Von Pixeln zu Geodaten – Potential der Photogrammetrie und Fernerkundung bei der Datenerfassung

Thomas Kersten Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Fachbereich Geomatik, Hebebrandstr. 1, D - 22297 Hamburg t.kersten@rzcn.haw-hamburg.de, http://www.haw-hamburg.de/geomatik/

ZUSAMMENFASSUNG

Geoinformationen werden als orts- und raumbezogene Daten zur Beschreibung von Gegebenheiten eines Ortes oder Landes aus Geodaten abgeleitet. Ein zunehmender Bedarf an Geoinformationen und damit auch an Geodaten erfordert eine automatisierte und effiziente Datenerfassung, da wichtige Kriterien für solche Daten u.a. die flächendeckende Verfügbarkeit und Aktualität sind. Durch neue digitale Luftbildkameras und durch hochauflösende digitale Satellitenfernerkundungssysteme können hochwertige Bilddaten zur Verfügung gestellt werden, aus denen mit technologisch anspruchsvollen, automatisierten Verfahren der Photogrammetrie Geodaten in effizienter Weise erzeugt werden können.

In diesem Artikel wird die neueste Generation von hochauflösenden Satellitenfernerkundungssystemen und digitalen Luftbildkameras sowie das Potential dieser neuen digitalen, multispektralen Bilddaten vorgestellt. Aus diesen Bildern werden mit Hilfe der digitalen photogrammetrischen Datenerfassung Geodaten in Form von Vektor- und Rasterdaten erzeugt. Die Arbeitsschritte der digitalen photogrammetrischen Produktion und deren Automationspotential werden kurz präsentiert und daraus generierte Produkte wie digitale Orthophotos, Oberflächen- und Geländemodelle sowie 3-D Stadtmodelle werden anhand von Beispielen vorgestellt.

1. EINFÜHRUNG

Deutschland befindet sich als Teil eines zusammenwachsenden Europas im Übergang zur Informations- und Kommunikationsgesellschaft, wodurch Information und der effiziente Umgang mit ihr eine zunehmend zentrale Bedeutung bekommen. Viele dieser Informationen erhalten erst durch ihre Zuordnung zu einem definierten Ort bzw. Raum oder durch direktem Raumbezug einen signifikanten Nutzen. Diese Geoinformationen (orts- und raumbezogene Daten zur Beschreibung von Gegebenheiten eines Ortes oder Landes) bilden einen wesentlichen Teil des in der modernen Informations- und Kommunikationsgesellschaft vorhandenen Wissens, das auf allen Ebenen in Verwaltung, Wirtschaft und Wissenschaft und vom Bürger zunehmend benötigt wird. Sie bilden die Grundlage des planerischen Handelns und ihre Verfügbarkeit ist eine maßgebliche Voraussetzung für Standort- und Investitionsentscheidungen. Geoinformationen haben daher herausragende Bedeutung für zahlreiche, im folgenden aufgeführten Anwendungsgebiete: Raumplanung, Bodenmanagement, Bauwirtschaft, Kataster- und Grundbuchwesen, Immobilienmarkt, Umwelt- und Naturschutzmanagement, Innere Sicherheit, Landesverteidigung, Zivil- und Katastrophenschutz, Versorgung und Entsorgung, Wasserwirtschaft, geowissenschaftlicher Ressourcenschutz, Land- und Forstwirtschaft, Wetterdienst, Klimaforschung, Statistik, Versicherungswesen, Telematik/Verkehrslenkung und Raumfahrt (FRITZSCHE, 2001).

Geoinformationen lassen sich spezifisch und problemlösungsorientiert durch Auswahl, Analyse und Synthese von digitalen Geodaten, die als Daten den direkten oder indirekten Bezug zur Erdoberfläche bilden, in Geoinformationssystemen (GIS) gewinnen. Man unterscheidet bei Geodaten gemäss der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) zwischen Geobasisdaten (anwendungsneutrale Grundlagedaten) und Geofachdaten (erweiterte Daten für konkrete Fachaufgaben). Im folgenden werden diese Daten jedoch weiter als Geodaten bezeichnet.

Geodaten werden unsere täglichen Entscheidungen in zahlreichen Anwendungen zunehmend beeinflussen. Ein expandierender Markt mit extremen Wachstumsaussichten stellt zum Beispiel der Bereich der Geodienste oder der ortsbezogenen Dienste dar. Diese sogenannten "Location Based Services (LBS)" werden durch die Einführung des weltweiten Mobiltelefonsystem UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) möglich. Die UTMS-Technik erlaubt eine schnelle Übertragung großer Datenmengen aus dem Internet und ermöglicht neben GPS eine ständig verbesserte Genauigkeit der Verfahren zur Ortung mobiler Fernsprechteilnehmer. Dadurch können Kunden für deren augenblicklichen Standort relevante, lokale Dienste in Anspruch nehmen, die neben Hilfe, Orientierung und Zielführung auch weiterführende Informationen aus dem Internet bereitstellen können (WUNDERLICH, 2001). Das führt in zunehmendem Maße zu einem Bedarf an digitalen topographischen Informationen (Geodaten), wodurch hohe Anforderungen an die Geodaten gestellt werden. Die weitestgehend flächendeckenden, wenn möglich großmaßstäblichen Daten müssen schnell und einfach erfasst werden, da in immer kürzeren Zeitabständen aktuelle Geodaten in digitaler Form zu fairen und verbraucherfreundlichen Preisen verfügbar sein sollen.

Durch neue digitale Luftbildkameras und durch hochauflösende digitale Satellitenfernerkundungssysteme können hochwertige Bilddaten zur Verfügung gestellt werden, aus denen mit technologisch anspruchsvollen, automatisierten Verfahren der Photogrammetrie Geodaten in effizienter Weise erzeugt werden können. Als solche Geodaten bieten sich digitale Orthophotos an, die durch eine entsprechende Transformation aus Luftbildern oder Satellitenbildern mit Zentralprojektion zu einer geokodierten orthogonalen Photokarte umgeformt werden. Durch die Geokodierung wird ein Raumbezug gewährleistet und eine spätere gemeinsame Nutzung verschiedener Datensätze im GIS vereinfacht. Digitale Orthophotos liefern den hohen Informationsgehalt von Luft- und Satellitenbildern und sind heute effizient zu generieren. Sie können außerdem Kriterien wie Aktualität, Genauigkeit, Homogenität und volle Gebietsabdeckung leicht erfüllen. Eigenschaften, Bedeutung und Anwendungsbeispiele digitaler Orthophotos sind u.a. in KERSTEN (1996a) und in CALÖRTSCHER und KERSTEN (1998) zusammengefasst. Eine weitere Form der Geodaten stellen die digitalen Gelände- und/oder Oberflächenmodelle dar, die heute u.a. in der Sender- und Funknetzplanung eine flächendeckende Grundlage für die Netzplanung und Funkausbreitungssimulation bilden (MATTER et al., 2000).

In diesem Beitrag sollen die Möglichkeiten und das Potential der Photogrammetrie und der Fernerkundung aufgezeigt werden, aus Pixeln bzw. aus digitalen Bilddaten hochwertige Geodaten zu generieren. Die aktuellen, hochauflösenden Satellitensysteme und die neuen digitalen Luftbildkameras, mit denen digitale Bilddaten generiert werden, werden in Kapitel 2 und 3 vorgestellt. In Kapitel 4 werden Aspekte der Geodatengewinnung durch digitale photogrammetrische Datenerfassung und deren Grenzen aufgezeigt, während in Kapitel 5 photogrammetrische Produkte als Geodaten vorgestellt werden.

2. HOCHAUFLÖSENDE SATELLITENFERNERKUNDUNGSDATEN

2.1. Historische Entwicklung

Seit Anfang der 70ziger Jahre wird eine permanente Erdbeobachtung durch Satellitenfernerkundungsdaten durchgeführt. Während das erste zivile Satellitensystem Landsat-1 (1972) noch digitale Bilder mit einer Auflösung von 30m am Boden lieferte, bieten die seit Anfang 2000 verfügbaren kommerziellen, nicht militärischen Satellitendaten von IKONOS-2 (seit Jan. 2000), EROS-A1 (seit Mai 2001) und QuickBird-2 (seit Feb. 2002) eine Bodenauflösung von bis 0.6m (siehe auch Tab. 1). Militärische Satellitensysteme wie z.B. das KH-8 (Key-Hole) erreichten dagegen bereits Anfang der 80ziger Jahre eine Auflösung von 10cm am Boden, um militärisches Gerät am Boden zu identifizieren (RÜTGERS, 1989). In den 80ziger Jahren waren jedoch für den kommerziellen Anwender nur die digitalen Fernerkundungsdaten von Landsat (30m) und Spot (panchromatisch, Auflösung 10m) verfügbar. Erst Ende der achtziger und Anfang der neunziger Jahre waren auch russische Satellitendaten von filmbasierten Systemen mit einer Auflösung von bis zu 2m (KWR-1000) erhältlich. Das indische Satellitensystem IRS-1C/1D erfasste ab Ende 1995 panchromatische Bilder mit einer Auflösung von 5.8m. Als Wendepunkt in der Erdbeobachtung durch Satellitenfernerkundungssysteme gilt das Jahr 1994, als die amerikanische Regierung privaten Firmen Konzessionen für kommerziellen Erdbeobachtungs-Satelliten auf einer Erdumlaufbahn erteilte. Es dauerte allerdings noch fünf Jahre bis mit IKONOS-2 am 24. September 1999 der 1. kommerzielle hochauflösende Fernerkundungssatellit erfolgreich in den Orbit gebracht wurde und damit ein neues Zeitalter der Satellitenfernerkundung einläutete. Vorher gab es einige Fehlschläge wie z.B. bei IKONOS-1 (April 1997), EarlyBird (Dez. 1997), EROS (Jan. 1998), QuickBird-1 (Nov. 2000) und OrbView-4 (Sept. 2001) zu verkraften.

