurteilung der verbleibenden Abweichungen ist dem rekonstruierten Gebäude das verwendete DOM überlagert.

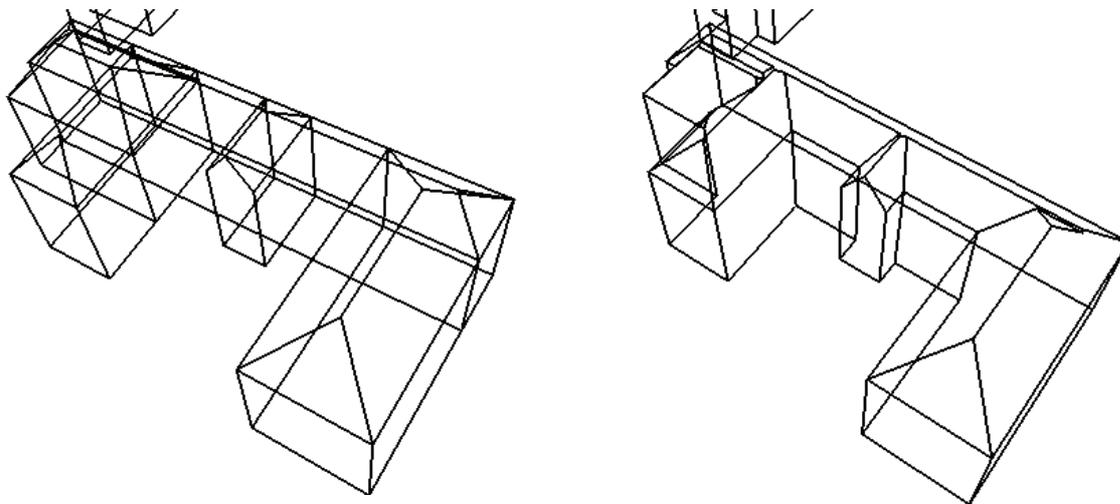


Abbildung 4-16: Drahtmodell der Grundelemente. Abbildung 4-17: Vereinigung der Grundelemente.

Wie die Darstellung des Rekonstruktionsergebnisses als Drahtmodell in Abbildung 4-16 verdeutlicht, wird ein Gebäude nach der Parameterschätzung durch mehrere, ineinander verschachtelten 3D Primitive repräsentiert. Eine solche Darstellung ist bei einer Objektbeschreibung durch Constructive Solid Geometry (CSG) üblich. Für viele Anwendungen ist jedoch die Erzeugung einer 3D Randdarstellung notwendig. Dies erfordert eine Verschmelzung der rekonstruierten Grundelemente. Hierzu werden die 3D Primitive verschnitten und die Flächen innerhalb des resultierenden Gebäudekörpers eliminiert. Das Ergebnis dieses Schritts zeigt Abbildung 4-17.



Abbildung 4-18: Ergebnis der automatischen Gebäuderekonstruktion für das Testgebiets Stuttgart.

Das Ergebnis einer automatischen 3D Gebäuderekonstruktion nach dem Verfahren der Grundrisszerlegung ist für einen Bereich der Stadt Stuttgart in Abbildung 4-18 dargestellt. Das Gebiet beinhaltet dabei auf einer Fläche von 1.8km x 2.3km insgesamt 5208 Gebäude. Die für dieses Beispiel genutzten Gebäudegrundrisse wurden vom Stadtmessungsamt Stuttgart in digitaler Form zur Verfügung gestellt. Die ursprüngliche Erfassung der Umrisse basierte auf einer Digitalisierung der Grundkarte 1:500 beziehungsweise auf direkten Einmessungen. Die Darstellung in Abbildung 4-18 zeigt, dass der Großteil der Gebäude korrekt erfasst wurde, für vereinzelte Gebäude sind jedoch auch grobe Fehler in der Dachform deutlich erkennbar. Die Qualität der Gebäuderekonstruktion lässt sich zudem einfach

über die verbleibenden Abweichungen zwischen dem DOM und der rekonstruierter Dachoberfläche abschätzen. Durch eine gebäudebezogene Bestimmung dieser Differenzen können damit unzureichend rekonstruierte Gebäude einfach lokalisiert werden. In dem Datensatz des Testgebiets Stuttgart gehen nahezu alle fehlerhaften Rekonstruktionen auf Innenhöfe von Gebäuden zurück, da solche Strukturen in den vorliegenden Grundrissdaten nicht geeignet repräsentiert wurden. Um eine Gebäudeerfassung auch in Fällen zu ermöglichen, in denen eine korrekte automatische Initialisierung der Grundelemente aus den vorhandenen Grundrissen nicht möglich ist, wird eine manuelle Nachbearbeitung der Rechteckzerlegung durchgeführt.

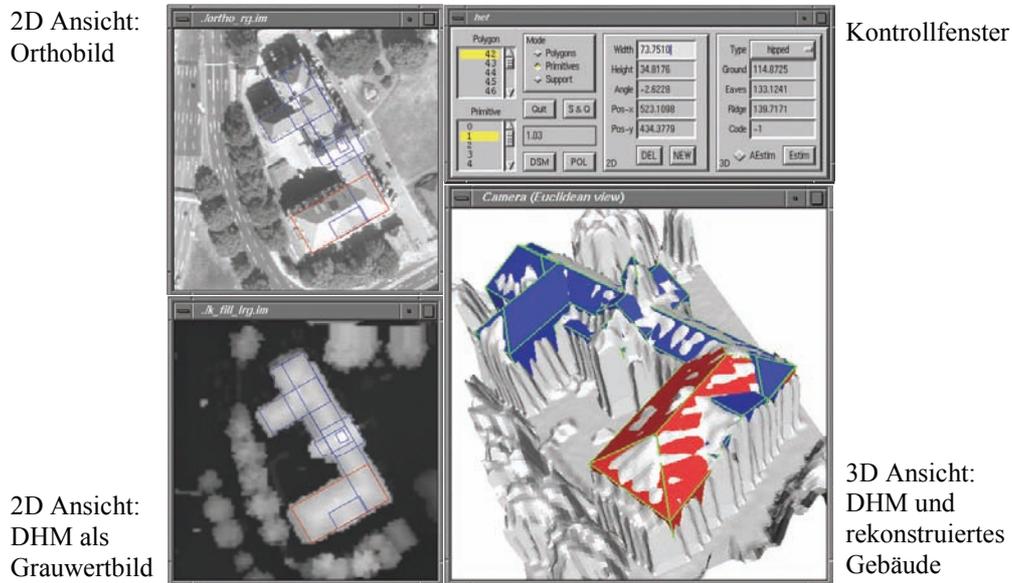


Abbildung 4-19: Graphische Oberfläche zur interaktiven Gebäuderekonstruktion.

Die für die interaktive Modifizierung der Rechteckzerlegung eingesetzte graphische Benutzeroberfläche ist in Abbildung 4-19 dargestellt. Die zu zerlegenden Grundrisse können dabei dem Orthobild, einer Grauwertdarstellung des DOM oder einer gescannten Karte überlagert werden. Das rekonstruierte Gebäude wird nach der Selektion eines Gebäudepolygons durch den Operateur zusammen mit dem zugehörigen Ausschnitt des DOM in einer 3D Visualisierung dargestellt. Mittels der graphischen Oberfläche können nun die zunächst automatisch aus dem Grundriss abgeleiteten Rechtecke durch den Operateur manipuliert werden. Gleichzeitig mit der Veränderung der jeweiligen Grundflächen wird jeweils die automatische Rekonstruktion des zugehörigen 3D Grundelementes durchgeführt, um so den Einfluss der Interaktion auf das Ergebnis der Rekonstruktion unmittelbar darzustellen.

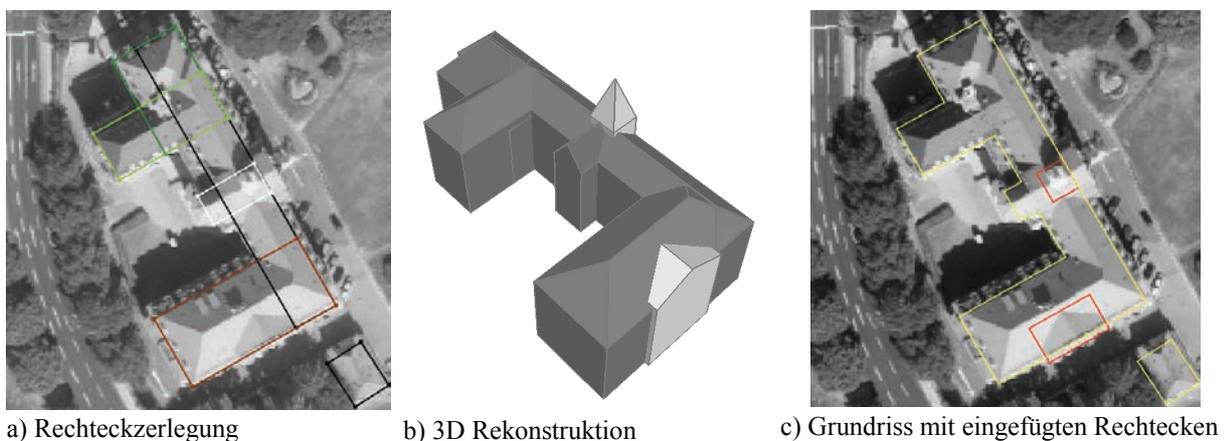


Abbildung 4-20: Manuelle Verbesserung der automatischen Gebäuderekonstruktion.

Wie das Beispiel in Abbildung 4-20 zeigt, können neben der Korrektur des Rekonstruktionsergebnisses auch zusätzlich Rechtecke interaktiv erzeugt werden, um so Gebäudeelemente wie Dachaufbauten, die nicht im Grundriss enthalten sind zu erfassen. In Abbildung 4-20c ist der für dieses Beispiel genutzte Gebäudegrundriss als helles Polygon

dargestellt. Abbildung 4-20a zeigt das Ergebnis der Zerlegung dieses Grundrisses in Rechtecke. Die durch diese Rechteckzerlegung initialisierten dreidimensionalen Elemente des rekonstruierten Gebäudes sind in Abbildung 4-20b durch die dunkel dargestellten Grundelemente repräsentiert. Wie das in Abbildung 4-20a beziehungsweise Abbildung 4-20c hinterlegte Orthobild zeigt, konnten mit der Grundrisszerlegung nicht die Rekonstruktion aller Gebäudeteile initialisiert werden. Aus diesem Grund wurden zusätzlich die in Abbildung 4-20c dunkel dargestellten Rechtecke manuell eingebracht. Durch diese Rechtecke wurde dann die automatische Rekonstruktion der fehlenden in Abbildung 4-20b hell dargestellten Gebäudeteile ausgelöst.



Abbildung 4-21: Ergebnis der interaktiven Korrektur für das Testgebiet Stuttgart

Abbildung 4-21 zeigt das Ergebnis der interaktiven Korrektur der in Abbildung 4-18 dargestellten automatischen Rekonstruktion für das Testgebiet Stuttgart. Dabei konnten Probleme der vollautomatischen Rekonstruktion insbesondere durch die Berechnung verbleibender Differenzen zwischen DOM und rekonstruierten Flächen aufgedeckt werden, was eine zielgerichtete und damit effiziente interaktive Korrektur zu ermöglichen.

4.4 Einsatz von Bilddaten zur Visualisierung

Die in Abschnitt 4.3 beschriebenen Verfahren basieren ausschließlich auf DOM und Grundrissdaten. Die Integration von Bilddaten in die Datenerfassung ist in diesem Fall nur notwendig, wenn die erfassten dreidimensionalen Stadtmodelle für Visualisierungsanwendungen genutzt werden sollen.

4.4.1 Texturierung von Gebäudekörpern

Um eine realistische Visualisierung virtueller Stadtmodelle zu ermöglichen, ist in der Regel die Texturierung der erfassten Gebäudeoberflächen erforderlich. Neben einer wirklichkeitstreuen Darstellung der verschiedenen Oberflächenmaterialien ermöglicht es der Einsatz von Bildtextur auch, zumindest teilweise auf eine geometrische Modellierung von Details der darzustellenden Gebäude zu verzichten.



Abbildung 4-22: Visualisierung eines 3D Stadtmodell mit Textur aus Luftbildern.

Als Beispiel zeigt Abbildung 4-22 eine dreidimensionale Visualisierung eines Stadtmodells von Heidelberg. Die geometrische Rekonstruktion der Gebäude erfolgte mit dem in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen Verfahren, die automatische Texturierung des Geländes und der 3D Gebäudekörper basiert für dieses Beispiel auf Luftbildern mit bekannten Parametern der inneren und äußeren Orientierung. Ausgehend von den Orientierungsparametern des Luftbilds können damit mittels der bekannten perspektiven Transformation nach Gleichung (2.15)

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c \frac{r_{11}(X_p - X_0) + r_{21}(Y_p - Y_0) + r_{31}(Z_p - Z_0)}{r_{13}(X_p - X_0) + r_{23}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0)} \\ y &= y_0 - c \frac{r_{12}(X_p - X_0) + r_{22}(Y_p - Y_0) + r_{32}(Z_p - Z_0)}{r_{13}(X_p - X_0) + r_{23}(Y_p - Y_0) + r_{33}(Z_p - Z_0)} \end{aligned} \quad (4.10)$$

korrespondierende Bildkoordinaten (x, y) für die Objektkoordinaten (X_p, Y_p, Z_p) der rekonstruierten 3D Gebäudekörper bestimmt werden. Vor der Verknüpfung der Bild- und Objektraumkoordinaten muss lediglich die Sichtbarkeit der einzelnen Flächen der Randwertbeschreibungen überprüft werden. Dies ist durch die Berechnung des Winkels zwischen der jeweiligen Flächennormale und der Richtung zum Aufnahmestandpunkt des Luftbilds einfach möglich. Nach der Verknüpfung von Objekt- und Bildkoordinaten erfolgt die Überlagerung der Gebäudeflächen mit den zugehörigen Bildausschnitten automatisch während der Visualisierung durch die jeweils eingesetzte Standardsoftware. Üblicherweise führen diese Programme während der Texturierung keine projektive Transformation der jeweiligen Bildausschnitte durch. Da für die Texturierung der einzelnen Flächenstücke jedoch nur jeweils kleine Ausschnitte des Luftbilds verwendet werden, ist der dadurch entstehende Fehler aufgrund der schwachen Perspektive vernachlässigbar.

Die Texturierung des in Abbildung 4-22 dargestellten Beispiels basiert lediglich auf einem Luftbild. Damit ist eine ansprechende Visualisierung der Fassaden lediglich aufgrund des bezüglich dieser Aufnahme optimal gewählten virtuellen Standpunkts möglich. Für viele Gebäudefassaden steht in Folge von Verdeckungen keine geeignete Luftbildtextur zur Verfügung. Zudem ist bei einer weiteren Annäherung des virtuellen Betrachters die verfügbare Auflösung des Bildes nicht mehr ausreichend. Dieser Effekt wird bei der Darstellung von Gebäudefassaden aufgrund des in diesem Fall ungünstigen Blickwinkels von Luftbilder noch verstärkt. In diesem Fall muss die Texturierung der Fassaden wie in Abbildung 4-23 dargestellt, durch terrestrisch erfasste Bilder ergänzt werden.