2.2. Die neue Generation von Satellitenfernerkundungssystemen

Die in Tab. 1 aufgeführten Satellitensysteme IKONOS-2, EROS-A1 und QuickBird-2 stellen eine neue Generation von multispektralen und hochauflösenden Fernerkundungssystemen dar, die durch ihre schwenkbaren Kameras qualitativ hochwertige Bilddaten (mit einer Auflösung von 0.6 bis 1m) von jedem Ort der Erdoberfläche für jeden Anwender verfügbar machen können. Durch die hohe Schwenkmöglichkeit der Kamera von bis zu 45° wie z.B. bei EROS-A1 wird eine Wiederholbarkeit der Aufnahme über denselben Ort der Erdoberfläche von bis zu einem Tag erreicht. Damit kann eine scheinbar unerschöpfliche Quelle an hochauflösenden, multispektralen Bilddaten genutzt werden, aus denen qualitativ anspruchsvolle aktuelle Geodaten weltweit generiert werden können, um so den steigenden Anforderungen an Geodaten gerecht zu werden und um neue Anwendungsgebiete bzw. Märkte für Geoinformationen erschließen zu können. Die bestellten Bilddaten werden auf digitalen Standardmedien wie CD-ROM/DVD oder Tapes (DAT/Video-8) im Format GeoTIFF oder NITF geliefert. Digital Globe (www.digitalglobe.com) liefert ähnlich wie ImageSat International (www.imageSatIntl.com) zu den Bilddaten alle für photogrammetrische Verarbeitung erforderlichen Informationen wie Orbitdaten, geometrische Kalibrierung, Kameramodell, Metadaten, radiometrische Daten und relationale Funktionen. Im Gegensatz zu Space Imaging (www.spaceimaging.com) geben Digital Globe und ImageSat International das Sensormodell und die Orbitparameter von Quickbird bzw. EROS-A1 bekannt, so dass eine vereinfachte Verarbeitung der Daten möglich ist. Die Preise der hochauflösenden Satellitenbilder werden in \$/km² angegeben. Für den jeweils günstigsten Standarddatensatz bezahlt der Kunde \$10/km² für panchromatische Daten von EROS-A1, \$18/km² für IKONOS-2 Carterra GEO-Daten und \$22.5/km² für panchromatische bzw. \$25/km² für multispektrale Daten von QuickBird-2. Die Mindestbestellfläche liegt bei 5km² für QuickBird-2 (\$562) und bei 12.5km² für EROS-A1 (\$1500), während Space Imaging einen Mindestbestellwert von \$3000 für IKONOS-2 Daten erwartet, das ungefähr einer Aufnahmefläche von 11km² entspricht.

2.3. Das Potential der neuen Satellitenfernerkundungssysteme

Parameter/System	IKONOS-2	EROS-A1	QuickBird-2	
Betreiber	Space Imaging, USA	ImageSat Internat., Israel	Digital Globe, USA	
Start / Operationell	24.09.1999 / Jan. 2000	05.12.2000 / Mai 2001	18.10.2001 / Feb. 2002	
Orbit/ Umlaufzeit	681km / 98 ⁰ / 98 min	480km / 98 ⁰ / 90 min	450km / 98 ⁰ / 93.4 min	
Spektralbereiche	PAN, MS (RGB, NIR)	PAN	PAN, MS (RGB, NIR)	
Auflösung am Boden	0.82m PAN, 3.28m MS	1.80m PAN	0.61m PAN, 2.44m MS	
Sensor/CCD [Pixel]	13500 (12 μm)	7043	27.552 x 27.424 (PAN), 6.888 x 6.856 (MS)	
Aufnahmefläche/Szene	11 km x 11 km	12.7 km x 12.7 km	16.5 km x 16.5 km	
Wiederholbarkeit	1 – 3.2 Tage	1 –4 Tage	1 – 3.5 Tage	
Schwenkwinkel Kamera	$< 26^{\circ}$	$< 45^{0}$	$< 30^{0}$	
Radiometrische Auflösung	11 bit/Pixel	11 bit/Pixel	11 bit/Pixel	
Kosten/km ² (PAN/MS)	\$ 18 / \$ 18	\$ 10	\$ 22.5 / \$ 25	
PANPanchromatisch; MSMultispektral; RGBSpektralbänder Rot, Grün, Blau; NIR Nahes Infrarot				

Tab. 1: Wichtige technische Spezifikationen der neuesten kommerziellen Satellitensysteme

Die neuen hochauflösenden Satellitendaten sind sowohl als panchromatische Bilddaten (ca. 0.6-1.8m Auflösung), als auch in multispektraler Form (ca. 2-4m Auflösung) erhältlich. Die IKONOS-Daten können sogar als sogenannte "pansharpened" Bilddaten (Farbcomposite aus panchromatischen und multispektralen Daten mit 1m Auflösung) bezogen werden (siehe Abb. 1). Die spektrale Auflösung mit den vier Kanälen Blau, Grün, Rot, und Nahes Infrarot deckt den Wellenlängenbereich von 450 - 900nm ab. Das radiometrische Auflösungsvermögen der hochauflösenden Satellitenbilder erreicht 11 bit pro Pixel, das entspricht 2048 Grauwerten. Digitalisierte Bilddaten von einem Scanner weisen dagegen meist 256 Grauwerte (8 bit/Pixel) auf. Allerdings können heute noch nicht alle Softwarepakete für Satellitenbildbearbeitung die hohe radiometrische Auflösung nutzen und müssen daher die Daten auf 8 bit/Pixel reduzieren. Es zeigte sich aber zum Beispiel bei Untersuchungen der ersten verfügbaren IKONOS-2 Bilder (KERSTEN et al. 2000), dass durch die hohe Auflösung der panchromatischen Bilder einerseits sogar Schatten von Stromkabeln zu erkennen sind, wenn der Kontrast zum Hintergrund gross genug ist, dass andererseits trotz der 1m Auflösung die Grauwertkanten nicht gut definiert sind (siehe Abb. 2). Das letzte führt besonders bei automatischer Bildanalyse, wie z.B. bei Kantenextraktionen zu Problemen. Ausserdem sind viele kleine Objekte im Bild abgebildet, aber nicht erkennbar. Differenzen in der Objekterkennung und Definition zwischen einem IKONOS-Bild und einem Orthophoto (aus Luftbildern generiert) sind in Abb. 2 (rechts) ersichtlich, obwohl der Unterschied der Bodenauflösung (1m vs. 0.75m) relativ klein ist. Die radiometrischen Untersuchungen haben aufgezeigt, dass durch die grosse Flughöhe und das



Abb. 1: Satellitenbilddaten von IKONOS-2 (links multispektral 4m, Mitte panchromatisch 1m, rechts pansharpened 1m)



Abb. 2: Satellitenbilddaten von IKONOS-2 (v.l.n.r.: Schatten von Stromkabeln erkennbar, schlecht definierte (gebrochene) Grauwertkanten, Objektdefinition und Erkennung zwischen einem IKONOS PAN-Bild (1m Auflösung) und einem Orthophoto (0.75m Auflösung)

metrischen Untersuchungen haben aufgezeigt, dass durch die grosse Flughöhe und das Rauschen in den Bildern die Objektdefinition und -erkennung schlechter im Vergleich zu vergleichbaren Luftbildern ist. Weitere radiometrische Untersuchungen werden in BALTSAVIAS et al. (2001) zusammengefasst.

Geometrische Untersuchungen der IKONOS-2 Bilddaten wurden bereits kurz nach Verfügbarkeit der Daten von verschiedenen Autoren veröffentlicht. In einem Projekt in der Schweiz stellen KERSTEN et al. (2000) erste Erfahrungen mit den IKONOS GEO-Produkten vor. Die gelieferten IKONOS-2 Carterra GEO-Daten konnten trotz fehlender Informationen des Sensormodells und der Orbitparameter transformiert bzw. orthorektifiziert werden. Durch die Orthophoto-Generierung von PAN- und MS-Daten durch zwei verschiedene Verfahren (Polynome von Kratky und empirische Orthorektifizierung) wurde eine Lagegenauigkeit von ca. ± 2m erreicht, die der Genauigkeitsspezifikation von Space Imaging für das PRECISION-Produkt entspricht. Zur Herstellung dieser Orthophotos sind zwar zusätzliche Daten (Passpunkte und Digitales Geländemodell) und zusätzlicher Aufwand erforderlich, jedoch ist dieser Aufwand für die Produktion von PRECISION-Produkten durch Space Imaging finanziell gesehen ungleich grösser. Es wurde aber auch bei dieser Untersuchung festgestellt, dass das geometrische Genauigkeitspotential der IKONOS-Bilder besser als 1m sein dürfte, wenn genauere Passpunkte aus bereits orientierten Luftbildstereomodellen oder von GPS-Messungen im Feld verwendet werden. Die Genauigkeit der verwendeten Passpunkte aus den verfügbaren digitalen Orthophotos lag bei ca. 2m, so dass mit den bearbeiteten Satellitendaten keine bessere Genauigkeit erreicht werden konnte. In Abb. 3 sind das verwendete Testgebiet in der Schweiz und Qualitätskontrollen der panchromatischen und multispektralen Orthophotos mit Vektordaten exemplarisch dargestellt.

TOUTIN und CHENG (2000) präsentieren ähnliche Genauigkeiten für IKONOS-2 Daten aus Kanada. Für die Orthorektifizierung der untersuchten Daten wurde ein strenger Polynomansatz (rigorous models) verwendet, der das physikalische Modell der kompletten Aufnahmegeometrie berücksichtigt und außerdem Verzerrungen durch Aufnahmeplattform, Sensor, Erde und manchmal sogar wegen der kartographischen Projektion korrigiert. Dabei fließen auch genäherte Informationen des Sensors aus dem gelieferten Metadatenfile ein. Der strenge Polynomansatz ist in der Software PCI OrthoEngine Satellite Edition V7.0 integriert. Die Untersuchungen brachten als Ergebnis eine Genauigkeit von 1.3m in



Abb. 3: Satellitenbilddaten von IKONOS-2: v.l.n.r.: Ausschnitt des Testgebietes in der Schweiz, Qualitätskontrolle der orthorektifizierten PAN- und MS-Daten mit Vektordaten aus einem GIS

XY bei 23 verwendeten Kontrollpunkten und nur sieben Passpunkten.

MEINEL et al. (2001) untersuchten IKONOS-Satellitenbilddaten für einen Methodenvergleich von pixelorientierter und segmentorientierter Klassifikation. Für die Orthorektifizierung des Bilddatensatzes von Dresden wurden 37 Passpunkte aus einem Orthophotomosaik (Luftbilder von 1999) verwendet und als Ergebnis wurde aus der polynomialen Transformationsgleichung zweites Grades ein RMS von 0.53m an den Passpunkten erreicht.

FRASER et al. (2001) untersuchten das geometrische Potential von IKONOS Stereobilddaten im einem Testgebiet von Melbourne zur Erfassung von Gebäuden. Für die Orientierung von 3 Bildern wurde eine Genauigkeit von 0.35-0.50m in XY und 0.5 bis 0.8m in Z an 25 Kontrollpunkten erreicht. Der Vergleich von Dachecken, die in den Satellitenbildern und mit GPS bestimmt wurden, ergab eine Genauigkeit von besser als 1m. Allerdings können damit die Anforderungen von 3-D Stadtmodellen hinsichtlich Genauigkeiten (ca. 10cm) und Detaillierungsgrad nicht erfüllt werden. Abb. 4 verdeutlicht in einem Vergleich den Qualitätsunterschied von Dachstrukturen, die im Luftbildmodell und im IKONOS-Satellitenstereomodell erfasst wurden.



Abb. 4: Vergleich eines erfassten Gebäudes mit kompletten Dachstrukturen aus einem Luftbildmodell (links) und aus Stereobilddaten von IKONOS-2 (rechts), ©FRASER et al., 2001

Neben den ersten Untersuchungen der IKONOS-2 GEO-Daten präsentierten auch wenige Autoren die ersten Resultate aus Untersuchungen mit den panchromatischen Bilddaten von EROS-A1. CHENG und TOUTIN (2002) erreichten bei ihren Untersuchungen mit den gleichen Bedingungen (gleiches Testgebiet, gleiche Passpunkte, gleiches strenges Polynom) wie bei den IKONOS-Daten eine Lagegenauigkeit der Orthophotos von 2.1m. WESTIN und FORSGREN (2001) entwickelten eine eigene Software zur Orthorektifizierung von EROS-A1 Szenen. In Tests mit sieben verschiedenen Datensätzen konnten bei Verwendung von 13-33 Passpunkten pro Szene ein durchschnittliches RMS (Root Mean Squares) von 1.5m in X und 1.7m in Y erreicht werden. Das zeigt deutlich, dass Genauigkeiten im Subpixelbereich mit den EROS-A1 Bilddaten erreichbar sind.

Ergebnisse von Untersuchungen mit QuickBird-2 Satellitenbilddaten liegen zur Zeit (Mai 2002) noch nicht vor. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Qualität der Bilddaten auch Genauigkeiten von einem Pixel gewährleisten kann.

3. DIGITALE LUFTBILDKAMERAS

Digitale Bilddaten der Erdoberfläche werden heute nicht nur durch die hochauflösenden Satellitensysteme erfasst, sondern auch durch die neuen digitalen Luftbildkameras. Durch die neuen multispektralen Luftbildkameras wird heute die Lücke zwischen den herkömmlichen filmbasierten Luftbildkameras und den digitalen Satellitenaufnahmesystemen geschlossen. Mit der Einführung der neuen digitalen Luftbildkameras wird der Datenfluss in der photogrammetrischen Datenerfassung und Auswertung vollständig digital, wodurch ein hohes Automationspotential in der digitalen photogrammetrischen Prozesskette möglich wird. Die multispektralen Bilddaten liefern neue Informationen, mit denen neue Anwendungsgebiete erschlossen werden können. Weitere Vorteile der digitalen Kameras sind Zeit- und Kosteneinsparungen, da sowohl Photolaborarbeiten, als auch das Scannen der Luftbilder entfällt.

Die Entwicklung der neuen digitalen Luftbildkameras wurde und wird auch heute noch maßgeblich in Deutschland durch die DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) und durch Z/I Imaging (Joint Venture von Zeiss Oberkochen GmbH und Intergraph) bestimmt. Zur Zeit werden bei der Entwicklung der digitalen Kamerasysteme zwei verschiedene Aufnahmeprinzipien verfolgt, die zum einen auf Zeilensensoren, zum anderen auf Flächensensoren basieren. Das Prinzip des Zeilensensors wird in der High Resolution Stereo Camera (HRSC-AX), eine Entwicklung der DLR in Berlin-Adlershof, und in dem Airborne Digital Sensor (ADS40), die gemeinsam von der DLR und LH Systems (Joint Venture von Leica und Helava Inc.) entwickelt wird, eingesetzt. Dagegen beruht die Aufnahmetechnik der Digital Modular Camera (DMC) von Z/I Imaging auf einem Flächensensor. Die Abb.5 zeigt die drei neuen digitalen Luftbildkameras HRSC-AX, ADS40 und DMC. Die wichtigsten technischen Parameter dieser Kamerasysteme sind in der Tab. 2 zusammengefasst.



Abb. 5: Digitale Luftbildkameras (v.l.n.r.: HRSC-AX der DLR, ADS40 von LH Systems, DMC von Z/I Imaging)

Die Aufnahmegeometrie des Drei-Zeilen-Scanners und die Anordnung der linearen CCD-Zeilen, exemplarisch für die ADS40, ist in Abb. 6 dargestellt. Die drei CCD-Zeilensensoren mit jeweils 12000 Pixel sind so angeordnet, dass die Bildaufnahme gleichzeitig rückwärts, im Nadir und vorwärts erfolgt. Die ADS40 besitzt jedoch insgesamt 7 lineare parallel angeordnete CCD-Sensoren; davon sind drei panchromatische lineare CCD's (vorwärts, Nadir, rückwärts) mit je zwei gestaffelten CCD-Reihen, drei linearen Farb-CCD-Reihen (rot, grün, blau) mit dichroitischem Spiegel zur Einspiegelung des getrennten Lichtes und einer linearen infrarot CCD-Sensorreihe (Skizze siehe auch Abb. 6 links unten). Das Kamerasystem ADS40 wird für den Einsatz im Flugzeug in der kreiselstabilisierenden Aufhängung PAV30 befestigt. Für die Orientierung der jeweils aufgenommenen 7 Sensorzeilen ist eine direkte Georeferenzierung durch Kombination von GPS/INS (z.B. mit Applanix POS System) zwingend erforderlich. Durch die um 3.25 µm gestaffelte Anordnung der jeweils zwei panchromatischen Sensorreihen wird die Anzahl der Pixel rechnerisch auf 24000 erhöht. Die digitale Bilddaten werden auf einen Massenspeicher mit einer Aufnahmerate von 100GB pro Stunde gespeichert. Das Kamerasystem ADS40 wurde schon in mehreren Bildflügen getestet und die ersten Systeme wurden bereits nach Japan verkauft. Der Testblock Sion (Schweiz), bestehend aus 6 Längs- und 2 Querstreifen, lieferte ein Ergebnis von besser als 5 cm für das RMS der 18 verwendeten Passpunkte. Die Ergebnisse weiterer Testflüge und eine detaillierte Beschreibung der Kamera ADS40 sind in FRICKER (2001) zusammengefasst.