Abbildung 4-23: Visualisierung mit kombinierter Textur aus Luftbildern und terrestrischen Aufnahmen.

Die zur automatischen Texturierung nach Gleichung (4.10) benötigten Parameter der inneren und äußeren Orientierung werden für Luftbilder in der Regel über Standardverfahren der Aerotriangulation bestimmt und stehen deshalb häufig bereits als Resultat anderer Auswerteschritte zur Verfügung. Dies ist üblicherweise für terrestrische Bilder nicht der Fall. Die Texturierung von Gebäuden mit terrestrischen Bildern erfolgt deshalb in der Regel durch eine manuelle Verknüpfung einzelner Bildausschnitte mit den zugehörigen Fassadenflächen (Haala et al 1998a).

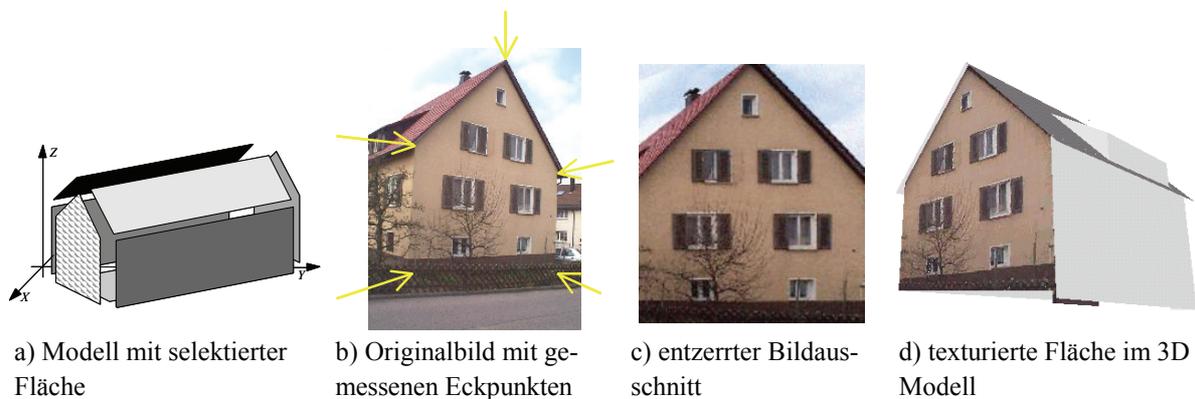


Abbildung 4-24: Verfahrensschritte zur manuellen Texturierung von Fassaden.

Die zur manuellen Texturierung der Fassaden notwendigen Schritte sind in Abbildung 4-24 dargestellt. Nach der Auswahl einer Fläche aus dem verfügbaren Gebäudemodell (Abbildung 4-24a) werden in der zugehörigen Aufnahme die Eckpunkte der abgebildeten Fassade manuell vorgegeben (Abbildung 4-24b). Damit ist die benötigte Korrespondenz zwischen Bild- und Objektpunktkoordinaten definiert, so dass im Prinzip wie im Fall der Luftbildtextur eine Visualisierung mit Standardsoftware erfolgen kann. Im Gegensatz zu Luftbildern kann bei der Verwendung terrestrischer Fassadenbildern die perspektive Verzerrung aufgrund des großen verwendeten Bildausschnitts und des häufig schrägen Blickwinkels nicht vernachlässigt werden. In diesem Fall müssen der Visualisierungssoftware bereits perspektiv entzerrte Bildausschnitt der Fassaden zur Verfügung gestellt werden. Für die perspektive Transformation der Fassaden kann Gleichung (4.10) zu

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{a_0 + a_1 X' + a_2 Y'}{1 + c_1 X' + c_2 Y'} \\
 y &= \frac{b_0 + b_1 X' + b_2 Y'}{1 + c_1 X' + c_2 Y'}
 \end{aligned}
 \tag{4.11}$$

vereinfacht werden, da für solche ebenen Objekte in einem lokalen, durch die jeweilige Fassadenfläche definierten Koordinatensystem $Z' - Z'_0 = 0$ gilt. Zur Bestimmung der acht Koeffizienten dieser ebenen Projektivtransformation müssen mindesten vier identische Punkte vorliegen, von denen nicht drei auf einer Geraden liegen dürfen. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass die innere Orientierung der zur Aufnahme verwendeten Kamera nicht bekannt sein muss. Die Koordinaten x_i, y_i entsprechen den in Abbildung 4-24b gemessenen Eckpunkten, X'_i, Y'_i ergeben sich aus den Koordinaten X_i, Y_i, Z_i des zugehörigen Gebäudepolygons. Eine direkte, näherungswertfreie Bestimmung der Parameter ist nach Umformung von Gleichung (4.11) mit

$$a_0 + a_1 X'_i + a_2 Y'_i - c_1 X'_i x_i - c_2 Y'_i x_i = x_i$$

$$b_0 + b_1 X'_i + b_2 Y'_i - c_1 X'_i x_i - c_2 Y'_i x_i = x_i$$

möglich. Mit Hilfe der so aus den Passpunkten bestimmten Transformationsparameter kann so die in Abbildung 4-24c dargestellte Entzerrung des Bildausschnitts erfolgen. Nach der Verknüpfung des entzerrten Bildes mit der zugehörigen Fläche des Gebäudes ist dann, wie Abbildung 4-24d zeigt, eine dreidimensionale Visualisierung mit Standardsoftware möglich.

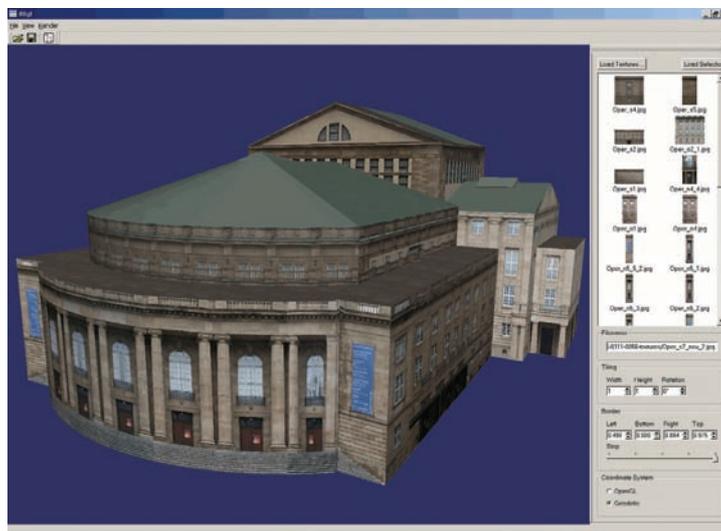


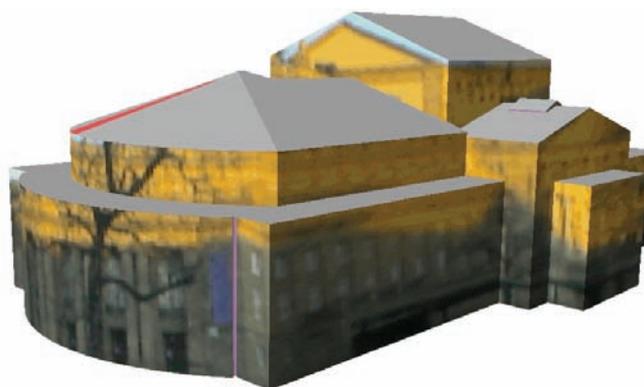
Abbildung 4-25: Softwaretool zur manuellen Texturierung von Gebäuden.



Abbildung 4-26: Texturierter Datensatz Stuttgart.

Abbildung 4-25 zeigt die graphische Nutzeroberfläche eines zur manuellen Texturierung von Gebäudefassaden entwickelten Programms. Dabei ist auf der linken Seite jeweils eine dreidimensionale Visualisierung des bearbeiteten Gebäudemodells dargestellt, mit der das jeweils zu bearbeitende Fassadenelement selektiert werden kann. Auf der rechten Seite der Oberfläche werden mit einem Browser die verfügbaren Texturen präsentiert, die dann manuelle mit den zugehörigen Fassadenelementen verknüpft werden. Mit diesem System wurden 500 Gebäude des Kernbereichs der Stadt Stuttgart texturiert, ein Ausschnitt dieses Datensatzes ist in Abbildung 4-26 dargestellt

Steht die innere und äußere Orientierung der terrestrischen Aufnahme zur Verfügung kann alternativ zur manuellen Verknüpfung der jeweiligen Bildausschnitte eine automatische Texturierung durchgeführt werden. In diesem Fall werden für die Objektkoordinaten des Gebäudemodells die zugehörigen Bildkoordinaten über die perspektive Transformation (4.10) bestimmt. Die vorhandenen Punktkorrespondenzen erlauben dann analog zur manuellen Texturierung die Entzerrung der jeweiligen Bildausschnitte und deren Verknüpfung mit den zugehörigen Fassadenpolygonen.



a) Terrestrisches Bild mit rekonstruiertem Gebäude b) Visualisierung mit automatisch extrahierter Textur.

Abbildung 4-27: Automatische Texturierung mittels terrestrischer Aufnahme.

Ein Beispiel für diesem Ansatz zeigt Abbildung 4-27, die Überlagerung des rekonstruierten Gebäudes in das zugehörige Bild ist dabei in Abbildung 4-27a, das Ergebnis der daraus resultierenden automatischen Texturierung in Abbildung 4-27b dargestellt.

4.4.2 Anforderungen an die Texturierung

Visualisierungen urbaner Umgebungen wie sie Abbildung 4-22 und Abbildung 4-23 dargestellt sind, werden üblicherweise für Anwendungen in Disziplinen wie Stadtplanung, Raumplanung und Architektur eingesetzt. In diesen Disziplinen ergänzen oder ersetzen 3D Visualisierungen zunehmend abstrakte Karten und Pläne beispielsweise als Mittel zur Information von Bürgern bei der Darstellung geplanter Vorhaben. Da diese Einsatzgebiete einen Schwerpunkt der Anwendung virtueller Stadtmodelle bilden, geben sie in vielen Fällen auch die Realitätsnähe vor, die für solche Visualisierungen zu erreichen ist.



a) Visualisierung der Stadt Lindau aus der Vogelperspektive mit Entfernung über 200m. Erstellt durch Überlagerung von DOM-Daten mit Luftbildtextur.



b) Visualisierung aus der Vogelperspektive. Erstellt durch Überlagerung von DHM und 3D Stadtmodell mit Luftbildtextur.



c) Visualisierung eines Stadtteils durch eine erhöhte Schrägaufnahme mit Entfernungen von 200m bis 5m. Zusätzliche Texturierung einzelner Fassaden durch terrestrische Bilder.



d) Visualisierung eines Platzes aus der Fußgängerperspektive. Für diese Darstellung wurde eine Texturierung der Fassaden durch terrestrische Bilder sowie die eine manuelle Verfeinerung der Gebäudegeometrien und Integration zusätzlicher Objekte durchgeführt.

Abbildung 4-28: Kategorien von Standpunkten bei der Visualisierung virtueller Stadtmodelle.

Empirische Studien zur Bewertung des Realitätsgrades von virtuellen Ansichten zeigen, dass die wichtigsten Faktoren für eine als realitätsnah empfundene Visualisierung die Überlagerung des Geländemodells mit hochauflösenden Orthobildern sowie die Präsenz von dreidimensional dargestellten Gebäuden ist (Lange 1999). Die Anforderungen an die Qualität der Darstellung des virtuellen 3D Stadtmodells ergeben sich dabei vor allem aus den jeweiligen Standpunkten des virtuellen Betrachters. Mögliche Standpunkte eines virtuellen Betrachters werden üblicherweise in drei Kategorien unterteilt, die exemplarisch auch in Abbildung 4-28 dargestellt sind (Danahy 1999). Die erste Kategorie virtueller Standpunkte geht von Höhen des Betrachters von über 200m aus und resultiert damit in Darstellungen aus der Vogelperspektive. Eine solche Visualisierung zeigt Abbildung 4-28a und Abbildung 4-28b am Beispiel eines virtuellen Modells der Stadt Lindau. In der Regel dienen solche Ansichten dazu, dem Betrachter einen Überblick über die ge-

samte Szene zu ermöglichen. Für die Texturierung der Beispiele in Abbildung 4-28a und Abbildung 4-28b wurden ausschließlich Luftbilder verwendet, die zeitgleich mit der LIDAR-Datenerfassung von einer Zeilenkamera erfasst wurden. Für diese Kategorie von Standpunkten ist häufig, wie in Abbildung 4-28a realisiert, eine Texturierung des aus Laserdaten abgeleiteten DOM ausreichend. Auf die Ableitung eines Geländemodells und die Erfassung der 3D Gebäudemodelle, die für die Visualisierung in Abbildung 4-28b genutzt wurde, kann so unter Umständen verzichtet werden. Die zweite Kategorie möglicher Standpunkte ist durch erhöhten Schrägaufnahmen aus einer Entfernung von 200m bis 2m definiert. Wie in Abbildung 4-28c demonstriert, ist für diese Anwendung der Einsatz dreidimensionaler Gebäudemodelle unabdingbar. Zudem müssen für diese Kategorie von Aufnahmestandpunkten teilweise bereits terrestrische Bilder für die Texturierung der Gebäudefassaden verwendet werden. Die in Abbildung 4-28c gezeigte erhöhte Schrägaufnahme dient vor allem der Beurteilung der räumlichen Anordnung von Gebäuden. Demgegenüber sollen Aufnahmen aus der Fußgängerperspektive den visuellen Eindruck von Personen wiedergeben. Wie das Beispiel in Abbildung 4-28d zeigt, stellt die Visualisierung eines solchen Standpunkts sehr hohe Anforderungen an die Auflösung der verwendeten Bilddaten und die Qualität der geometrischen Rekonstruktion. Aus diesem Grund wurde für die Erzeugung dieser Darstellung neben der Texturierung der Fassaden eine manuelle Verfeinerung der Gebäuderekonstruktion durchgeführt und zusätzliche Objekte der Umgebung in das virtuelle Modell integriert. Um die Anforderungen an die Auflösung der Bildtextur und die geometrische Detaillierung des Modells auf ein akzeptables Maß zu beschränken, wird für diese Kategorie von Visualisierungen die Aufnahmehöhe des virtuellen Standpunkts häufig auf Werte von 5m bis 3m über dem Boden begrenzt. Dadurch können extrem geringe Entfernungen zu den sichtbaren Objekten vermieden werden und der Betrachter hat dennoch den Eindruck eines virtuellen Spaziergangs.

Die Beispiele in Abbildung 4-28 zeigen, dass mit geringer werdendem Abstand des Betrachters von der jeweiligen Szene die Verfügbarkeit terrestrischer Fassadentextur für einen guten visuellen Eindruck immer wichtiger wird. Die bisher übliche manuelle Texturierung der Gebäudefassaden stellt deshalb in vielen Fällen einen erheblichen Engpass bei der Erzeugung virtueller Stadtmodelle dar. Um auch Fassadentextur effektiv bereitzustellen, müssen Verfahren zur automatischen Georeferenzierung terrestrischer Bilder zur Verfügung stehen. Ein solcher Ansatz, der auf der Basis des bereits erfassten dreidimensionalen Stadtmodells automatisch die äußere Orientierung terrestrischer Bilder bestimmt, wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

5 GIS-basierte Georeferenzierung terrestrischer Aufnahmen

Die Texturierung von Gebäudefassaden mit terrestrischen Aufnahmen ist eine wichtige Teilaufgabe während der Erfassung virtueller Stadtmodelle, die durch eine automatische Georeferenzierung terrestrischer Bilder gestützt werden kann. Darüber hinaus sind terrestrische Aufnahmen mit bekannter innerer und äußerer Orientierung neben flugzeug- oder satellitengestützter Bildern eine sehr wichtige Informationsquelle zur Erfassung von GIS-Daten. Mobile Mapping Systeme nutzen beispielsweise Stereoszenen, die von einem Fahrzeug aus aufgenommen werden, um Verkehrsinfrastruktur wie den Zustand und die Breite von Strassen oder die Lage von Verkehrszeichen zu erfassen (Grejner-Brzezinska et al 2002). Ein sehr stark wachsender Einsatzbereich orientierter terrestrischer Bilder entsteht zudem durch die zunehmende Verbreitung von Anwendungen der Augmented-Reality (erweiterte Realität) (Azuma et al 2001). Dabei werden Bildern der realen Welt mit graphischen Objekten überlagert, die sich aus einem zuvor erfassten Modell der Umgebung und der aktuellen Position und Orientierung des Nutzers ergeben. So können dem jeweiligen Nutzer beispielsweise in einem Stadtinformationssystem die Namen und die Funktion der sichtbaren Gebäude präsentiert werden.

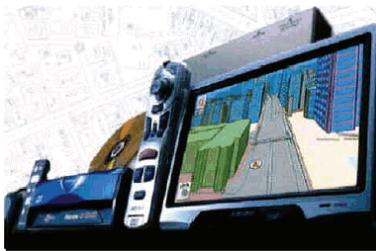
Sowohl bei der automatischen Texturierung von 3D Stadtmodellen als auch Augmented Reality Anwendungen stehen zusätzlich zu den terrestrischen Bildern jeweils GIS-Daten der Umgebung zur Verfügung. Damit ist die Georeferenzierung der terrestrischen Aufnahmen durch eine automatische Koregistrierung beider Datenquellen möglich. Mit der in diesem Kapitel vorgestellten GIS-basierten Georeferenzierung soll die äußere Orientierung terrestrischer Aufnahmen in urbanen Bereichen bestimmt werden. Das hierfür eingesetzte automatische Verfahren verbessert dazu die näherungsweise die gemessene äußere Orientierung terrestrischer Bilder durch eine Zuordnung von Gebäudesilhouetten zu den Objekten eines gegebenen 3D Stadtmodells (Haala et al 2002) (Haala & Böhm 2003). Da Augmented-Reality Anwendungen ein wichtiges Einsatzgebiet orientierter terrestrischer Bilder sind, werden einige solcher Anwendungen in Abschnitt 5.1 exemplarisch vorgestellt. Ein Schwerpunkt ist dabei die Diskussion der dazu benötigten Genauigkeiten der Bildorientierung. In Abschnitt 5.2 wird dann das entwickelte Verfahren zur GIS-basierten Orientierung terrestrischer Aufnahmen vorgestellt.

5.1 Orientierte Bilder zur Präsentation ortsbezogener Information

Navigationssysteme sind eine der wichtigsten Anwendungen, in denen ortsbezogene Information auf mobilen Endgeräten präsentiert wird. Vor allem in komplexen Stadtgebieten werden dabei zunehmend zweidimensionale kartenähnliche Darstellungen durch dreidimensionale Visualisierungen der Umgebung ergänzt oder ersetzt. Eine weitere Möglichkeit zur Präsentation ortsbezogener Information besteht darin, die Objekte eines solchen virtuellen Modells jeweils realen Bildern der aktuellen Umgebung des Nutzers zu überlagern. Abschnitt 5.1.1 stellt einige Beispiele vor, die solche Augmented-Reality Techniken zur Präsentation von Umgebungsinformation in Stadtgebieten nutzen. Ein Beispiel ist dabei der Zugriff auf objektspezifische Information durch einfaches Zeigen auf die interessierenden Bereiche in einem realen Bild der Umgebung. Abschnitt 5.1.2 stellt die prototypische Realisierung eines solchen Ansatzes vor, Abschnitt 5.1.3 diskutiert anhand dieses Beispiels die geforderte Genauigkeit, mit der zu diesem Zweck das Modell der Umgebung dem genutzten realen Bild überlagert werden muss.

5.1.1 Darstellung von Umgebungsinformation in Navigationsanwendungen

Üblicherweise werden für Navigationsanwendungen einfache zweidimensionale Darstellungen genutzt, in denen die aktuelle Position des Nutzers in eine Karte eingeblendet ist und der gesuchten Wege durch einfache Richtungspfeile präsentiert wird. In zunehmendem Masse werden jedoch die zweidimensionalen, kartenähnlichen Darstellungen durch dreidimensionale Visualisierungen der lokalen Umgebung des Nutzers ersetzt. Die daraus resultierende größere Realitätsnähe ermöglicht vor allem in komplexen urbanen Gebieten eine bessere Interpretierbarkeit der dargestellten Umgebungsinformation und erlaubt so dem Nutzer eine intuitive Orientierung und Navigation.



a) Fahrzeugnavigationssystem Nissan Birdview



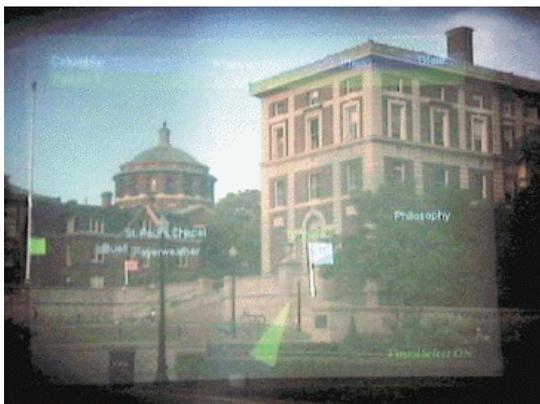
b) kommerzielles Personennavigationssystem Nokia Mobile City



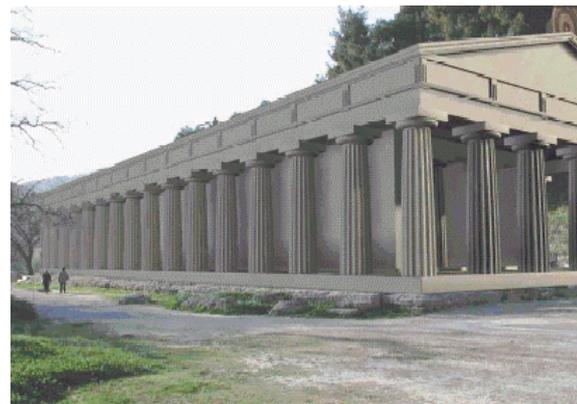
c) prototypisches Personennavigationssystem 3D City Info

Abbildung 5-1: Dreidimensionale Visualisierungen in Navigationsanwendungen.

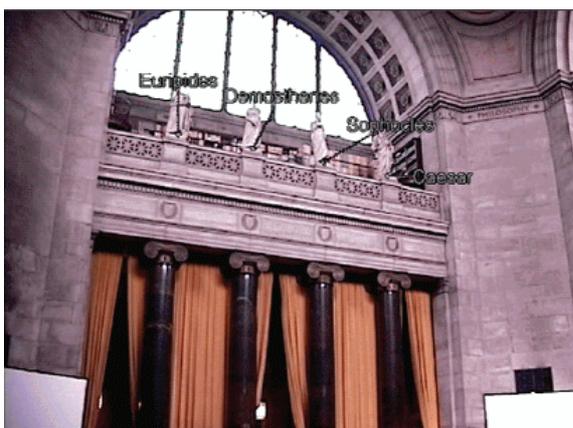
Abbildung 5-1 zeigt einige Beispiele für derzeit in Navigationssystemen realisierte dreidimensionale Darstellungen. Fahrzeugnavigationssysteme wie das in Abbildung 5-1a dargestellte Nissan Birdview nutzen – wenn überhaupt – nur relativ einfache dreidimensionale Visualisierungen. Da für einen Fußgänger die Aufnahme auch von größeren Mengen an visueller Information möglich ist, können im Gegensatz dazu für Personennavigationssysteme komplexere dreidimensionale Ansichten der aktuellen Umgebung generiert werden. Während das in Abbildung 5-1b dargestellte kommerzielle Personennavigationssystem Nokia Mobile City (Arcus Soft 2002) die zweidimensionale Kartendarstellung lediglich um eine dreidimensionale Visualisierung einzelner Gebäude ergänzt, die als Orientierungspunkte dienen, beinhalten Prototypen wie das in Abbildung 5-1c gezeigte 3D City Info System (Rakkolainen & Vainio 2001) eine vollständige dreidimensionale Darstellung der Umgebung.



a) Präsentation von Gebäudenamen



b) Darstellung zerstörter historischer Gebäude



c) Benennung architektonischer Details



d) Restaurantinformationssystem

Abbildung 5-2: Anwendungen von Augmented Reality Systemen in urbanen Umgebungen.

Neben der wirklichkeitsnahen Präsentation eines gesuchten Weges bieten viele Systeme zunehmend die Möglichkeit auf zusätzliche, objektbezogene Information in der Nähe des Nutzers zuzugreifen. Die Präsentation der objektbezogenen Information kann dabei auf der Basis einer virtuellen dreidimensionalen Darstellung der Umgebung erfolgen, die um zusätzliche graphische Objekte angereichert wird (Augmented Virtuality). Alternativ können diese graphischen

Elemente jedoch auch einem Bild der realen Umgebung überlagert werden (Augmented Reality). Einige Beispiele für die Anwendung solcher Systeme in urbanen Umgebung sind in Abbildung 5-2 dargestellt. Abbildung 5-2a zeigt ein Campus-Informationssystem, bei dem Gebäudenamen den korrespondierenden Objekten überlagert werden (Höllerer et al 2001). Die Darstellung des Modells eines rekonstruierten Tempels im Kontext der realen Umgebung für die Präsentation einer archäologischen Grabungsstätte zeigt Abbildung 5-2b (Vlahakis et al 2002). Ähnliche Anwendungen ermöglichen, wie in Abbildung 5-2c dargestellt, die Benennung architektonischer Details (Broll et al 2001) oder wie das Beispiel in Abbildung 5-2d zeigt, den Zugriff auf Restaurantinformation (Bell et al 2002). Augmented Reality Anwendungen werden dem Nutzer häufig mittels halbdurchlässiger Brillen präsentiert, die eine direkte Überlagerung der graphischen Objekte in das jeweils aktuelle Sichtfeld ermöglichen. Alternativ können die zur Präsentation der objektbezogenen Information erzeugten Darstellungen auch einem Bild der Umgebung überlagert werden. Zu diesem Zweck werden mit einer Videokamera Bilder in der jeweiligen Blickrichtung des Nutzer erfasst und nach der Überlagerung mit den graphischen Objekten dem Nutzer mittels einer Datenbrille präsentiert. Eine einfachere Alternative ist die Verwendung eines Handgeräts, in dem Kamera und Display integriert sind.

Die zu überlagernden graphischen Objekte werden basierend auf einem Modell der Umgebung (Augmented World Model) generiert. Dieses Modell beinhaltet eine dreidimensionale Repräsentation der aktuellen Umgebung beispielsweise in Form eines 3D Stadtmodell, die mit der zusätzlich darzustellenden Umgebungsinformation angereichert ist. Zur Überlagerung der realen Welt mit ortsbezogenen graphischen Objekten wird zudem die aktuelle Position und Blickrichtung des Betrachters beziehungsweise die äußere und innere Orientierung des verwendeten Aufnahmesystems benötigt.

5.1.2 Bildbasierter Zugriff auf Objektinformation

Die Koregistrierung von Bild und Augmented World Modell ermöglicht nicht nur die anschauliche Präsentation von ortsbezogener Information sondern erlaubt darüber hinaus einen intuitiven Zugriff auf objektbezogene Daten durch sogenanntes Telepointing. Wird mit einem mobilen Gerät simultan zu einer Bildaufnahme die Position und Orientierung der Kamera durch integrierte Sensoren erfasst, so ist die Zuordnung von Umgebungsmodell und Bild durch die bekannten perspektiven Abbildungsbeziehungen einfach möglich. Nach dieser Zuordnung sind die Objekte des Umgebungsmodells mit den zugehörigen Bildausschnitten verknüpft, so dass der Nutzer objektbezogene Information durch Zeigen auf die entsprechenden Bildbereiche einfach abrufen kann.

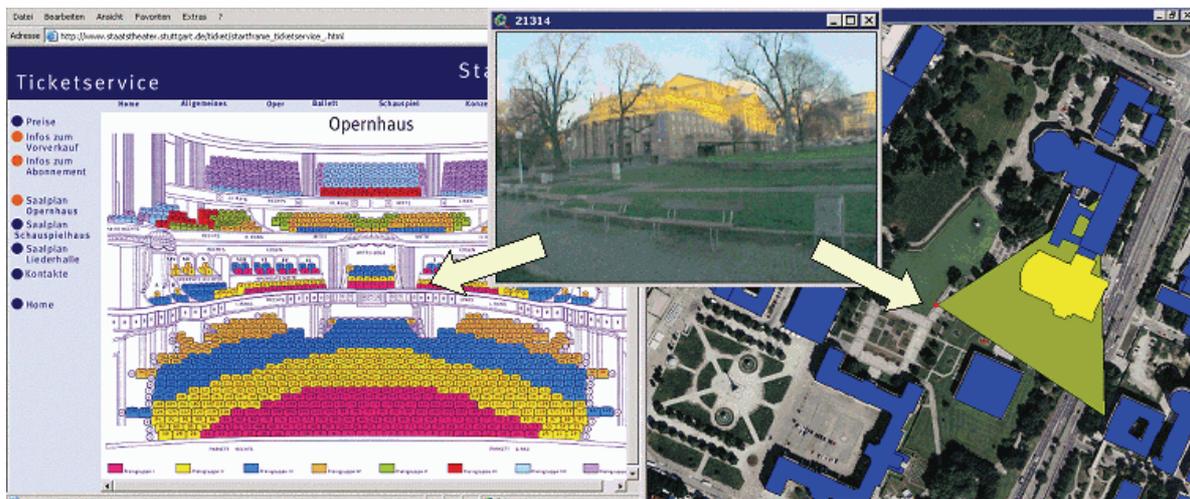


Abbildung 5-3: Zugriff auf objektbezogene Information durch Telepointing.