Die HRSC-AX beruht wie die ADS40 auf dem Aufnahmeprinzip des multispektralen Drei-Zeilen-Scanners mit linearen CCD-Sensorreihen von jeweils 12000 Pixeln. Das Modell AX150 unterscheidet sich von der ADS40 hinsichtlich Kamerakonstante (150mm) und Anzahl der linearen CCD's (fünf panchromatische und vier multispektrale). Dagegen besitzt das Schwestermodell AX047 ein Weitwinkelobjektiv mit einer Kamerakonstante von 47mm und insgesamt nur drei panchromatische und zwei farbige CCD-Zeilen (Blau und Rot). Die beiden Kamerasysteme AX150/AX047 der DLR sind in NEUKUM et al. (2001) beschrieben. Beide Kameramodelle wurden bereits in praktischen Bildflügen getestet. Ein eingehender Geometrie-Performancetest der im Frühjahr 2001 fertiggestellten HRSC-AX150 erfolgte im

Parameter/Kamera	HRSC-AX150/AXW047	ADS40	DMC-HE	
Systemhersteller	DLR, Deutschland	LH Systems, USA/Schweiz	Z/I Imaging, USA/Deutschl.	
Spektralbereiche	5 PAN, 3 RGB, 1 NIR / 3 PAN, 1 Rot, 1 Blau	3 PAN, 3 RGB, 1 NIR	1 PAN, 3 RGB, 1 NIR	
Sensortyp	Zeilensensor	Zeilensensor	Flächensensor	
Sensor/CCD	12.000	2x12.000 (PAN), 12.000 (MS)	13.500 x 8.000 (PAN), 2.000 x 3.000 (MS)	
Brennweite [mm]	150 / 47	62.5	1:4.0/120 (PAN), 25 (MS)	
Pixelgröße	6.5µm/6.5µm	6.5µm	12µm	
Radiometr. Auflösung	12 bit/Pixel	12 bit/Pixel	12 bit/Pixel	
Georeferenzierung	GPS/INS	GPS/INS	GPS/INS (optional)	
PANPanchromatisch; MSMultispektral; RGBSpektralbänder Rot, Grün, Blau; NIR Nahes Infrarot				

Tab. 2: Wichtige technische Spezifikationen der drei neuen digitalen Luftbildkameras



Abb. 6: Aufnahmegeometrie eines 3-Zeilensensors mit Blickwinkel rückwärts, Nadir, vorwärts (oben); Anordnung der linearen panchromatischen und multispektralen CCD-Sensoren bei der ADS40 (unten links), unkorrigiertes Rohbild (Level 0) und korrigiertes Bild (Level 1) der ADS40. ©FRICKER, 2001

April 2001 über einem südlich von Berlin (Königs Wusterhausen, Ragow) angelegtem Testfeld. Standardgemäß wird die Kamera in einer ZEISS T-AS Aufhängung und mit einem DGPS/INS-System (POS/DG 510C der Firma APPLANIX) betrieben. Aus der Aufnahmehöhe (Flughöhe 1000m über Grund) ergab sich für den Bildflug (5 Längsstreifen und 2 Querstreifen) eine Bodenauflösung von 4 cm/Pixel quer zur Flugrichtung bzw. 16 cm/Pixel in Flugrichtung für alle 5 panchromatischen Stereokanäle. Die Restfehler (RMS in XYZ) betrugen für 22 signalisierte Passpunkte ± 11.8 cm.

Die bereits im April 2000 fertiggestellte HRSC-AX047 wurde ebenfalls über dem Testfeld Ragow getestet. Am 29. April 2000 wurden 6 Streifen aus einer Höhe von 1600 m beflogen (Bodenauflösung 21 cm quer bzw. 20 cm in Flugrichtung). Die Restfehler (RMS in XYZ) betrugen hier für 45 signalisierte Passpunkte \pm 25.1 cm. Die Ergebnisse der Testflüge mit der HRSC-AX150 und AX047 sind in SCHOLTEN et al. (2001) beschrieben. Das Kamerasystem HRSC-AX047 wird von der Firma ISTAR (Nizza, Frankreich) seit einiger Zeit erfolgreich in den USA für die Generierung von Orthophotomosaiken und digitalen Oberflächenmodellen im Auflösungsbereich von 0.5 - 1 m eingesetzt.

Entgegen den beiden oben vorgestellten Kamerasystemen beruht das technische Konzept der digitalen Kamera von Z/I Imaging auf einen bzw. mehreren CCD-Flächensensoren von Philips. Die Pixelgröße ist mit 12 µm fast doppelt so groß wie die der Kameras mit Zeilensensoren. Der einzelne CCD-Chip hat eine Größe von 7000 x 4000 Pixel, so dass sich aus einer Anordnung von vier panchromatischen Kameraköpfen (siehe Abb. 7 links) ein virtuelles Bild von ca. 13500 quer und ca. 8000 Pixel in Flugrichtung ergibt. Die vier panchromatischen Bilder werden durch Messung von Verknüpfungspunkten in den sich überlappenden Bildregionen und durch geometrisches und radiometrisches Mosaiking zu einem virtuellen Bild zusammengesetzt (siehe Abb. 7 Mitte). Für die gleichzeitige Aufnahme von Bildern in Echt- und Falschfarben werden weitere vier Kameraköpfe mit einer jeweiligen Aufnahmefläche von 3000 x 2000 Pixel an den



Abb. 7: Anordnung der panchromatischen Kameraköpfe der DMC (links) und deren schematische Abbildung am Boden, radiometrisches Potential der DMC in dunklen Bereichen (rechts, siehe Aufhellungen in den Kühltürmen und deren Schatten)

äusseren Rand des Kamerasystems angebracht. Für die panchromatischen Sensoren wird eine Kamerakonstante von 120mm eingesetzt, während die multispektralen Sensoren Objektive mit einer Kamerakonstante von 25mm verwenden. Die durch die Bewegung des Flugzeuges erzeugte Bildwanderung wird elektronisch durch eine TDI (Time Delayed Integration) ausgeglichen, in dem während der Belichtung die von den Sensorpixeln aufgenommene Lichtinformation auf dem Chip weitergeschoben wird. Die radiometrische Qualität der digitalen Bilder ist wie bei den Kameras mit Zeilensensoren durch die hohe Anzahl von 12 Bits/Pixel (4096 Graustufen) sehr gut. Somit kann auch in sehr dunklen Bildbereichen nach einer entsprechenden Aufhellung noch gemessen werden (siehe Abb. 7 rechts). Geometrische Untersuchungen wurden für dieses Kamerasystem bisher noch nicht veröffentlicht. Das Systemkonzept der DMC, der Ablauf der Datenverarbeitung und Ergebnisse der ersten Testflüge werden in HINZ et al. (2001) beschrieben.

4. DIGITALE PHOTOGRAMMETRISCHE DATENERFASSUNG

Der Übergang von der analytischen zur digitalen Photogrammetrie wurde in der photogrammetrischen Datenerfassung schon weitestgehend vollzogen, da nach dem ISPRS Kongress in Wien 1996 digitale photogrammetrische Systeme zunehmend in der Produktion eingesetzt werden. Ein wesentlicher Vorteil der digitalen Photogrammetrie ist das Potential, Produktionsprozesse zu automatisieren und damit das Preis/Leistungsverhältnis von photogrammetrischen Produkten wie z. B. Orthophotos erheblich zu verbessern. Somit ist heute der Schlüssel einer effizienten Produktionsumgebung der Grad der Automation in der Datenproduktion und in der Qualitätskontrolle. Daher wird im folgenden nur auf die photogrammetrische Datenerfassung an digitalen Arbeitsstationen eingegangen, obwohl die analytische Photogrammetrie auch heute noch einen hohen Stellenwert in der Praxis speziell bei der Vektordatenerfassung hat.

Die Hauptaufgabe der photogrammetrischen Datenerfassung besteht in der exakten geometrischen Bestimmung von Objekten u.a. sowohl für die topographische Kartenherstellung bzw. Nachführung, als auch für viele GIS-Anwendungen. Die Geodaten können je nach Anwendung bzw. Erfassungsart als Raster- oder Vektordaten vorliegen. Die digitale photogrammetrische Datenerfassung lässt sich in mehrere Arbeitsschritte unterteilen: (1) Scanning, falls die Bilddaten nicht von einer digitalen Luftbildkamera oder einem Satellitensystem kommen, (2) Digitale Aerotriangulation zur Bestimmung der Bildorientierung, (3) Erstellung von digitalen Gelände- und Oberflächenmodellen durch digitale Bildkorrelation, (4) Generierung digitaler Orthophotos und (5) Objektextraktion. Diese oben aufgeführten Arbeitsschritte schließen ein entsprechend qualitatives Datenmanagement ein, um einen automatisierten Datenfluss zu gewährleisten.