Ein solches System für den Zugriff auf objektbezogene Information durch Telepointing ist exemplarisch in Abbildung 5-3 dargestellt (Fritsch et al 2001). Zunächst wird ausgehend von der gemessenen Aufnahmeposition und -richtung sowie dem bekannten Öffnungswinkel der Kamera der Sichtbarkeitsbereich der Aufnahme berechnet. Der resultierende Kegel ist in Abbildung 5-3 dem Orthophoto überlagert. Mittels eines Standard-GIS werden Gebäude innerhalb dieses Kegels ausgewählt und die a priori mit diesen Objekten verknüpfte Information bereitgestellt. In dem Beispiel in Abbildung 5-3 wird so der Saalplan des betrachteten Theatergebäudes dargestellt und der Zugriff auf eine Kartenbestellung ermöglicht.

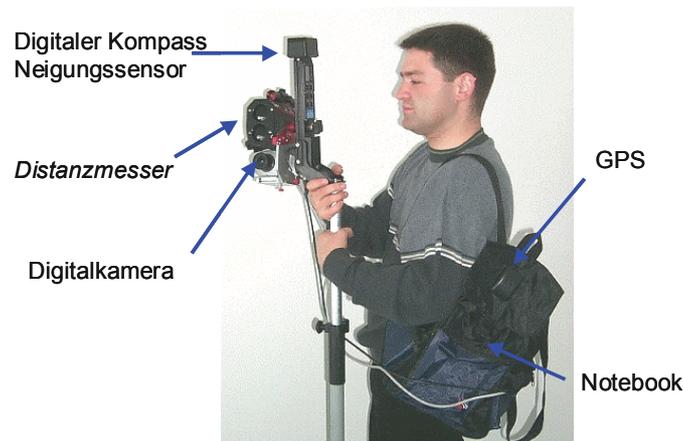


Abbildung 5-4: Polares Freihandmeßsystem zur Erfassung georeferenzierter terrestrischer Bilder.

Der für die Realisierung dieser Anwendung verwendete Prototyp in Abbildung 5-4 dargestellt. Das System zur Erfassung georeferenzierter terrestrischer Bilder besteht aus einer Standard-Videokamera, die mit einem preiswerten integrierten Sensorsystem zur Messung der Parameter der äußeren Orientierung verbunden wurde. In diesem zur Georeferenzierung genutzten kommerziellen polaren Freihandmeßsystem sind ein Handheld DGPS-Empfänger für die Positionierung, sowie ein digitaler Kompass und ein Neigungsmesser für die Bestimmung der Lageparameter integriert. Die Distanz zum anvisierten Objekt, die der ebenfalls integrierte Laserentfernungsmesser liefert, wird von dem System nicht genutzt. Alle in dem polaren Freihandmeßsystem integrierten Sensorkomponenten für die Georeferenzierung sind aufgrund ihrer kleinen Bauweise und relativ günstigen Herstellungskosten auch für einen Einsatz in einem mobilen System geeignet. Damit kann auch bei der Realisierung eines kleineren mobilen Systems von ähnlichen Sensorkomponenten ausgegangen werden; die Genauigkeit der Georeferenzierung mit der in Abbildung 5-4 dargestellten Hardware ist damit repräsentativ für zukünftige Systeme zur Präsentation ortsbezogener Information.

Das in Abbildung 5-4 dargestellte, kommerzielle polare Freihandmeßsystem wird üblicherweise für die terrestrische Erfassung von GIS-Daten im mittleren Maßstab bei geforderten Genauigkeiten im Bereich von ± 1 m genutzt. Die Positionierung wird bei diesen Systemen üblicherweise über eine differentielle Pseudorange-Messung durchgeführt. Bei dem in Abbildung 5-4 dargestellten System wird zu diesem Zweck der ALF-Dienst (Accurate Positioning by Low Frequency) genutzt. Die Genauigkeit solcher DGPS-Systeme wird generell bei Anwendungen in bebauten Gebieten durch Abschattung beziehungsweise durch Mehrwegeausbreitung des GPS-Signals limitiert. In Ortslagen ergeben sich damit Positionierungsgenauigkeiten im Bereich von 4m, die sich bei zunehmender Abschattung auf bis zu 8m reduzieren können (Resnik 2001). Die Bestimmung des Azimuts erfolgt bei polaren Freihandmeßsystem durch elektronische Magnetsensoren. Die mit solchen Systemen gemessenen Azimute haben eine Standardabweichung im Bereich von 0,5 bis 2gon. Da für die Winkelmessung die magnetische Richtkraft der Erde ausgenutzt wird, können in bewohnten Gebieten magnetische Störungen durch Autos, Stromversorgungsanlagen die Genauigkeit der Winkelmessung jedoch letztlich auf eine Größenordnung von 6-7gon reduzieren (Hoff & Azuma 2000).

Bei dem prototypisch realisierten System für den Zugriff auf objektbezogene Information durch Telepointing werden zunächst diejenigen Gebäudegrundrisse selektiert, die in dem berechneten zweidimensionalen Sichtkegel der Aufnahme enthalten sind. Nach dieser Auswahl ist, wie in Abbildung 5-3 dargestellt, bereits eine die Präsentation von gebäudebezogener Information möglich. Viele Anwendungen von Augmented Reality Systemen in urbanen Umgebungen können jedoch nicht auf eine zweidimensionale Auswertung beschränkt werden, da sie einen erheblich verfeinerten Raumbezug erfordern. Soll beispielsweise der Zugriff auf objektbezogene Information wie architektonische Details durch Zeigen im Bild zu ermöglichen werden, so ist jedoch eine exakte Koregistrierung des Bildes mit einem 3D Modell der Umgebung unumgänglich.

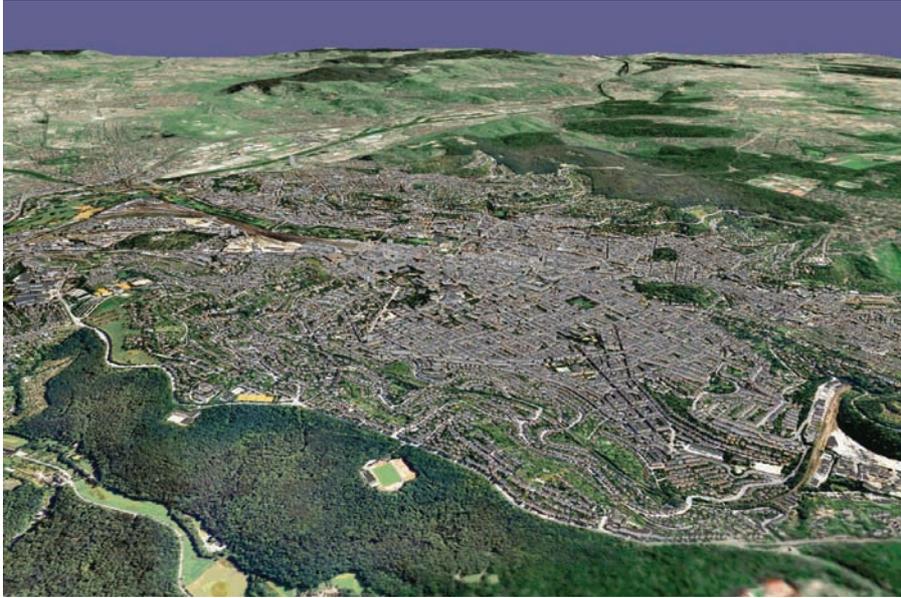


Abbildung 5-5: Verwendetes 3D Stadtmodell der Stadt Stuttgart.

Zu diesem Zweck wurde das in Abbildung 5-5 dargestellte Stadtmodell verwendet. Dieser vom Stadtmessungsamt der Stadt Stuttgart zur Verfügung gestellte Datensatz wurde aus einer photogrammetrischen Stereoauswertung mit einer Punktmessgenauigkeit von $\pm 30\text{cm}$ erstellt und steht flächendeckend für die komplette Innenstadt von Stuttgart zur Verfügung (Wolf 1999). Insgesamt sind darin Modelle von 36000 Gebäuden enthalten.

5.1.3 Genauigkeit der Koregistrierung

Nach der Auswahl der sichtbaren Gebäude durch das in Abbildung 5-4 dargestellte Verfahren erfolgt die Koregistrierung von Bild und 3D Gebäudemodell durch die perspektive Abbildungsbeziehung. Ausgehend von Gleichung (2.15) ergibt sich

$$\begin{aligned} x_p &= \frac{1}{m} (r_{11} (X_p - X_0) + r_{21} (Y_p - Y_0) + r_{31} (Z_p - Z_0)) \\ y_p &= \frac{1}{m} (r_{12} (X_p - X_0) + r_{22} (Y_p - Y_0) + r_{32} (Z_p - Z_0)) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Dabei entspricht die Maßstabszahl $m = \frac{\|\mathbf{X}_p - \mathbf{X}_0\|}{\|\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_0\|}$ dem Verhältnis der Länge $\|\mathbf{X}_p - \mathbf{X}_0\|$ des Abbildungsstrahls zwischen Projektionszentrum und Objektpunkt zu der Länge $\|\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_0\|$ des Strahls zwischen Projektionszentrum und Bildpunkt. Die Elemente r_{ik} repräsentiert wiederum die Rotationsmatrix $\mathbf{R}(\omega, \varphi, \kappa)$.

Die Standardabweichung der berechneten Bildkoordinaten ergibt sich durch die Kovarianzmatrix $\mathbf{D}(x_p, y_p)$, die nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz zu

$$\mathbf{D}(x_p, y_p) = \mathbf{A} \mathbf{D}(\omega, \varphi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0) \mathbf{A}' \quad (5.2)$$

berechnet wird. Die Designmatrix \mathbf{A} resultiert dabei aus der Ableitung von Gleichung (5.1) nach den fehlerbehafteten Größen $\omega, \varphi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0$, wobei zuvor die Elemente r_{ik} wieder in Abhängigkeit der Winkel ω, φ, κ gebracht werden. Zur Vereinfachung wird für die Aufstellung der Kovarianzmatrix $\mathbf{D}(\omega, \varphi, \kappa, X_0, Y_0, Z_0)$ der Beobachtungen von unkorrelierten Fehlern ausgegangen, zudem sei das verwendete Objektkoordinatensystem parallel zum Bildkoordinatensystem. Als Fehler der mit dem Freihandmeßsystem bestimmten Beobachtungen werden $\sigma_\omega, \sigma_\varphi, \sigma_\kappa = 6\text{gon}$ und $\sigma_{X_0}, \sigma_{Y_0}, \sigma_{Z_0} = 5\text{m}$ angesetzt. Die in das Bild zu transformierenden Objektkoordinaten \mathbf{X}_p seien fehlerfrei. Für die Bildaufnahme wurde eine Kamera mit einer Brennweite $c = 3.75\text{mm}$ verwendet. Damit gilt für einen Punkt in der Bildmitte $\|\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_0\| = c = 3.75\text{mm}$. Die Entfernung zum Objekt liegt in dem in Abbildung 5-3 dargestellten Beispiel in

einer Größenordnung von $\|\mathbf{X}_p - \mathbf{X}_0\| = 110\text{m}$. Bei einer Pixelgröße der Kamera von $7.44\mu\text{m}$ ergibt sich nach Gleichung (5.2) ein Fehler von 46 Pixel für die Koordinaten eines in die Bildmitte transformierten Gebäudepunktes. Bei einer Bildgröße von 640×480 Pixel bei der verwendeten Kamera entspricht dies in einem relativen Fehler von annähernd 10%.

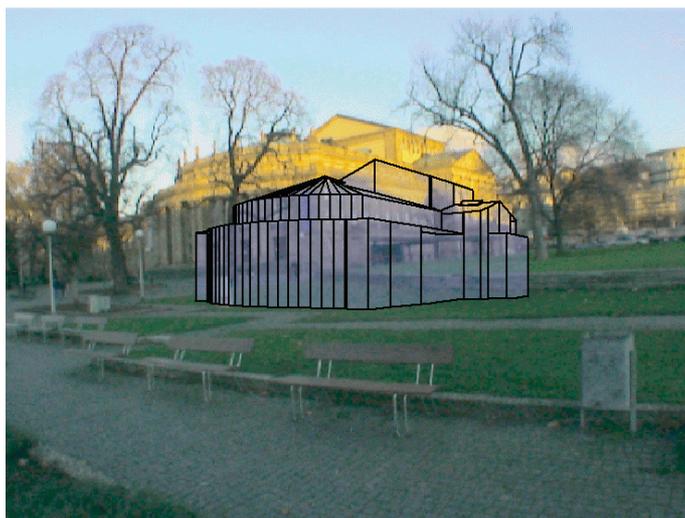


Abbildung 5-6: Überlagerung von Bild und Gebäudemodell mit gemessener äußerer Orientierung.

Dieser Wert wird durch die in Abbildung 5-6 dargestellte Überlagerung von Gebäudemodell und Bild mit den gemessenen Orientierungsparametern bestätigt. Dies verdeutlicht, dass die mit einem polaren Freihandmeßsystem erreichbare Genauigkeit der Modelltransformation für die Präsentation räumlich fein aufgelöster Information nicht ausreichend ist. In der Regel erlaubt die Genauigkeit der so gemessenen äußere Orientierung lediglich die Auswahl der sichtbaren Gebäude und die näherungsweise Einpassung der jeweiligen Gebäudemodelle in das aufgenommene Bild.

Zur Steigerung der Qualität der Bild-Modell Zuordnung muss demnach die Genauigkeit der direkten Georeferenzierung erhöht werden. Dies lässt sich durch den Einsatz hochwertiger GPS/INS Sensoren erreichen, die auch innerhalb von Systemen zur terrestrischen Erfassung von 3D Stadtmodelle zum Einsatz kommen (Bosse et al 2000) (Teller 2000). Für die Bereitstellung ortsbewusster Dienste durch mobile Standardgeräte ist der Einsatz solcher Sensoren jedoch aufgrund der damit verbundenen hohen Kosten nicht praktikabel. Zudem können in bebauten Bereichen auch mit hochwertiger Hardware Probleme bei der GPS-Positionierung auftreten, die eine ausreichend genaue Koregistrierung unmöglich machen. Neben dem Einsatz genauer und damit teurer Orientierungssensoren ist eine Genauigkeitssteigerung der Georeferenzierung auch durch eine automatische Zuordnung des Bildes zu dem abgebildeten 3D Gebäudemodell möglich.