4.1. Scanning

Um für die photogrammetrische Datenerfassung die erforderlichen Genauigkeiten zu garantieren, sollten die Luftbilder (s/w Negative oder farbige Diapositive) mit photogrammetrischen Scannern digitalisiert werden. Solche sogenannten High End Scanner wie der DSW500 von LH Systems oder der PhotoScan 2001 von Z/I Imaging gewährleisten eine sehr hohe geometrische Stabilität von ca. 2 µm. Diese Genauigkeiten wurden für Vorgängermodelle dieser beiden Scanner in praktischen Untersuchungen nachgewiesen (BALTSAVIAS et al., 1998; BALTSAVIAS und KAESER, 1998). Geometrische Genauigkeiten im Bereich von 4-8 µm liefern die etwas kostengünstigeren Scanner UltraScan 5000 von Vexel und Rastermaster von Wehrli. Ein Überblick über photogrammetrische Scanner ist in BALTSAVIAS (1998) gegeben.

Je nach Anwendung werden die Luftbilder für die photogrammetrische Datenerfassung mit einer Auflösung von $10 - 30 \ \mu m (847 - 2540 \ dpi)$ gescannt, was bei farbigen Luftbildern mit einer Farbtiefe von 8 Bit/Pixel ein Datenvolumen von 176 MB bis 1587 MB verursacht. Durch die hohe Leistungsfähigkeit der Scanner und der dazugehörigen Computer (512 MB RAM, Pentium IV) werden farbige Luftbilder heute je nach Auflösung und Scannertyp zwischen 5 und 20 Minuten gescannt. Somit können realistischerweise bis zu 50 Bilder pro Tag gescannt werden, wenn man die Vorbereitungszeiten dabei mit berücksichtigt. Manche Scanner bieten die Option, direkt vom Rollfilm (Abb. 8) zu scannen,



Abb. 8: Photogrammetrische Scanner mit Rollfilmoption (v.l.n.r.: DSW500 von LH Systems, PhotoScan 2001 von Z/Imaging und UltraScan 5000 von Vexel

wodurch ein hoher Automationsgrad beim Digitalisieren durch die vorgängige Einstellung der Scanparameter erreicht werden kann. Um einen qualitativ hochwertigen Scan zu erhalten, müssen neben einer periodischen sorgfältigen geometrischen und radiometrischen Kalibrierung des Scanners aber auch bestimmte Umgebungsparameter optimiert werden. Die Scanner sollten in einer Produktionsumgebung so aufgebaut werden, dass sie vor Vibrationen geschützt sind. Eine Klimaanlage im Scannerraum schützt vor Temperaturschwankungen und ein Luftfilter sorgt für eine annähernd staubfreie Scannerumgebung. Die Scanner werden auch in den nächsten Jahren noch ein wichtiger Bestandteil der photogrammetrischen Produktion sein, da digitale Luftbildkameras aufgrund der hohen Kosten erst langsam die filmbasierten Kameras verdrängen werden.

4.2. Digitale Aerotriangulation

Ein wesentlicher Bestandteil der photogrammetrischen Datenerfassung ist die Orientierung der digitalen Luftbilder. Die geometrische Qualität der Orientierung beeinflusst die spätere Datenerfassung in den Luftbildern signifikant. Heute erfolgt die Bestimmung der Luftbildorientierung weitestgehend durch digitale Aerotriangulation, doch die Qualität und Zuverlässigkeit der direkten Georeferenzierung durch GPS und Inertialsysteme wird zunehmend besser, so dass damit zu rechnen ist, dass die Aerotriangulation vielleicht in Zukunft nur noch zur Qualitätskontrolle der direkt bestimmten Sensororientierung eingesetzt wird.

In der digitalen Aerotriangulation (AT) laufen heute die Arbeitsschritte wie Bilddatenimport, Generierung der Bildpyramiden, Innere Orientierung (LUE, 1995; SCHICKLER, 1995; KERSTEN und HAERING, 1997a), Punktübertragung und Bündelblockausgleichung automatisch ab, während die Passpunktmessungen und die Qualitätskontrolle noch halbautomatisch durchgeführt werden müssen. Funktionalität, Automationsgrad und Leistungsfähigkeit sind bei den heute verfügbaren Triangulationssoftwarepaketen unterschiedlich. Die wichtigsten Triangulationssoftwarepakete sind heute u.a. das Multi Sensor Triangulation (MST)/ORIMA von LH Systems, das ISAT von Z/I Imaging, das Match-AT von der Firma Inpho, OrthoBase von Erdas und die Software von VirtuoZo. Ein Vergleich von drei verschiedenen Triangulationssystemen (HATS, das ehemalige MST, Match-AT und Phodis-AT) ist in KERSTEN (1999a) vorgestellt. Bei diesem Vergleich hat sich gezeigt, dass die Ergebnisse und die Triangulationszeiten für den gleichen Testblock ungefähr gleich waren, dass jedoch die Qualität der Bildverknüpfungen jeweils unterschiedlich war.

Die Qualität und die Effizienz der Triangulation hängt vom Erfolg der automatischen Punktübertragung und damit vom Algorithmus für die Punktmessung ab. Dieses wird wiederum hauptsächlich durch die Bildqualität (Film, Bilddigitalisierung und Wetterbedingungen) und durch die Geländecharakteristik (z. B. Vegetation und Höhenunterschiede) beeinflusst. Folgende Aspekte verursachen Probleme für Punktmessungen bei der Triangulation:

- Extreme Höhendifferenzen in Bildern bzw. im Block
- Flugstreifen mit unterschiedlichen Flugdaten (Änderungen der Vegetation im Sommer)
- Schatten durch Befliegung am frühen Morgen oder zur späten Jahreszeit
- Dicht bewaldete Flächen und Seen
- Triangulationsblöcke mit Variation des Bildmaßstabes innerhalb des Blockes (von Streifen zu Streifen)

Die Triangulationssoftware kann hinsichtlich Geschwindigkeit, Genauigkeit, Robustheit, Flexibilität und Benutzerfreundlichkeit durch folgende Maßnahmen verbessert werden:

- (1) Eine bedienungsfreundliche graphische Benutzeroberfläche erleichtert die Konfiguration der Luftbildblöcke und die visuelle Überprüfung der Bild- und Streifenüberlappungen. Gute Näherungswerte für die Orientierungsparameter (z.B. von GPS/INS) garantieren eine hohe Erfolgsrate bei der automatischen Punktübertragung.
- (2) Die Verwendung von vorhandenem DGM als Näherung der Geländeoberfläche erhöht die Erfolgsrate bei der automatischen Punktübertragung, besonders in bergigen und alpinen Gegenden.
- (3) Die Verwendung von GPS/INS-Daten, der Einsatz von zusätzlichen Parametern zur Kompensation systematischer Fehler und ein effizienter Sortieralgorithmus zur Reduktion der Bandbreite im Normalgleichungssystem führt in der simultanen Ausgleichung zu mehr Flexibilität und zu einer signifikanten Verkürzung der Rechenzeit.
- (4) Die Implementierung eines kombinierten Messalgorithmus (eigenschafts-basiertes und flächen-basiertes Matching nach der Methode der kleinsten Quadrate) erhöht die Genauigkeit der Messungen.
- (5) Die Integration einer Bündelblockausgleichungssoftware in den Messalgorithmus oder der Einsatz von On-line Triangulationalgorithmen (sequentielle Schätzung in der Bündelblockausgleichung und grobe Fehlersuche mit Hilfe des Data Snoopings) während der automatischen Punktübertragung verbessert die Qualität der automatischen Messungen durch Eliminierung von groben Fehlern schon in der Messphase.
- (6) Die Qualitätskontrolle der Aerotriangulation sollte neben den statistischen Werten aus der Bündelblockausgleichung auch eine effiziente Visualisierung der Bildverknüpfungen beinhalten.

Verschiedene Anwender berichten von ihren praktischen Erfahrungen bei der digitalen Aerotriangulation (KERSTEN und O'SULLIVAN, 1996b; HARTFIEL, 1997; KERSTEN und HAERING, 1997b, KERSTEN, 1999b; KAESER et al., 1999; URSET und MAALEN-JOHANSEN, 1999). Mit den digitalen Triangulationssystemen werden theoretische und empirische Genauigkeiten erreicht, die den einer analytischen Triangulation entsprechen. Während man in der analytischen Triangulation eine Genauigkeit von 5 µm im Bildraum erwarten kann, liegt die Genauigkeit mit digitalen Syste-



Abb. 9: Digitales Oberflächenmodell DOM/2.5 der Stadt Biel/Schweiz (links Rohdaten, rechts editiert)

men bei besser als 1/3 Pixel im Bildraum. Das entspricht bei einem Bildmaßstab von 1: 10000 und einer Scanauflösung von 15 µm einer Objektpunktgenauigkeit von besser als 5 cm.