5.2 Georeferenzierung terrestrischen Bildern mittels Gebäudesilhouetten

Die Grundidee der Georeferenzierung terrestrischer Bilder mittels Gebäudesilhouetten liegt in der Vereinfachung der angestrebten Bild-Modell Zuordnung auf ein zweidimensionales Problem. Dies ist möglich, da aus der näherungsweise verfügbaren äußeren Orientierung der Aufnahme eine zweidimensionale Ansicht des abgebildeten dreidimensionalen Modells berechnet werden kann. Nach einer Zuordnung des so erzeugten virtuellen Bildes zu der realen Aufnahme stehen Passpunkte zur Verfügung, die für eine exakte Bestimmung der äußeren Orientierung durch einen räumlichen Rückwärtsschnitt genutzt werden können.

Stehen bereits texturierte Gebäudemodelle zur Verfügung, dann kann daraus ein sehr realistisches virtuelles Bild der Umgebung ableitet werden. Dadurch ist eine bildbasierte Zuordnung zu dem zugehörigen realen Bild möglich (Coors et al 2000). Die für diese bildbasierte Zuordnung notwendige gute Übereinstimmung von realem und virtuellem Bild erfordert jedoch die Verfügbarkeit eines sehr detaillierten, texturierten Stadtmodells. In der Regel ist eine flächendeckende Bereitstellung solcher Modelle bedingt durch den großen Aufwand bei der Erfassung nicht möglich. Alternativ zu virtuellen Bildern können auch reale Aufnahmen zur Georeferenzierung verwendet werden. Die Zuordnung der aktuellen Aufnahme zu dem jeweiligen Referenzbild erfolgt in diesem Fall wiederum durch einen bildbasierten Ansatz. Mit Hilfe der bekannten Orientierungsparametern des Referenzbildes kann dann nach der Zuordnung die reale

Aufnahme georeferenziert werden (Vlahakis et al 2002). Ein Problem bei einem Einsatz dieses Verfahrens für größere Bereiche ist jedoch die aufwendigen Beschaffung und Bereitstellung der benötigten Referenzbilder.

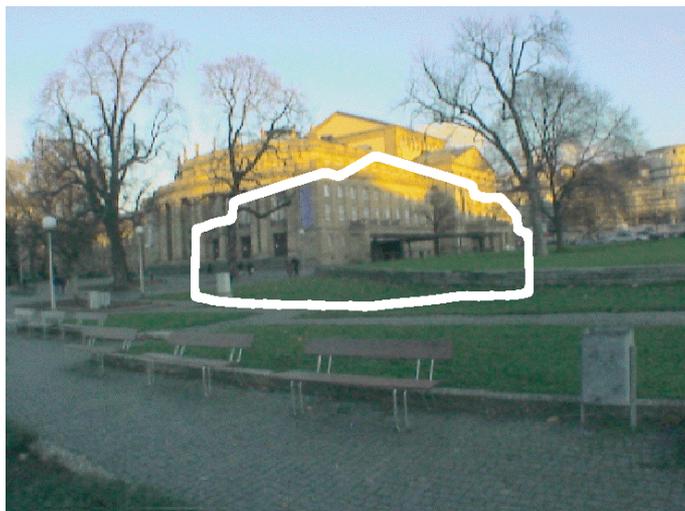


Abbildung 5-7: Silhouette des näherungsweise in das Bild projizierten Gebäudemodells.

Um die Anforderungen an die als Referenzdaten verwendeten Gebäudemodelle gering zu halten und insbesondere eine a priori Texturierung der Gebäude zu vermeiden, wird bei der Georeferenzierung mittels Gebäudesilhouetten eine merkmalsbasierte Zuordnung eingesetzt. In einem ersten Schritt wird zunächst aus der gemessenen Näherungsposition- und -orientierung des aufgenommenen Bildes ein Modell der Gebäudesilhouette abgeleitet. Hierfür wird das dreidimensionale Modell des sichtbaren Gebäudes genutzt. Das Ergebnis einer solchen Transformation eines Gebäudemodells mittels der gemessenen Parameter der äußeren Orientierung ist bereits in Abbildung 5-6. dargestellt. Aus dieser zweidimensionalen Ansicht des Modells lässt sich die in Abbildung 5-7 überlagerte Umrisslinie einfach ableiten. Um eine verbesserte Georeferenzierung des aufgenommenen Bildes zu ermöglichen, wird diese Umrisslinie in das aufgenommene Bild eingepasst. Hierfür muss eine entsprechende Translation, Rotation und Skalierung an dieses Silhouettenmodell angebracht werden. Eine automatische und robuste Bestimmung der gesuchten Parameter ist beispielsweise durch die formbasierte Zuordnung (shape-based-matching) möglich, die im Bereich der industriellen Bildverarbeitung eingesetzt wird.

5.2.1 Shape-Based-Matching - Formbasierte Zuordnung

Die automatische Erkennung vorgegebener Objekte eine Aufgabe, die häufig auch für Anwendungen im Bereich der industriellen Bildverarbeitung zu lösen ist. Mögliche Einsatzbereiche sind dabei beispielsweise die Qualitätskontrolle, optische Inspektion oder der Robotersteuerung machen eine notwendig. Im Rahmen der Objekterkennung ist nicht nur zu entscheiden, ob ein bestimmtes Objekt im Bild vorhanden ist, sondern es wird auch eine Lokalisierung durchgeführt, bei der zusätzlich die geometrischen Transformationsparameter zwischen Bild und Modells bestimmt werden. Häufig wird die Objekterkennung auf 2D Ansätze reduziert da vor allem bei industriellen Anwendungen der Einsatz von 3D CAD Modellen zu zeitaufwändig wäre. Damit reichen die zu bestimmenden geometrischen Transformationsparameter zwischen Bild und Modell abhängig von der jeweiligen Anwendung von einfachen Verschiebungen über Ähnlichkeitstransformationen bis hin zu allgemeinen 2D Affintransformationen. Diese werden häufig als Näherung für die perspektive Transformation eingesetzt, denen das abgebildete Objekt tatsächlich unterworfen ist.

Im Rahmen des Objekterkennungsprozesse werden die zulässigen geometrischen Transformationsparameter systematisch an das zuzuordnende 2D Modell angebracht und anschließend die Ähnlichkeit zwischen Bild und Modell durch ein geeignetes Maß bestimmt. Da im Bereich der industriellen Bildverarbeitung das zu lokalisierende 2D Modell aus einem Bild des gesuchten Objekts abgeleitet wird, basiert die Objekterkennung im einfachsten Fall direkt auf den Grauwerten des Modells und des Suchbildes. Als Ähnlichkeitsmaß dient in diesem Fall die normierte Kreuzkorrelation oder die Summe der Grauwertdifferenzen zwischen transformiertem Modell und Suchbild. Für die GIS-basierte Georeferenzierung wurden Gebäudesilhouetten durch eine formbasierte Zuordnung (shape-based-matching) in den terrestrischen Aufnahmen zu lokalisiert (Steger 2002). Dabei wurde die Realisierung dieses Ansatzes innerhalb der Bildverarbeitungsumgebung HALCON der MVTec Software GmbH genutzt.

In diesem Ansatz wird das zu erkennende 2D Objektmodell, d.h. die gesuchte Gebäudesilhouette durch eine Menge von Punkten $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i)^T$, $i = 1, \dots, n$ repräsentiert. Üblicherweise werden diese Punktkoordinaten jeweils auf den Schwerpunkt des gesuchten Modells bezogen. Für die Punkte \mathbf{p}_i werden zusätzlich jeweils Richtungsvektoren $\mathbf{d}_i = (t_i, u_i)^T$ bestimmt, die sich beispielsweise durch einen geeigneten Ableitungsoperator aus der gegebenen Gebäudesilhouette berechnen lassen. Innerhalb des zu untersuchenden Bild wird für jeden Bildpunkt $(x, y)^T$ ebenfalls ein Richtungsvektor $\mathbf{e}_{x,y} = (v_{x,y}, w_{x,y})^T$ durch einen Ableitungsoperator bestimmt.

In dem Zuordnungsprozess wird dann bestimmt für welche geometrische Transformationsparameter die größte Übereinstimmung zwischen Modell und Bild besteht. Im allgemeinsten Fall wird von einer Affintransformation zwischen Bild und Modell ausgegangen. Dabei ist es sinnvoll, die in der Affintransformation enthaltene Translation von dem linearen Anteil zu trennen. Das geometrisch transformierte Modell \mathbf{p}'_i ergibt sich somit durch Multiplikation mit der Transformationsmatrix $\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$ und ist somit definiert durch die Punkte $\mathbf{p}'_i = \mathbf{A}\mathbf{p}_i$ sowie den zugehörigen transformierten Richtungsvektoren $\mathbf{d}'_i = \mathbf{A}\mathbf{d}_i$. Häufig beinhaltet die Transformationsmatrix nicht vier unabhängigen Parametern a_{11}, \dots, a_{22} , sondern es wird damit lediglich eine Rotation und Skalierung des Modells realisiert. Im Rahmen der Zuordnung wird dann das solchermaßen transformierte Modell $\mathbf{p}'_i = \mathbf{A}\mathbf{p}_i$ mit dem Bild an der Position $\mathbf{q} = (x, y)^T$ verglichen, wobei \mathbf{q} den translativen Anteil an der gesuchten geometrischen Transformation repräsentiert.

Für diesen Vergleich von Bild und Modell ist ein geeignetes Ähnlichkeitsmaß bereitzustellen, das unabhängig von Störungen durch Verdeckungen oder Änderungen der Beleuchtung ist. Die grundlegende Idee der formbasierten Zuordnung besteht darin, als Ähnlichkeitsmaß das normalisierte Skalarprodukt der Gradientenvektoren zu verwenden. Damit ergibt sich dieses Ähnlichkeitsmaß ergibt sich zu:

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\langle \mathbf{d}'_i, \mathbf{e}_{q+p'} \rangle}{|\mathbf{d}'_i| \cdot |\mathbf{e}_{q+p'}|} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{t'_i v_{x+x'_i, y+y'_i} + u'_i w_{x+x'_i, y+y'_i}}{\sqrt{t_i^2 + u_i^2} \cdot \sqrt{v_{x+x'_i, y+y'_i}^2 + w_{x+x'_i, y+y'_i}^2}} \quad (5.3)$$

Insbesondere durch die Normierung der Richtungsvektoren der Bildpunkte wird eine größerer Unabhängigkeit gegenüber Belichtungsänderungen erreicht. Eine Beschleunigung der Zuordnung wird wie bei solchen Verfahren üblich durch eine Erzeugung einer Pyramide erreicht, die das Modell in verschiedenen Auflösungen enthält. Darüber hinaus lässt sich die Rechengeschwindigkeit und damit die Effizienz der formbasierten Zuordnung durch die Vorgabe von sinnvollen Wertebereiche für die gesuchten Transformationsparameter deutlich steigern. Eine Berechnung der Suchbereiche ist bei der Lokalisierung von Gebäudesilhouetten mit der in Abschnitt 5.1.2 diskutierten Genauigkeitsanalyse für die Transformation des Objektmodells aus den gemessenen Parametern der äußeren Orientierung einfach möglich.

Um potentielle Zuordnungen zu identifizieren, erfolgt eine umfassende Suche auf der obersten Pyramidenstufe, d.h. das Ähnlichkeitsmaß wird für alle möglichen Positionen, Orientierungen und Maßstabsparameter berechnet. Nach der Identifizierung möglicher Zuordnungen werden diese durch die verschiedenen Stufen der AuflösungsPyramide verfolgt, bis die Lokalisierung auf der untersten Stufe, d.h. der höchsten Auflösung des Bildes erfolgt. Um die Genauigkeit der Objektlokalisierung weiter zu steigern, wird nach Erreichen der untersten Pyramidenstufe ein Polynom zweiter Ordnung mit den vier Unbekannten der geometrischen Transformation in eine $3 \times 3 \times 3$ Nachbarschaft des gefundenen maximalen Zuordnungswerts eingepasst. In kontrollierten industriellen Umgebungen sind so Zuordnungsgenauigkeiten von 1/20 Pixel erreichbar (Ulrich & Steger 2002).

5.2.2 Zuordnung der Gebäudesilhouetten

Durch die formbasierte Zuordnung werden die Parameter $x_{ref}, y_{ref}, m, \alpha$ einer ebenen Ähnlichkeitstransformation bestimmt, die nach

$$\begin{aligned} x_{SBM} &= x_{ref} + m \cdot x_{DG} \cdot \cos \alpha - m \cdot y_{DG} \cdot \sin \alpha \\ y_{SBM} &= y_{ref} + m \cdot x_{DG} \cdot \sin \alpha + m \cdot y_{DG} \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (5.4)$$

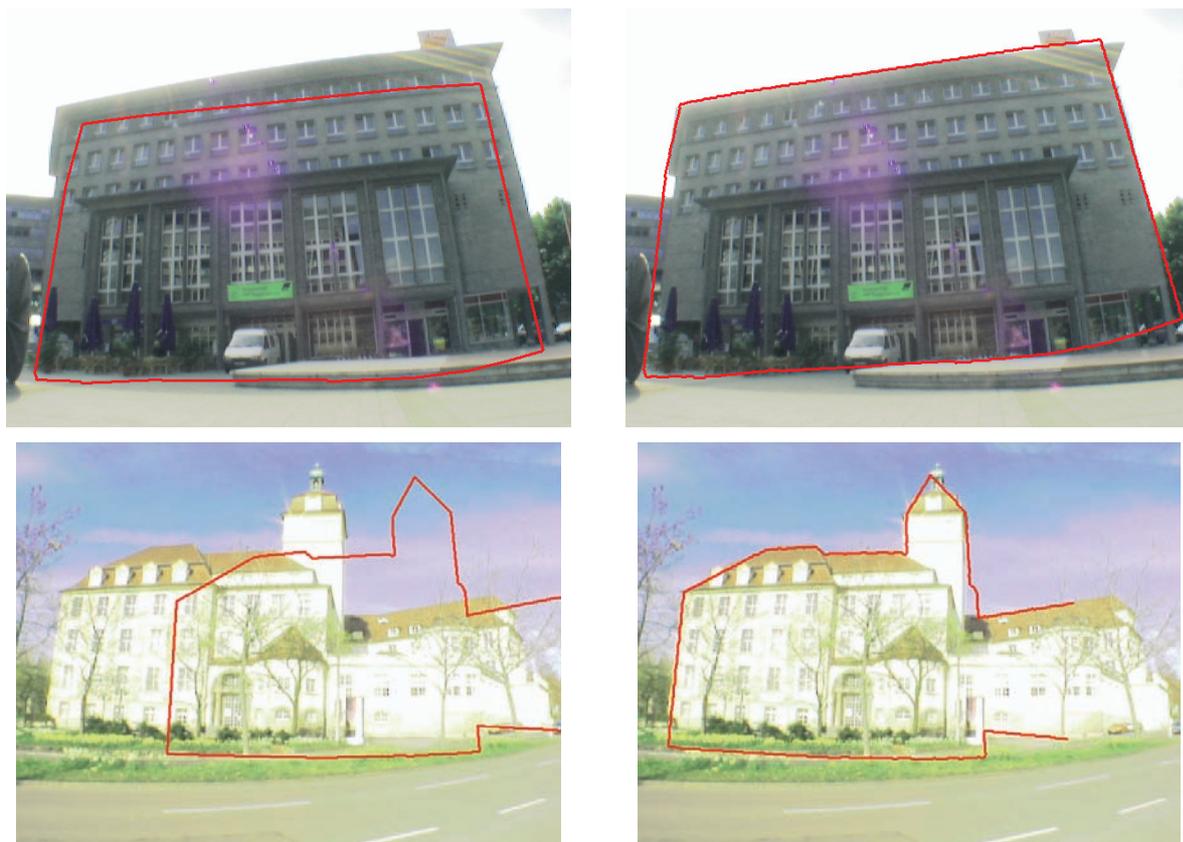
eine Einpassung der Gebäudesilhouette in das aufgenommene Bild ermöglichen. In Gleichung (5.4) repräsentiert dabei x_{DG}, y_{DG} die Bildkoordinaten der in Abbildung 5-7 dargestellten Näherungssilhouette, die Bildkoordinaten der Sil-

houette nach der Zuordnung durch die formbasierte Zuordnung sind mit x_{SBM}, y_{SBM} bezeichnet. Das Ergebnis der Einpassung zeigt Abbildung 5-8.



Abbildung 5-8: Gebäudesilhouette nach der Einpassung durch die GHT.

Abbildung 5-9 stellt weitere Ergebnisse der Zuordnung von Gebäudesilhouetten in terrestrischen Bildern dar.



a) Fassadenbild Näherungssilhouette.

b) Fassadenbild mit eingepasster Silhouette.

Abbildung 5-9: Zuordnung von Gebäudesilhouetten mit der formbasierten Zuordnung.

Abbildung 5-9a zeigt jeweils die aus den direkt gemessenen Orientierungsparametern berechnete Silhouette des Gebäudes, die dem aufgenommenen Bild überlagert wurden. Die dazu verwendeten Gebäudemodelle sind Bestandteile des in Abbildung 5-5 dargestellten Stadtmodells. Wie die eingepassten Silhouetten in Abbildung 5-9b zeigen konnte in allen Fällen eine Zuordnung erreicht werden. Da die Silhouette eines Gebäudes in der Regel ein eindeutiges Merkmal darstellt, ist eine Zuordnung und Lokalisierung in terrestrischen Bildern in der Regel zuverlässig möglich. Durch die

Verwendung der kompletten Gebäudeform wird zudem eine relativ geringe Empfindlichkeit gegenüber Bildstörungen erreicht, die Zuordnung wird somit in der Regel nicht durch teilweise Verdeckungen des Gebäudes durch Bäume, Fußgänger oder Fahrzeuge beeinflusst.

In den Ergebnissen der Zuordnung in Abbildung 5-9 sind verbleibende Abweichungen zwischen der eingepassten 2D Objektform und dem Bild der Fassade erkennbar. Diese Abweichungen entstehen bei der Erzeugung der 2D Referenzform aufgrund von Abweichungen des zugrundeliegenden 3D Gebäudemodells von der Realität sowie aus Fehlern der verwendeten Näherungstransformation. Trotz einer gewissen Toleranz der formbasierten Zuordnung gegenüber solchen Abweichung sollten diese Fehler nicht größer als einige Dezimeter im Objektraum werden, um eine erfolgreiche automatische Zuordnung zu ermöglichen.

5.2.3 Bestimmung der äußeren Orientierung

In einem weiteren Schritt werden aus den verbesserten Bildkoordinaten Passpunkte abgeleitet, die eine verbesserte Georeferenzierung des Bildes und damit eine exakte Transformation des Gebäudemodells in das Bild, wie in Abbildung 5-10 dargestellt zu ermöglichen.



Abbildung 5-10: Automatisch eingepasstes Gebäudemodell.

Die Bestimmung der Passpunkte erfordert die Bildung von Paaren korrespondierender Bild- und Objektpunktkoordinaten. Die Koordinaten x_{DG}, y_{DG} der Näherungssilhouette werden direkt den Objektkoordinaten des Modell abgeleitet. Mit den Objektkoordinaten \mathbf{X}_p des Gebäudemodells und den direkt gemessenen Parametern der äußeren Orientierung $\mathbf{X}_0^{DG}, \omega^{DG}, \varphi^{DG}, \kappa^{DG}$ ergibt sich nach Gleichung (2.15)

$$\mathbf{x}_{DG} = \frac{1}{m} \mathbf{R}^T (\omega^{DG}, \varphi^{DG}, \kappa^{DG}) \cdot (\mathbf{X}_p - \mathbf{X}_0^{DG}) \quad (5.5)$$

Nach der Lokalisierung der Gebäudesilhouette durch formbasierte Zuordnung sind durch die Bestimmung der Transformationsparameter $x_{ref}, y_{ref}, m, \alpha$ diese Näherungskoodinaten x_{DG}, y_{DG} wiederum mit den verbesserten Bildkoordinaten x_{SBM}, y_{SBM} nach Gleichung (5.4) verknüpft. Damit ergeben sich durch die Kombination der Gleichungen (5.4) und (5.5) direkt Paare korrespondierender Punktkoordinaten $\mathbf{x}_{SBM}, \mathbf{X}_p$ auf der Umrisslinie des Gebäudes, die als Passpunkte verwendet werden können.

Unter Verwendung dieser Passpunkte kann dann die korrekte äußere Orientierung des aufgenommenen Bildes aus einem räumlichen Rückwärtsschnitt bestimmt werden. Werden die so korrigierten Parameter der äußeren Orientierung mit $\mathbf{X}_0^{korr}, \omega^{korr}, \varphi^{korr}, \kappa^{korr}$ bezeichnet so wird hierfür nach Gleichung (2.14) die Beziehung

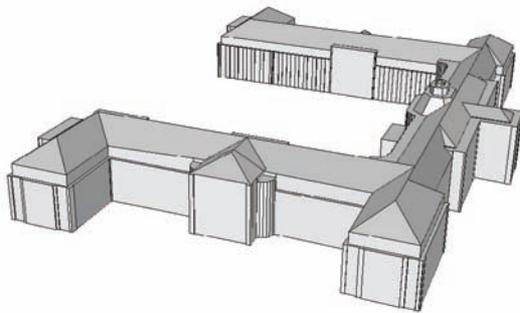
$$\mathbf{X}_p = \mathbf{X}_0^{korr} + m \cdot \mathbf{R} (\omega^{korr}, \varphi^{korr}, \kappa^{korr}) \cdot \mathbf{x}_{GHT} \quad (5.6)$$

angesetzt. Anschließend wird mit den so bestimmten Orientierungsparametern das komplette Gebäudemodell

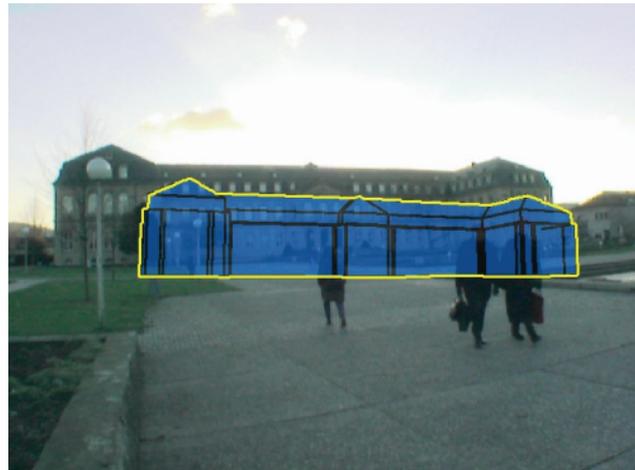
$$\mathbf{x}_{\text{korr}} = \frac{1}{m} \mathbf{R}^T (\omega^{\text{korr}}, \varphi^{\text{korr}}, \kappa^{\text{korr}}) \cdot (\mathbf{X}_p - \mathbf{X}_0^{\text{korr}}) \quad (5.7)$$

korrekt in das Bild transformiert. Das Ergebnis zeigt Abbildung 5-10.

Die zur Korrektur der Bildkoordinaten der Gebäudesilhouette nach Gleichung (5.4) verwendete ebene Ähnlichkeitstransformation ist eine Annäherung einer perspektiven Transformation des Objektmodells. Um den durch diese Näherung entstehenden Fehler zu minimieren, kann nach der Transformation des Gebäudemodells in das Bild nach Gleichung (5.7) die äußere Orientierung nochmals verbessert werden. Zu diesem Zweck wird die Bestimmung der Orientierungsparameter formbasierter Zuordnung und Rückwärtsschnitt wiederholt. Bei dem in Abbildung 5-10 dargestellten Beispiel ergeben sich durch diese iterative Verbesserung jedoch keine signifikante Verbesserung, die verbleibenden Abweichungen von Modell und Bild resultieren zum größten Teil aus der Generalisierung des Gebäudemodells oder Messfehlern bei der Erfassung der Objektkoordinaten.



a) 3D Gebäudemodell



b) Überlagerung mit direkter Georeferenzierung



c) Lokalisierte Silhouette und Projektion des Gebäudes basierend auf verbesserten Orientierungsparametern

Abbildung 5-11: GIS-basierte Georeferenzierung – Beispiel Neues Schloss.

Ein weiteres Beispiel für die Einpassung eines Gebäudemodells durch die formbasierte Zuordnung mit einem anschließenden räumlichen Rückwärtsschnitt ist in Abbildung 5-11 dargestellt. Abbildung 5-11a zeigt eine dreidimensionale Darstellung des verfügbaren Gebäudemodells. Die Überlagerung dieses Modells in das aufgenommene Bild mittels der gemessenen Parameter der äußeren Orientierung ist in Abbildung 5-11b gestellt. Die für die anschließend durchgeführte formbasierte Zuordnung verwendete Gebäudesilhouette wird durch gelbes Polygon repräsentiert. Abbildung 5-11c zeigt diese Gebäudesilhouette nach der Lokalisierung durch die formbasierte Zuordnung. Zusätzlich ist das Gebäudemodell, das mit den verbesserten Parametern der äußeren Orientierung in das Bild transformiert wurde dargestellt. Die Einpassung der Gebäudesilhouette wurde nach Gleichung (5.4) durch eine ebene Ähnlichkeitstransformation angenähert, für die Abbildung des Modells nach Gleichung (5.7) wurde eine perspektive Transformation

verwendet. Dies resultiert in Abbildung 5-11c zu leichten Differenzen zwischen der dargestellten Silhouette und den sichtbaren Linien des Gebäudemodells.

Abweichungen zwischen dem Drahtmodell des rekonstruierten Gebäudes und den zugehörigen Elementen der Fassadenbilder resultieren in der Regel weniger aus einer ungenügenden Georeferenzierung der terrestrischen Bilder, sondern entstehen durch Abweichungen des Gebäudemodells von der Realität. Diese ergeben sich während der photogrammetrischen Erfassung sowohl durch die Generalsierung des dreidimensionalen Gebäudemodells als auch durch die eingeschränkte Genauigkeit der photogrammetrischen Punktbestimmung in den hierfür verwendeten Luftbildern. Damit können die orientierten terrestrischen Bilder nicht nur wie in Abbildung 4-27 demonstriert, zur automatischen Texturierung von Gebäudefassaden, sondern aufgrund ihrer höheren Auflösung auch für eine Verbesserung des zugrundeliegenden geometrischen Modells verwendet werden. Für den in Abschnitt 5.1 diskutierten bildbasierten Zugriff auf ortsbezogene Information ist die Qualität der Koregistrierung von Bild und Modell in jedem Fall ausreichend. Damit zeigt das Verfahren der GIS-basierten Georeferenzierung terrestrischer Aufnahmen exemplarisch das Automatisierungspotential photogrammetrischer Aufgabenstellung durch die Integration verschiedener Informationsquellen. In diesem Fall wurden sowohl Sensoren zur direkten Messung der äußeren Orientierung als auch existierende GIS-Daten eingesetzt. Darüber hinaus zeigen die Anwendungsbeispiele eines solchen Verfahrens, wie durch den Einsatz von Multi-Sensor-Systemen photogrammetrische Techniken auch außerhalb der traditionellen Einsatzgebiete der GIS-Datenerfassung genutzt werden können.

6 Diskussion und Ausblick

Mit dieser Arbeit wurde das Potential von Multi-Sensor-Systemen zur Automatisierung photogrammetrischer Auswerteaufgaben an verschiedenen Beispielen aufgezeigt. Die dabei vorgestellten Ansätze ermöglichen die Kombination von direkter Georeferenzierung und Aerotriangulation, die Integration von Bild- und Höhendaten für die automatische Erfassung topographischer Objekte, die GIS-gestützte Segmentierung und Strukturierung dichter Höhenmodelle für die Rekonstruktion von Gebäudemodellen sowie die Zuordnung terrestrischer Bilder zu Umgebungsmodellen für die Präsentation objektbezogener Information.

Der Vorteil der diskutierten Entwicklungen von Multi-Sensor-, Multi-Daten-Systemen liegt vor allem in der Möglichkeit, mit solchen Ansätzen Aufgaben wie die Bildorientierung, die Rekonstruktion von Objektgeometrie und die Bildinterpretation effizient und flexibel zu lösen. Die Verbreitung dieser Ansätze wird zusätzlich durch die derzeitige stürmische Entwicklung photogrammetrischer Aufnahmesysteme verstärkt. Ein Beispiel ist der Einsatz von Farb- oder Multispektralbildern für die photogrammetrische Erfassung topographischer Information. Mit den bisher in der Luftbildphotogrammetrie verwendeten analogen Filmen ist im Gegensatz zu direkt digital erfassten Bildern eine reproduzierbare spektrale Messung nur sehr eingeschränkt möglich. Die photogrammetrische Nutzung von Multispektraldaten wurde deshalb lange durch die analoge Bildaufnahme gebremst. Die Verfügbarkeit kommerzieller digitaler Luftbildkameras und die damit einhergehende verbesserte Erfassung multispektraler Daten führt damit dazu, dass die Auswertung geometrisch hochauflösender Multispektraldaten erheblich an Bedeutung gewinnt. Die Erfassung solcher Daten im Rahmen photogrammetrischer Anwendungen resultiert dabei auch in einer zunehmenden Annäherung wenn nicht gar Verschmelzung der Photogrammetrie mit der Fernerkundung, deren Grundidee die Auswertung von Aufnahmen in verschiedenen Spektralbereichen zur Attributierung von Regionen ist.