Bezogen auf die Arbeitszeiten des Operateurs sind digitale Aerotriangulationen heute um den Faktor 2-3 schneller als Triangulationen mit analytischen Plottern. Dabei sind die Zeiten für das Scanning nicht berücksichtigt. Mit digitalen Systemen können Luftbilder in einem topgraphisch nicht so anspruchsvollen Gebiet in weniger als 10 Minuten trianguliert werden (KERSTEN, 1999b). Die Triangulationszeiten pro Bild beziehen sich auf die reine Arbeitszeit des Operateurs und nicht auf Rechenzeiten des Computers.

4.3. Erstellung von digitalen Oberflächen- und Geländemodellen durch Bildkorrelation

Heute werden digitale Oberflächen- und Geländemodelle durch Abtasten der Erdoberfläche mit verschiedenen Sensoren wie z.B. Mikrowellen (Radar) und Laser-Scanning sowie durch automatische Bildkorrelation in digitalen Luftbildern erzeugt. Die Generierung von Oberflächenmodellen in städtischen Gebieten durch digitale Bildkorrelation wird bereits erfolgreich eingesetzt. Die Firma ISTAR aus Nizza erstellt in Zusammenarbeit mit der DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) digitale Oberflächenmodelle grosser europäischer Städte. Dazu werden die Luftbilder digital mit der HRSC-A (High Resolution Stereo Camera) der DLR aufgenommen, die Oberflächenmodelle durch Bildkorrelation automatisch als 1m Raster generiert und anschliessend editiert (RENOUARD und LEHMANN, 1999).

Die Generierung der digitalen Oberflächenmodelle erfolgt mit photogrammetrischen Arbeitsstationen wie z.B. die DPW770 von LH Systems, die mit entsprechender Software besonders geeignet für diese Art der Datenerfassung ist. Für die digitale Bildkorrelation der Oberflächenmodelle wird das Modul ATE (Automatic Terrain Extraction) des Softwarepaketes SOCET SET (Softcopy Exploitation Tools) verwendet, während für die Editierung der Daten das Modul ITE (Interactive Terrain Edit) benutzt wird. Die automatisch erzeugten Rohdaten müssen durch Editierung mit einem Flächen- oder geomorphologischen Editor von groben Fehlern bereinigt werden. Die Abb. 9 zeigt links als schattiertes Relief einen Datensatz, der durch digitale Korrelation in einem 2m-Raster als Oberflächenmodell erzeugt wurde, und rechts die editierte Version des gleichen Datensatzes mit den klar erkennbaren Strukturen der Häuser und Wälder.



Abb. 10: Schattierte Darstellung eines Ausschnittes des überarbeiteten Oberflächenmodells (links) und Geländemodells (rechts) der Stadt Basel



Abb. 11: Perspektivische Ansichten vom DOM/2.5 der Stadt Zürich (links und Mitte) und die Qualitätskontrolle durch Überlagerung der Höhenlinien mit einem entsprechenden Orthophoto (rechts)

Durch zusätzliches Editieren des Datensatzes könnte aus einem Oberflächenmodell, das sowohl Vegetation, als auch künstliche Bauten wie Häuser enthält, eine Geländemodell mit der reinen Geländeroberfläche entstehen. In Abb. 10 ist ein Ausschnitt der Stadt Basel als Oberflächen- und als Geländemodell dargestellt, wobei hier allerdings die Vegetation der Waldflächen nicht eliminiert wurde. Eine detaillierte Beschreibung über die Erstellung digitaler Oberflächenmodelle mit der digitalen Station von LH Systems wird in KERSTEN et al. (2001) gegeben.

Die Qualität der generierten Oberflächen- und Geländemodelle wird visuell durch perspektivische Ansichten oder durch Überlagerung der Höhenlinien mit entsprechenden Orthophotos (siehe Abb. 11) auf Vollständigkeit und Richtigkeit und/oder empirisch durch Vergleich mit Referenzdaten auf Genauigkeit überprüft. Das Genauigkeitspotential der digitalen Bildkorrelation hängt in erster Linie vom verfügbaren Bildmaterial (Bildmaßstab, Orientierung), der Topographie und dem Editieraufwand in den Bildern ab. Praktische Untersuchungen für Datensätze, die aus digitalen Luftbildern im Bildmaßstab von ca. 1: 27000 und einer Scanauflösung von 25 μ m generiert wurden, haben gezeigt, dass Genauigkeiten von ca. \pm 5m für Oberflächenmodelle mit einem 10m Raster und ca. \pm 1m für ein 2.5m Raster erreicht werden können (KERSTEN et al., 2001).

4.4. Erstellung von digitalen Orthophotos

Digitale Orthophotos (DOPs) werden durch automatische digitale Prozesse hergestellt und sind die ersten operationellen Produkte der modernen digitalen Photogrammetrie. Für die Generierung von DOPs müssen folgende Ausgangsdaten vorhanden sein: (a) Digitale Luft- oder Satellitenbilddaten, (b) Orientierungsparameter der Luft- oder Satellitenbilder und (c) digitales Oberflächen- oder Geländemodell des vom Luft- bzw. Satellitenbild abgebildeten Gebietes.

Für die automatische Generierung von digitalen Orthophotos wird für jedes Pixel im Orthophoto geometrisch der zugehörige Ort im Luft- bzw. Satellitenbild und radiometrisch der entsprechende Dichtewert aus dem Bild bestimmt. Dabei wird zur geometrischen Entzerrung über die Lage des Orthophotopixels, die aus den Kollinearitätsgleichungen bekannt ist, die dazugehörige Geländehöhe aus dem Geländemodell interpoliert. Die jeweiligen Bildkoordinaten werden anschliessend in das entsprechenden Referenzkoordinatensystem transformiert. Für die radiometrische Entzerrung wird jedem Orthophotopixel ein Grau- bzw. Farbwert zugewiesen, der aus der Pixelnachbarschaft des verwendeten Bildes interpoliert wird. Die benötigte Rechenzeit für die Orthophoto-Generierung hängt u.a. von der verfügbaren Computerperformance und der gewählten Auflösung ab, doch liegt sie heute im allgemeinen im Bereich von einigen Minuten pro Bild. Werden mehrere Orthophotos zu einem gesamten Orthophoto zusammengesetzt, so spricht man vom Mosaiking. Bei diesem Prozess werden besonders die Schnittstellen bzw. Überlappungsbereiche der einzelnen Orthophotos radiometrisch und geometrisch aneinander angepasst. Dabei stellt sich die radiometrische Anpassung der einzelnen Or-



Abb. 12: Digitales Orthophoto-Mosaik vor und nach radiometrischer Farbanpassung und Überarbeitung mit Photo-Shop (LK25 Kartenblatt 1071, Fläche 12km x 17.5km, reduziert von Auflösung 10m)

thophotos zu einem flächendeckenden Mosaik als größtes Problem heraus, da gescannte Luftbilddaten selten homogene Farbrepräsentationen haben. Heute bieten verschiedene Softwareprodukte eine automatische radiometrische Anpassung der einzelnen Orthophotos beim Mosaiking an, doch sehr oft ist die Qualität nicht befriedigend, so dass eine manuelle Anpassung durch Bildbearbeitungssoftware wie PhotoShop abschließend erfolgen muss. Abb. 12 zeigt ein Orthophoto-Mosaik vor und nach radiometrische Farbanpassung. Vielleicht ist da in Zukunft von den digitalen Luftbildkameras eine bessere radiometrische Qualität und Homogenität zu erwarten.

Digitale Orthophotos können hinsichtlich Auflösung in zwei Klassen aufgeteilt werden. Für viele GIS-Anwendungen werden Orthophotos mit einer Auflösung von 50cm bis 5m erstellt, doch für spezielle Anwendungen können auch hochauflösende Orthophotos von 10cm bis 40cm erstellt werden. Daraus ergibt sich für ein farbiges Orthophoto von 10cm Auflösung ein Datenvolumen von 300 MB/km². Das Genauigkeitspotential von digitalen Orthophotos liegt je nach Geländecharakteristik im Bereich von 1-3 Pixel, was bei einer Auflösung von 10cm einer Genauigkeit von 30cm entspricht.

4.5. Objektextraktion und Erstellung von 3-D Stadtmodellen

Die 3-D Objektextraktion in digitalen Stereoluftbildern erfolgt heute noch manuell oder halbautomatisch. Automatisierte Verfahren zur Erfassung von Strassen oder Gebäuden sind heute noch im Stadium der Forschung und Entwicklung, wobei hier in absehbarem Zeitraum nicht unbedingt mit Erfolg gerechnet werden muss, da die automatische Erfassung von 3-D Objekten wie z.B. Häusern ein sehr komplexes Thema darstellt.

Bei manuellen Messungen am analytischen Plotter oder an der digitalen photogrammetrischen Station lassen sich je nach Qualität der Auswertesoftware und der (digitalen) Luftbilder Lagegenauigkeiten von 5-10µm im Bild und Höhengenauigkeiten von 0.1-0.15 ‰ der Flughöhe über Grund für 3-D Objekte erreichen. Bei einem Bildmaßstab von 1: 10000 entspricht das einer geschätzten Lagegenauigkeit von bis zu 5 cm und einer Höhengenauigkeit von bis zu 15 cm für gemessene und gut identifizierbare Punkte.