Eine solche Klassifizierung multispektraler Bilddaten für die Erfassung von GIS-Daten kann insbesondere in komplexen bebauten Gebieten durch die zusätzliche Nutzung von Höhendaten erheblich verbessert werden. Um hierfür eine qualitativ hochwertige Datengrundlage zu erhalten, werden in der Regel flugzeuggetragene Laserscanner eingesetzt. Ein solches aus Kamera und LIDAR-Sensor bestehendes System unterstützt nicht nur die thematische Auswertung, sondern wird auch für rein geometrisch orientierte Aufgabenstellungen wie die Orthophotoproduktion in bebauten Gebieten genutzt. Trotz der wachsenden Einsatzmöglichkeiten werden solche Multi-Sensor-Systeme derzeit noch nicht standardmäßig für eine gemeinsame flächendeckende Erfassung von Bild- und Höhendaten eingesetzt. Dies liegt in dem größeren Flugaufwand begründet, der beim Einsatz von Laserscannern entsteht. Die relativ geringe Flächenleistung von Laserscannern resultiert aus der maximalen Flughöhe von typischerweise 1000m, die durch die Reichweite der Laufzeitmessungen vorgegeben ist, sowie aus der maximalen Messfrequenz, die bei dieser Höhe die erreichbare Punktdichte auf 1m beschränkt. Im Vergleich dazu sind mit photogrammetrischen Kameras Flughöhen von über 2000m bei Pixelgrößen von 10cm und einer erheblich größeren Überdeckung des Geländes üblich. Aufgrund der stürmischen Entwicklung flugzeuggetragener Laserscanner sind jedoch in Zukunft höhere Messfrequenzen und Reichweiten der LIDAR-Sensoren zu erwarten. Damit wird eine Datenerfassung mit integrierten Systemen bei nur geringen Zusatzkosten ermöglicht.

Die flugzeuggetragene Erfassung von Höhendaten mit LIDAR-Systemen basiert auf einem scannenden Verfahren. Somit ist analog zu der diskutierten geometrischen Auswertung von Zeilenbildern auch bei diesen Systemen die direkte Bestimmung der äußeren Orientierung durch ein GPS/inertial-System unumgänglich. In der Vergangenheit war für die direkte Georeferenzierung von LIDAR-Daten aufgrund der begrenzten Reichweite und Punktdichte eine vergleichsweise geringe Genauigkeit der gemessenen Orientierungsparameter ausreichend. Mittlerweile führt jedoch die gesteigerte Leistungsfähigkeit der LIDAR-Sensoren auch hier zu wachsenden Genauigkeitsanforderungen. Diese machen den Einsatz einer kombinierten Aerotriangulation zur Genauigkeitssteigerung und Kalibrierung des Gesamtsystems notwendig. Analog zur diskutierten Georeferenzierung von Bilddaten ist dabei die Bereitstellung von Pass- und Verknüpfungspunkten erforderlich. Die Messung dieser Punkte kann jedoch vor allem in flachen Bereichen aufgrund der fehlenden dreidimensionalen Struktur von Höhendaten zu Schwierigkeiten führen. Zur Lösung dieses Problems wird von einigen LIDAR-Systemen neben der Laufzeit auch die reflektierte Intensität des ausgesendeten Laserpulses erfasst. Damit steht ein monochromatisches Bild in der Wellenlänge des Lasers zur Verfügung, das perfekt mit den Höhendaten koregistriert ist. In diesem Bild kann dann eine Identifizierung und Zuordnung von Pass- und Verknüpfungspunkten vergleichsweise einfach durchgeführt werden. Darüber hinaus ist so auch eine einfache Verknüpfung und gemeinsame Auswertung mit Bildern anderer Kameras möglich. Auch hier profitiert die geometrische Auswertung von der gleichzeitigen Verfügbarkeit von Bild- und Höhendaten.

Das Potential von Multi-Sensor-Systemen für die thematische Auswertung wurde in dieser Arbeit hauptsächlich anhand von Daten flugzeuggetragener Systeme diskutiert. Darüber hinaus wird die kombinierte Aufnahme und Auswertung von Bild- und Geometriedaten in immer größerem Maße auch für terrestrische Anwendungen im Nahbereich eingesetzt. Terrestrische Laserscanner liefern schon jetzt zunehmend die Datengrundlage zur Lösung von Aufgaben im Bereich der Fabrik- und Anlagenplanung, in der Architektur oder auch im Rahmen von Bestands- und Schadensdokumentation für den Denkmalschutz. Parallel zur Erfassung der Oberflächengeometrie durch Laserpulse werden auch mit diesen Systemen häufig Intensitätsdaten aufgenommen. Neben den aus den gemessenen Distanzen abgeleiteten dreidimensionalen Punktkoordinaten stehen somit zusätzlich dazu bereits koregistrierte Bilder zur Verfügung. Diese liefern beispielsweise bei der Ableitung von CAD-Modellen oder der Klassifizierung der Objektoberflächen wertvolle Zusatzinformation. Die Kombination von Bild- und Höhendaten unterstützt dabei die visuelle Inspektion und Interpretation bei der Identifikation und Extraktion von Objekten. Darüber hinaus dienen diese Bilder auch der Texturierung der erfassten Oberflächen im Rahmen von dreidimensionalen Visualisierungen.

Terrestrische Laserscanner ermöglichen die Vermessung von Objekten mit einer Punktdichte und Genauigkeit, die für nahezu alle Anwendungen ausreichend ist. Trotz möglicher Reichweiten von 300m und Öffnungswinkeln, die nahezu die Erfassung des kompletten Umkreises ermöglichen, sind aber vor allem in komplexen Gebieten Verdeckungen nicht immer zu vermeiden. In diesen Fällen ist eine Datenerfassung von mehreren Standpunkten aus erforderlich, was bedingt durch die benötigten Rüstzeiten zu einem deutlichen Mehraufwand führen kann. Im Gegensatz dazu ist die zusätzliche Aufnahme von Bildern mit den erheblich kleineren, leichteren und einfacher zu handhabenden digitalen Kameras erheblich problemloser möglich. Dies legt eine Nutzung solcher Bilder zur Verdichtung und Vervollständigung der Aufnahmen terrestrischer Laserscanner nahe. Gleichzeitig kann dabei die Bildauswertung durch die vorhandene geometrische Information über die erfassten Oberflächen gestützt werden. Neben der Entwicklung von Ansätzen zur kombinierten Auswertung von Bild- und Distanzdaten müssen auch Verfahren zur Koregistrierung von Laserdaten bereitgestellt werden, die von verschiedenen Standpunkten aus aufgenommen wurden. Für eine solche automatische Anfelderung sind gute Näherungswerte für die Lage der dreidimensional erfassten Objektoberflächen im übergeordneten Koordinatensystem erforderlich. Für eine solche Georeferenzierung der Distanzdaten ist eine Zuordnung zu bereits existierenden GIS-Objekten wie Lageplänen oder Grundrissen denkbar. Damit entspricht dieser Ansatz der vorgestellten GIS-basierte Georeferenzierung terrestrischer Aufnahmen. In diesem Fall ist ebenfalls eine dreidimensionale Erweiterung bestehender zweidimensionaler Daten möglich.

Neben den in dieser Arbeit vorgestellten Ansätzen zur Nutzung der Relationen und Strukturen von 2D GIS Daten für die Erfassung von 3D Stadtmodellen zeigt auch dieses Beispiel, wie eine automatisierte Auswertung durch die Integration existierender Objektdaten gestützt werden kann. Zusätzlich zu der skizzierten Entwicklung photogrammetrischer Aufnahmesysteme führt damit vor allem die Verlagerung der photogrammetrischen Auswerteaufgaben von der Ersterfassung hin zur Nachführung und Erweiterung existierender Geodaten zu Systemen, die eine Kombination unterschiedlicher Datenquellen ermöglichen. Auch hier zeigt sich, dass flexible Verfahren bereitzustellen sind, die auf einer Erfassung und Auswertung von Daten durch Multi-Sensor-Systeme basieren.

7 Literaturverzeichnis

- Abidi, M. & Gonzales, R. [1992]. *Data Fusion in Robotics and Machine Intelligence*. Academic Press, Inc., San Diego.
- Ackermann, F. [1996]. Experimental Tests on Fast Ambiguity Solutions for Airborne Kinematic GPS Positioning. *IAPRS Vol. 31 Part B6*, pp.1-6.
- Ackermann, F. [1999]. Airborne laser scanning - present status and future expectations. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **54**(2-3), pp.64-67.
- Ackermann, F., Ebner, H. & Klein, H. [1970]. Ein Rechenprogramm für die Aerotriangulation mit unabhängigen Modellen. *Bildmessung und Luftbildwesen* **4**, pp.206-217.
- Aichholzer, O., Alberts, D., Aurenhammer, F. & Gärtner B. [1995]. A novel type of skeleton for polygons. *Journal of Universal Computer Science* **1**(12), pp.752-761.
- Albertz, J. [1991]. *Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Ameri, B. [2000]. Automatic Recognition and 3D Reconstruction of Buildings from Digital Imagery. Dissertation, DGK Reihe C, Heft Nr. 526, München.
- Anders, K-H. [1997]. Automated interpretation of digital landscape models. *Photogrammetric Week '97*, pp.13-24.
- Arcus Soft [2002].
<http://www.arcussoft.com/cityguide3d/index.html> .
- Azuma, R., Baillet, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S. & MacIntyre, B. [2001]. Recent Advances in Augmented Reality. *IEEE Computer Graphics and Applications* **21**(6), pp.34-47.
- Ballard, D.H. [1981]. Generalizing the Hough transform to detect arbitrary shapes. *Pattern Recognition* **13**(2), pp.111-122.
- Baltsavias, E. [1999]. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **54**(2-3), pp.83-94.
- Belanger, D. [2000]. *Designing Roofs of Buildings*, Course on Computational Geometry. McGill University
- Bell, B., Feiner, S. & Höllerer, T. [2002]. Information at a glance. *IEEE Computer Graphics and Applications* **22**(4), pp.6-9.
- Besl, P.J. [1988]. Segmentation Through Variable Order Surface Fitting. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **10**(2), pp.167-192.
- Beyer, H. [1992]. *Geometric and Radiometric Analysis of a CCD-Camera Based Photogrammetric Close-Range System*. Mitteilungen Nr. 51, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- Bosse, M., De_Couto, D. & Teller, S. [2000]. Eyes of Argus: Georeferenced Imagery in Urban Environments. *GPS World* **11**(4), pp.20-30.
- Brenner, C. [1999]. Interactive Modelling Tools for 3D Building Reconstruction. *Photogrammetric Week '99*, pp.23-34.
- Brenner, C. [2000a]. *Dreidimensionale Gebäuderekonstruktion aus digitalen Oberflächenmodellen und Grundrissen*. Dissertation, DGK Reihe C, Heft Nr. 530, München.
- Brenner, C. [2000b]. Towards Fully Automatic Generation of City Models. *IAPRS Vol. 33, Part B3/1*, pp.85-92.
- Brockmann, H. & Mandelburger, G. [2001]. *Aufbau eines Digitalen Geländemodells von Wasserlauf der Grenzoder*. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Band 10, pp.199-208.
- Broll, W., Schäfer, L., Höllerer, T. & Bowman, D. [2001]. Interface with Angels: The Future of VR and AR Interfaces. *IEEE Computer Graphics and Applications* **21** (6), pp.14-17.
- Brown, D.C. [1971]. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering* **37**(8), pp.855-866.
- Burns, J.B., Hansen, A.R. & Riseman, E.M. [1986]. Extracting straight lines. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **8**(4), pp.425-443.
- Coors, V., Huch, T. & Kretschmer, U. [2000]. Matching buildings: Pose estimation in an urban environment. *IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality*, pp.89-92.
- Cramer, M. [1999]. Direct Geocoding - is Aerial Triangulation obsolete? *Photogrammetric Week '99*, pp.59-70.
- Cramer, M. [2001]. *Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerophotogrammetrie*. Dissertation, DGK, Reihe C, Heft Nr. 537, München.
- Cramer, M., Stallmann, D. & Haala, N. [2000]. Direct Georeferencing Using GPS/Inertial Exterior Orientations for Photogrammetric Applications. *IAPRS, Vol. 33 Part 3*, pp.198-205.
- Danahy, J. [1999]. Visualization Data Needs in Urban Environmental Planning and Design. *Photogrammetric Week '99*, pp.351-365.
- Ebner, H. [1976]. Self-calibrating block adjustment. *IAPRS Vol. 21 Part 3*.
- Ebner, H., Fritsch, D., Gillessen, W. & Heipke, C. [1987]. *Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion*

- innerhalb der digitalen Photogrammetrie. *Zeitschrift für Bildmessung und Luftbildwesen* **55**, pp.194-203.
- Eppstein, D. & Erickson, J. [1999]. Raising roofs, crashing cycles, and playing pool: Applications of a data structure for finding pairwise interactions. *Discrete & Computational Geometry* **22**(4), pp.569-592.
- Felkel, P. & Obdržálek, Š. [1998]. Straight Skeleton Implementation. Proceedings of the 14th Spring Conference on Computer Graphics, on CD.
- Flood, M. [1999]. Commercial Development of Airborne Laser Altimetry. IAPRS Vol. 32, part 3-W14, pp.13-20.
- Förstner, W. [1993]. Image Matching. In: Haralick R.M. & Shapiro L.G. (eds.), *Computer and Robot Vision* Addison-Wesley Publishing Company.
- Fraser, C. [1997]. Digital camera self-calibration. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **52**(4), pp.149-159.
- Fritsch, D. [1991]. *Raumbezogene Informationssysteme und digitale Geländemodelle*. Dissertation, DGK Reihe C, Heft Nr. 369, München.
- Fritsch, D. & Ameri, B. [1998]. Geometric Characteristics of Digital Surfaces: A key Towards 3D Building Reconstruction. IAPRS Vol. 32 Part3, pp.119-126.
- Fritsch, D., Klinec, D. & Volz, S. [2001]. NEXUS - positioning and data management concepts for location aware applications. *Computers, Environment and Urban Systems* **25**, pp.279-291.
- Gelb, A. [1974]. *Applied Optimal Estimation*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Gibson, J.R. [1994]. Photogrammetric Calibration of a Digital Electro-Optical Stereo Imaging System. *Geomatica* **48**(2), pp.95-109.
- Gomes Pereira, L. & Wicherson, R. [1999]. Suitability of laser data for deriving geographical information: A case study in the context of management of fluvial zones. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **54**(2-3), pp.105-114.
- Greening, T., Schickler, W. & Thorpe, A. [2000]. The Proper Use of Directly Observed Orientation Data: Aerial Triangulation Is Not Obsolete. ASPRS Annual Conference, Washington, DC, on CD.
- Grejner-Brzezinska, D., Li, R., Haala, N. & Toth, C. [2002]. Multi-sensor systems for land-based and airborne mapping: technology of the future? IAPRS Vol. 34 Part 2, pp.31-42.
- Grün, A. & Wang, X. [2001]. News from CyberCity-Modeler. Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III), pp.93-101.
- Grün, A. [1978]. Experiences with self-calibrating bundle adjustment. ACSM-ASP Convention.
- Grün, A. [1996]. Least squares matching: a fundamental measurement algorithm. In: Atkinson K. (ed.), *Close Range Photogrammetry and Machine Vision* Whittles Publishing.
- Grün, A. & Wang, X. [1998]. CC-Modeler: A Topology Generator for 3-D City Models. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **53**, pp.286-295.
- Gülch, E. & Müller, H. [2001]. New applications of semi-automatic building acquisition. Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III), pp.103-114.
- Gülch, E., Müller, H. & Läbe, T. [1999]. Integration of Automatic Processes into Semi-Automatic Building Extraction. IAPRS, Vol. 32 Part3-2W5, pp.177-186.
- Haala, N. [1994]. Building Detection by Fusion of Range and Image Data. *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung*(5), pp.161-167.
- Haala, N. [1996]. *Gebäuderekonstruktion durch Kombination von Bild- und Höhendaten*. Dissertation, DGK, Reihe C Heft Nr. 460, München.
- Haala, N. & Brenner, C. [1998]. Interpretation of Urban Surface Models Using 2D Building Information. *Computer Vision and Image Understanding* **72**(2), pp.204-214.
- Haala, N. & Brenner, C. [1999a]. Extraction of buildings and trees in urban environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **54**(2-3), pp.130-137.
- Haala, N. & Brenner, C. [1999b]. Virtual City Models from Laser Altimeter and 2D Map Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **65**(7), pp.787-795.
- Haala, N., Brenner, C. & Anders, K. H. [1998]. 3D Urban GIS from Laser Altimeter and 2D Map Data. IAPRS, Vol. 32 Part 3/1, pp.339-346.
- Haala, N., Brenner, C. & Stätter, C. [1998]. An Integrated System for Urban Model Generation. IAPRS Vol. 32 Part 2, pp.96-103.
- Haala, N. & Böhm, J. [2003]. A multi-sensor system for positioning in urban environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **58**(6), pp.675-687.
- Haala, N., Böhm, J. & Klinec, D. [2002]. An integrated approach for the orientation of terrestrial outdoor scenes. *GIS* **12**, pp.40-46.
- Haala, N., Fritsch, D., Stallmann, D. & Cramer, M. [2000]. On the Performance of Digital Airborne Cameras for Photogrammetric Data Processing - a Case Study. *GIS* **13**(4), pp.29-35.
- Haala, N. & Stallmann, D. [2001]. Abschlussbericht DMC Kamerakalibrierung.