Bei der Generierung von 3-D Stadtmodellen hat sich die halbautomatische Methode als sehr effizient erwiesen, bei der Dachlandschaften und Geländemodelle photogrammetrisch manuell in Luftbildstereomodellen erfasst werden und die anschließende Datenstrukturierung mit einer Software wie z.B. CyberCity Modeler (GRUEN et al., 1998) automatisch erfolgt. Bei der Datenstrukturierung (Topologiebildung) werden die nach einem bestimmten Messschema erfassten Dächer automatisch mit dem Geländemodell verschnitten, so dass daraus die Flächen der Gebäudefassaden und Dächer entstehen. Mit dieser Methode können 3-D Stadtmodelle mit hohen Qualitätsanforderungen (Genauigkeit und Detaillierungsgrad) erstellt werden. Der Detaillierungsgrad hängt von der Aufgabenstellung ab und die Genauigkeit wird durch den Bildmaßstab der Luftbilder bzw. durch die verwendete Brennweite der Kamera beeinflusst. Bei verschiedenen Projekten hat sich gezeigt, dass sich für die Erstellung von 3-D Stadtmodellen Luftbilder kommen trotz der hohen Auflösung von ca. Im heute noch nicht für die Erfassung von 3-D Stadtmodellen in Frage, da Details in den Bilder nicht zu messen sind (siehe auch Abb. 4). Die Geschwindigkeit der Datenerfassung (Dächer) hängt von dem geforderten Detailreichtum, vom Bildmaßstab und von der Komplexität der zu erfassenden Gebäude ab. In GRUEN et al. (1998) wird ein Tagespensum von bis 500 gemessenen Dächern für einen erfahrenen Operateur angegeben. Abb. 13 visualisiert 3-D Stadtmodelle als synthetische perspektivische Ansichten auf der Basis von digitalen Orthophotos.

Ein weiteres halbautomatisches System für die Erfassung von Gebäudemodellen stellt die Software InJECT von der Firma Inpho (<u>www.inpho.de</u>) dar. Der dort gewählte Ansatz basiert auf Mehrbildverarbeitung, Steuerung durch den Operateur und die Unterstützung der Erfassung der 3-D Geometrie durch automatisierte Messkomponenten. Mit solchen Komponenten werden für eine Reihe von Anwendungen Erfassungszeiten von ca. 20 Sekunden pro Primitiv (Objekt) erreicht (GUELCH et al., 2000).



Abb. 13: Synthetische perspektivische Ansichten von 3-D Stadtmodellen in Kombination mit digitalen Orthophotos

5. PRODUKTE

Die wichtigsten Produkte der digitalen photogrammetrischen Produktion sind digitale Oberflächen- und/oder Geländemodelle, digitale Orthophotos und neben Vektordaten für verschiedene Anwendungen auch 3-D Stadtmodelle. Im folgenden werden einige dieser Produkte und entsprechende Anwendungsbeispiele vorgestellt.

5.1. Digitale Oberflächen- und Geländemodelle

Die wichtigsten Anwendungen für digitale Oberflächen- und Geländemodelle sind die Sender- und Funknetzplanung in der Telekommunikation und die Bereitstellung von Höheninformationen in topographischen Karten. Für den boomenden Telekommunikationsmarkt hat die Swissphoto AG im Zeitraum von Januar bis Ende August 1999 flächendeckend für die ganze Schweiz ein digitales Oberflächenmodell mit einer Rasterweite von 10m (DOM/10) durch digitale Bildkorrelation erstellt. Die Grundlagedaten für die Generierung der Oberflächenmodelle bildeten die digitalen Luftbilder des Projektes Swissphoto aus den Jahren 1995/96. Abb. 14 zeigt ein farbkodiertes Schattenrelief des Oberflächenmodells DOM/10 von der ganzen Schweiz, während in Abb. 15 ein Shaded Relief vom Blatt 1168 Langnau i.E. der Landeskarte 1: 25000 dargestellt ist. Das Shaded Relief in Abb. 15 zeigt deutlich die Waldstrukturen, die ein wichtiges Kriterium für das Produkt DOM/10 darstellen. Daher wurde bei der Editierung besonderen Wert auf die korrekte Repräsentation des Waldes gelegt. Dagegen wurden in den urbanen Gebieten die Häuser und sonstige künstlichen Bauten durch Editierung eliminiert, so dass das DOM/10 kein vollständiges Oberflächenmodell darstellt. Das DOM/10 ist als Kachel im Blattkartenschnitt der LK25 gespeichert und auf CD-ROM erhältlich. Die Datenmenge pro Kachel ist abhängig vom Fileformat (XYZ, MLT, DXF, ArcInfo Grid) und variiert zwischen 16 und 55 MByte. Die Qualität des DOM/10 wurde laufend visuell durch den Operateur bei der Editierung überprüft. Grobe Fehler wurden bereits am Anfang der Editierarbeiten im Shaded Relief deutlich sichtbar und korrigiert. Eine unabhängige und geometrische Kontrolle des DOM/10 stellt der Vergleich mit Kontrollpunkten dar, in denen nachgewiesen wurde, dass das DOM/10 im Mittelland ca. 2m und in den Alpen ca. 4m genau ist.



Abb. 14: *Shaded Relief* des digitalen Oberflächenmodell DOM/10 (Rasterweite 10m) vom Gebiet der Schweiz (© ComSite Engineering AG/SEL Verteidigungssysteme GmbH)



Abb. 15: Shaded Relief des digitalen Oberflächenmodell DOM/10 vom LK25 Blatt 1168 Langnau i.E./Schweiz

Zusätzlich wurde im Jahr 2000 in den grössten Städten der Schweiz ein Oberflächenmodell mit einer Gitterweite von 2.5m generiert, um höheren Anforderungen bei der Netzplanung in urbanen Gebieten gerecht zu werden. Das digitale Oberflächenmodell DOM/2.5 wurde für die Städte Basel, Bern, Biel, Genf, Lausanne, Luzern, Zug und Zürich im Zeitraum von Januar bis August 2000 bei der Swissphoto AG erstellt. Im Gegensatz zum DOM/10 liegt beim DOM/2.5 die Bedeutung auf die künstlichen Bauten und Gebäude. Daher war beim DOM/2.5 der Editieraufwand auch erheblich höher. Generell wurde in den urbanen Gebieten durch Editierung zuerst ein Geländemodell erzeugt, in dem anschließend die Gebäude durch Messungen von Bruchkanten hinzugefügt wurden. Die detaillierten Strukturen der Gebäude wurden dabei nicht gemessen, so dass jedes Gebäude als genähertes Bauklötzchenmodell dargestellt wird. Die Strukturen der Gebäude sind in Abb. 10 an dem Beispiel der Stadt Zürich in zwei perspektivischen Ansichten illustriert. Das DOM/2.5 ist ebenfalls als Kachel mit einer Fläche von 4km x 3.75km gespeichert und auf CD-ROM erhältlich. Diese Kachelgrösse entspricht einem 1/16 Kartenblatt der LK 1: 25'000. Eine einzelne Kachel weist eine Datenmenge von ca. 16 MByte für ArcInfo Grid bzw. ca. 70 MByte für ASCII XYZ auf. In Abb. 16 sind ausgewählte Kacheln der Städte Basel, Bern, Genf (oben), Lausanne, Luzern und Zug (unten) dargestellt. Die Qualität des DOM/2.5 wurde auch hier während der Editierung visuell durch den Operateur überprüft. Zusätzlich konnte nachträglich die Vollständigkeit stichprobenartig durch Überlagerung der Höhenlinien (Äquidistanz 2.5m) auf das digitale Orthophoto (Auflösung 75cm) kontrolliert werden (siehe Abb. 10). Ähnlich wie beim DOM/10 wurde die geometrische Qualität des DOM/2.5 durch Vergleich mit Kontrollpunkten beurteilt. Das DOM/2.5 weist eine Genauigkeit von ca. 1m auf, wobei die maximalen Abweichungen knapp 3m betragen. Da die Dachstrukturen der Gebäude nicht detailliert erfasst wurden, kann man die Genauigkeit der Dächer mit ca. 1-3m abschätzen. Umfangreichere Untersuchungen wurden jedoch dazu noch nicht



Abb. 16: Kacheln DOM/2.5 (Shaded Relief) von Basel, Bern, Genf (oben), Lausanne, Luzern und Zug (unten)

durchgeführt.

Die technischen Spezifikationen und die Produktion der beiden Oberflächenmodelle DOM/10 und DOM/2.5 werden in KERSTEN et al. (2001) detailliert beschrieben.