- Haala, N., Stallmann, D. & Cramer, M. [1998]. Calibration of Directly Measured Position and Attitude by Aerotriangulation of Three-line Airborne Imagery. *IAPRS*, Vol. 32, Part 3, pp.23-30.
- Haala, N. & Walter, V. [1999]. Automatic classification of urban environments for database revision using lidar and color aerial imagery. *IAPRS* Vol. 32 Part7-4-3W6, pp.76-82.
- Haala, N., Walter, V. & Stätter, C. [1999]. Analysis of Multispectral and Stereo Data from Airborne Pushbroom Systems for DTM Generation and Landuse Classification. Fourth International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, pp.170-177.
- Hall, D.L. [1992]. *Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion*. Artech House, Boston, London.
- Haralick, R., Sternberg, S. & Zhuang, X. [1987]. Image Analysis Using Mathematical Morphology. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 9(4), pp.532-550.
- Haralick, R.M. [1984]. Digital step edges from zero-crossings of second directional derivatives. *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. PAMI-6* 1, pp.58-68.
- Hau, T. [2001]. Erfassung und Visualisierung von Gebäuden und Städten auf Basis photogrammetrischer Auswertungen mit dem Programmsystem Phaust. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung Band 10, pp.173-180.
- Heipke, C. [1995]. *Digitale photogrammetrische Arbeitsstationen*. Habilitation, DGK Reihe C, Heft Nr. 450, München.
- Heipke, C., Jacobsen, K. & Wegmann, H. [2001]. The OEEPE Test on Integrated Sensor Orientation - Results of Phase I. Photogrammetric Week '01, pp.195-204.
- Hinsken, L., Miller, S., Tempelmann, U., Uebbing, R. & Walker, S. [2002]. Triangulation of LH Systems' ADS40 Imagery Using ORIMA GPS/IMU. *IAPRS* Vol. 34 Part 3A, pp.156-162.
- Hinz, A., Dörstel, C. & Heier, H. [2000]. Digital Modular Camera: System Concept and Data Processing Workflow. *IAPRS* Vol 33 Part B2, pp.164-171.
- Hoff, B. & Azuma, R. [2000]. Autocalibration of an Electronic Compass in an Outdoor Augmented Reality System. Proceedings of International Symposium on Augmented Reality, pp.159-164.
- Hoffmann, A. [2001]. Neue Ansätze zur Auswertung und Klassifizierung von sehr hochauflösenden Daten - Methoden der Segmentierung, der hierarchischen Klassifizierung und der per-Parcel-Methode mit Daten der digitalen Kamera HRSC-A und ihre Anwendbarkeit für die Aktualisierung topographischer Karten. Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, Humboldt Universität Berlin.
- Hofmann, O. [1986]. Dynamische Photogrammetrie. *Bildmessung und Luftbildwesen* 54, pp.105-121.
- Hoover, A., Jean-Baptiste, G., Jiang, X., Flynn, P., Bunke, H., Goldgof, D., Bowyer, K., Eggert, D., Fitzgibbon, A. & Fisher, R. [1996]. An Experimental Comparison of Range Image Segmentation Algorithms. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 18(7), pp.673-689.
- Hough, P. V. C. [1962]. Method and means for recognizing complex patterns. U.S. Patent 3.069.654.
- Hug, C. [1997]. Extracting Artificial Surface Objects from Airborne Laser Scanner Data. Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II), pp.203-212.
- Huising, E.J. & Gomes Pereir, L.M. [1998]. Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. *ISPRS Journal on Photogrammetry & Remote Sensing* 53, pp.245-261.
- Höllerer, T., Feiner, S., Hallaway, D., Bell, B., Lanzagorta, M., Brown, D., Julier, S., Baillot, Y. & Rosenblum, L. [2001]. User interface management techniques for collaborative mobile augmented reality. *Computers and Graphics* 25(5), pp.799-810.
- Jacobsen, K. [1980]. Vorschläge zur Konzeption und zur Bearbeitung von Bündelblockausgleichungen. Dissertation, Universität Hannover.
- Kornus, W. [1999]. Dreidimensionale Objektrekonstruktion mit digitalen Dreizeilenscannerdaten des Weltraumprojekts MOMS-02/D2. Dissertation, DGK Reihe C, Heft Nr. 496, München.
- Kraus, K. [1997]. *Photogrammetrie Band 1*. Dümmler Verlag, Bonn.
- Kraus, K. [2001]. Laser-Scanning - Ein Paradigma-Wechsel in der Photogrammetrie. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung Band 10, pp.13-22.
- Kremer, J. [2001]. CCNS and AEROcontrol: Products for Efficient Photogrammetric Data Collection. Photogrammetric Week '01, pp.85-92.
- Lange, E. [1999]. Von der analogen zur GIS-gestützten Visualisierung bei der Planung von Landschaften. *GIS* 12(2), pp.29-37.
- Lillesand, T. & Kiefer, R. [1994]. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, New York.
- Lohr, U. [2001]. LIDAR-Höhenmodelle und digitale Bilder zur Orthobildherstellung. Publikationen der Deutschen

- Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung Band 10, pp.131-140.
- Maas, H.-G. [1997]. *Mehrbildtechniken in der digitalen Photogrammetrie*. Mitteilungen Nr. 62, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich.
- Meier, H.-K. [1978]. Verzeichnung, Kammerkonstante und Fokussierung von Luftbildkammern unter dem Einfluss bildflugspezifischer Umweltbedingungen. *Bildmessung und Luftbildwesen* **6**, pp.193-198.
- Mercer, B. [2001]. Combining LIDAR and IfSAR. *GIS* **12**, pp.12-19.
- Mercer, B. & Gill, M. [1998]. Radar Derived DEMs for Urban Areas. IAPRS Vol. 32 Part 4, pp.383-388.
- Mercer, B. & Schnick, S. [1999]. Comparison of DEMs from STAR-3i interferometric SAR and scanning laser. IAPRS, Vol. 32 Part 3W14, pp.127-134.
- Mostafa, M., Hutton, J. & Reid, B. [2001]. GPS/IMU products - the Applanix approach. Photogrammetric Week '01, pp.63-83.
- Müller, F. [1991]. Photogrammetrische Punktbestimmung mit Bilddaten digitaler Dreizeilenkameras. Dissertation, DGK Reihe C, Heft Nr. 372, München.
- Müller, F., Hoffmann, O. & Kaltenecker, A. [1994]. Digital Photogrammetric Assembly Point Determination using Airborne Three-line Camera Imagery - Practical Results. IAPRS Vol. 30 Part3, pp.592-598.
- Price, K. & Huertas, A. [1992]. Using Perceptual Grouping to Detect Objects in Aerial Scenes. IAPRS Vol. 29 Part B3, pp.842-855.
- Rakkolainen, I. & Vainio, T. [2001]. A 3D City Info for Mobile Users. *Computer & Graphics, Special Issue on Multimedia Appliances* **25**(4), pp.619-625.
- Resnik, B. [2001]. Praktische Untersuchungen zur Genauigkeit und Zuverlässigkeit der mobilen Geodatenerfassung mit Freihandmeßsystemen. *AVN Allgemeine Vermessungs-Nachrichten* **7**, pp.246-253.
- Rottensteiner, F. [2001]. Semi-automatic extraction of buildings based on hybrid adjustment using 3D surface models and management of building data in a TIS. Dissertation, Geowissenschaftliche Mitteilungen 56, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien.
- Sandau, R. & Eckert, A. [1996]. The stereo Camera Family WAOS/WAAC for Spaceborne / Airborne Applications. IAPRS Vol.31 PartB1, pp.170-175.
- Schade, H. [2001]. *Neigungsbestimmung mit GPS für die Photogrammetrie*. Dissertation, Schriftenreihe der Institute des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, Universität Stuttgart.
- Schenk, T. [1999a]. *Digital Photogrammetry, Volume 1*. Terra Science
- Schenk, T. [1999b]. Photogrammetry and laser altimetry. IAPRS Vol. 32, Part 3W14, pp.3-12.
- Schilcher, M., Guo, Z., Klaus, M. & Roschlaub, R. [1999]. Aufbau von 3D-Stadtmodellen auf der Basis von 2D-GIS. *PFG - Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* **3**, pp.157-170.
- Schlüter, M. [1999]. Von der 2 1/2 D- zur 3D Flächenmodellierung für die photogrammetrische Rekonstruktion im Objektraum. Dissertation, DGK Reihe C, Heft Nr. 506, München.
- Schmid, H. [1958]. Eine allgemeine analytische Lösung für die Aufgabe der Photogrammetrie. *Bildmessung und Luftbildwesen*, pp.103-113.
- Scholten, F., Wewel, F. & Sujew, S. [2001]. High Resolution Stereo Camera - Airborne (HRSC-A): 4 Years of Experience in Direct Sensor Orientation of a Multi-Line Pushbroom Scanner. ISPRS Workshop High Resolution Mapping from Space 2001, pp.203-209.
- Schwarz, K. P. [1995]. Integrated Airborne Navigation Systems for Photogrammetry. Photogrammetric Week '95, pp.139-153.
- Schwarz, K. P., Chapman, M., Cannon, E., Gong, P. & Cosandier, D. [1994]. Integrated Airborne Navigation Systems for Photogrammetry. IAPRS Vol. 30 Part 2, pp.191-201.
- Skaloud, J. [1999]. *Optimizing georeferencing of airborne survey systems by INS/DGPS*. Ph.D. Thesis, University of Calgary, UCGE Report # 20126, 160 pages.
- Steger, C. [2002]. Occlusion, clutter, and illumination invariant object recognition. IAPRS Vol. 34, Part 3A, pp. 345-350.
- Teller, S. [2000]. MIT City Scanning Project. <http://city.lcs.mit.edu/city/city.html>.
- Tempelmann, U., Börner, A., Chaplin, B., Hinsken, L., Mykhalevych, B., Miller, S., Recke, U., Reulke, R. & Uebbing, R. [2000]. Photogrammetric Software for the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor. IAPRS Vol. 33 Part B2, pp.552-559.
- Toth, C., Berning, S., Leonard, J. & Grejner-Brezinska, D. [2001]. Integration of LIDAR Data with Simultaneously Acquired Digital Imagery. Proc. ASPRS Annual Conference on CD.
- Uhlmann, H. [1999]. Klassifizierung in Stadtgebieten durch Kombination von Farbluftbildern und Laserscanner Daten. Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart

- Ulrich, M. & Steger, C. [2002]. Performance Comparison of 2D Object Recognition Techniques. IAPRS Vol.34 Part 3A, pp.368-374.
- Ulrich, M., Steger, C., Baumgartner, A. & Ebner, H. [2001]. Real-Time Object Recognition in Digital Images for Industrial Applications. 5th Conference on Optical 3D Measurement Techniques, Vienna , pp.308-318.
- Vlahakis, V., Ioannidis, N., Karigiannis, J., Tsotros, M., Gounaris, M., Stricker, D., Gleue, T., Daehne, P. & Almeida, L. [2002]. Archeoguide: An Augmented Reality Guide for Archeological Sites. *Computer Graphics and Applications* **22**(5), pp.52-60.
- Vosselman, G. [1999]. Building reconstruction using planar faces in very high density height data. IAPRS, Vol. 32 Part3-2W5, pp.87-92.
- Vosselman, G. & Suveg, I. [2001]. Map based building reconstruction from laser data and images. Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III), pp.231-242.
- Wagner, J. [2003]. *Zur Verallgemeinerung integrierter Navigationssysteme auf räumlich verteilte Sensoren und flexible Fahrzeugstrukturen* . Habilitationsschrift, Technischen Universität Hamburg Harburg. VDI Verlag Fortschritt-Berichte: Reihe 8, Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik.
- Walter, V. [1999]. Automated GIS data collection and update. Photogrammetric Week '99, pp.267-280.
- Wehr, A. & Lohr, U. [1999]. Theme Issue Airborne Laser Scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **54**(2-3)
- Weidner, U. & Förstner, W. [1995]. Towards Automatic Building Extraction from High Resolution Digital Elevation Models. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* **50**(4), pp.38-49.
- Wewel, F., Scholten, F., Neukum, G. & Albertz, J. [1998]. Digitale Luftbildaufnahme mit der HRSC - Ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie. *PFG - Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* **6** , pp.337-348.
- Wolf, M. [1999]. Photogrammetric Data Capture and Calculation for 3D City Models. Photogrammetric Week '99, pp.305-312.
- Wrobel, B. [1987]. Digitale Bildzuordnung durch Facetten mit Hilfe von Objektraummodellen. *Zeitschrift für Bildmessung und Luftbildwesen* **55**, pp.93-101.