5.2. Digitale Orthophotos

Aufgrund der Vielseitigkeit und Flexibilität finden Orthophotos als schnell verfügbare Geobasisdaten immer mehr Anwender wie z.B. in der Landesvermessung, bei Gemeinden, Ingenieurbüros, Transport- und Verkehrsbetriebe, Planern, Architekten, in der Umwelt, Forschung, Ver- und Entsorgungsindustrie, Kommunikation und Leitsysteme sowie im Tourismus. Besonders die GIS-Anwender in der öffentlichen Verwaltung und in privaten Büros setzen Orthophotos als Grundlage für Analysen und Datenvisualisierungen ein. In der heutigen schnelllebigen Welt nimmt die Nachfrage nach Geodaten so sehr zu, dass in mehreren europäischen Ländern private Unternehmen die flächendeckende Produktion von aktuellen und genauen Geodaten in der zweiten Hälfte der neunziger Jahre übernommen haben. In Dänemark hat die Firma Kampsax (www.kampsax.dk) 1995 und 1999 für das ganze Land Luftbilder aufgenommen, um daraus als entsprechendes Produkt Dänemarks Digitale Orthophotos (DD01995 und DD01999) in Farbe mit einer Pixelgröße von 40cm zu erstellen. 2001 hat Kampsax dann aus den Luftbildern von 1999 (ca. insgesamt 6000 Bilder im Bildmaßstab 1: 25000) speziell für die urbanen Gebiete Orthophotos (DD0town) mit einer Auflösung von 10cm generiert.

In der Schweiz hat die Firma Swissphoto AG (www.swissphoto.ch) im Zeitraum von August 1995 bis Oktober 1998 flächendeckend für die ganze Schweiz digitale Orthophotos in Farbe mit einer Auflösung von 75cm bzw. 62.5cm erstellt. Die Abb. 17 zeigt das 1. nationale Orthophoto der Schweiz (DOP75) als unbearbeiteten Rohdatensatz. Die Befliegung der Schweiz erfolgte in 3 Phasen, wobei simultan zwei Kameras jeweils mit Farb- bzw. Infrarotfilm eingesetzt wurden. In der Phase 1 wurde von Mai bis August 1995 das Mittelland mit allen Wirtschaftszentren in einem Massstab von ~1: 27'000 beflogen. Die Befliegung der Alpengebiete (Massstab ~1: 35'000-1: 50'000) und der Alpentäler (~1: 24'000) erfolgte in den Monaten August bis Oktober 1995 (Phase 2). Im Juli 1996 (Phase 3) wurden einige kleine Gebiete, in denen im 95er Flug leichter Dunst und vereinzelt Wolken auftraten, wiederholt beflogen. Ca. 7000 analoge Farbluftbilder wurden mit einer Auflösung von 25 µm (1016 dpi) gescannt, was einer Datenmenge von ca. 240 MByte pro Bild entspricht. Die Auflösung entspricht je nach Bildmaßstab einer Pixelgrösse von ca. 0.63 - 1.30 m am Boden. Die Orientierungen von ca. 6000 Luftbildern wurden durch digitale Aerotriangulation bestimmt (KERSTEN, 1999b). Auf der Grundlage von erstellten digitalen Oberflächenmodellen und dem digitalen Höhenmodell (DHM25) der Landestopographie wurden die Orthophotos berechnet. Die Orthophotos werden hauptsächlich im TIFF Format in folgenden Kachelgrößen angeboten: (a) 3km x 3km mit einer Pixelgröße von 0.75m, (b) 4375m x 3000m mit einer Pixelgröße von 0.625m. Außerdem sind die Orthophotos in drei verschiedenen Qualitätsstandards erhältlich (siehe Abb. 18): (a) RAW Qualität ohne Bildbearbeitung, (b) GIS Qualität durch Bildbearbeitung mit PhotoShop für GIS-Anwender, und (c) PRINT Qualität durch verfeinerte Bildbearbeitung mit PhotoShop für Anwendungen im Druckbereich.

In Großbritannien hatte die Firma NRSC (National Remote Sensing Centre, <u>www.nrsc.co.uk</u>) 1995 ein Orthophoto-Projekt gestartet, um hauptsächlich aus Archivluftbildern im Bildmaßstab 1: 25000 digitale Orthophotos mit einer Pi-



Abb. 17: Swissphoto DOP75: 1. Nationales Orthophoto der Schweiz von 1995



Abb. 18: Radiometrische Qualitätsstandards des nationalen Orthophotos der Schweiz (RAW, GIS, PRINT)

xelgröße von 0.8m zu erstellen (PETRIE, 2001). Für die Orientierung der Luftbilder wurden Passpunkte aus den Standardkarten 1: 2500 digitalisiert. Die Orthophotos wurden mit Höhenmodellen, die aus den Höhenlinien der 1:10000 Kartenserie des Ordnance Survey digitalisiert wurden, berechnet. Für den Anwender standen die Orthophotos dann als 5km x 5km Kacheln oder als 1km x 1km Minikacheln zur Verfügung. Mit diesen Orthophotos wurde die Nachfrage nach hochauflösenden aktuellen Daten größer, so dass in einem Joint Venture der beiden privaten Firmen NRSC und Simmons Aerofilms Ltd. (www.simmonsmap.com) das sehr ambitiöse Millennium Aerial Photographic Survey (MAPS) Projekt 1999 ins Leben gerufen haben, um von Großbritannien qualitativ hochwertige Orthophotos zu generieren. Im Rahmen des Projektes wird eine von Fläche ca. 130000 km² mit ungefähr 80000 Luftbildern im Bildmaßstab 1: 10000 bearbeitet, um aus den gescannten farbigen Luftbildern (Auflösung 1200 dpi = 21µm) Orthophotos mit einer Auflösung von 25cm zu berechnen (SIMMONS, 2000). Das Projekt ist noch nicht abgeschlossen.

5.3. 3-D Stadtmodelle

Verschiedene Anwender in der Stadtplanung, Telekommunikation, Location Based Services, Tourismus, Immobilienbranche, Versicherungen sowie im Umwelt- und Zivilschutz haben einen zunehmenden Bedarf an 3-D Stadtmodellen, um mit diesen komplexen Daten Planungen, Analysen, Visualisierungen und Simulationen für unterschiedliche Aufgabenstellungen durchführen zu können. Jedoch stellt die Erfassung und der Aufbau eines 3D-Stadtmodelles als Geobasisdatenbestand in den öffentlichen und privaten Aufgabenbereichen einer Großstadt eine große Herausforderung dar. Langjährige und umfangreiche Erfahrungen mit der Einführung und Nutzung eines 3D-Stadtmodells als Geobasisdatenbestand liegen noch nicht vor. Bisher wurden immer nur für bestimmte kleinere Gebiete und/oder für eine konkrete Aufgabe und spezielle Anwendungen entsprechende Modelle aufgebaut.

Das Amt für Geoinformation und Vermessung der Behörde für Bau und Verkehr in Hamburg hat im Jahr 2000 damit begonnen, ein flächendeckendes 3D-Stadtmodell auf Grundlage der Digitalen Stadtgrundkarte (DSGK) als sogenanntes DSGK-3D in einem zweistufigen Verfahren aufzubauen (CIESLIK, 2002). In der Stufe 1 entstand bereits ein einfaches, aber flächendeckendes Blockmodell mit der Grundrissgeometrie aus der DSGK (1:1000), wobei über die bekannte Anzahl der Vollgeschosse und Nutzungsart die dritte Dimension anhand einer durchschnittlichen Geschosshöhe zuge-ordnet wurde. Abb. 19 links zeigt die einfache Blockstruktur der Gebäude mit Flachdach. Für die Stufe 2 werden die Dachlandschaften (Abb. 19 rechts) detailliert photogrammetrisch erfasst und anschließend mit den Geländemodell verschnitten. Dadurch werden in Zukunft für diverse Anwendungen und Anforderungen unterschiedlich qualitative Datensätze des 3-D Stadtmodells vielen Interessenten zur Verfügung stehen.

In folgenden Anwendungsbereichen können solche digitale 3-D Stadtmodelle eingesetzt werden:

- Aufbau eines 3-D Stadt GIS
- Stadtplanung und -entwicklung (computerunterstützter Städtebau)
- Bauprojektierung (Planung, Gestaltung, Baubewilligung, Architekturwettbewerbe)
- Umweltschutz (Analyse der Immissionsausbreitung wie z.B. bei Verkehrslärm, Luftschadstoff, Mikroklima, etc.)



Abb. 19: 3-D Stadtmodell von Hamburg (DSGK-3D) in der Stufe 1(links) und in Stufe 2 (rechts), © Amt für Geoinformation und Vermessung, Behörde für Bau und Verkehr Hamburg (CIESLIK, 2002)

- Versorgung (Solarzellenausrichtung auf Dächern für die Energieversorgung)
- Telekommunikation (Simulation der Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen im urbanen Mobilfunknetz für die Bestimmung von Antennenstandorten)
- Immobilienbranche (Gebäudeinformationssysteme)
- Versicherungen (Simulation von Risiken bei gefährlichen Transporten oder Naturkatastrophen)
- Tourismus (Informationssysteme mit attraktiver 3-D Visualisierung wie z. B. die virtuelle Durchwanderung oder Überfliegung der Stadt)
- Computerspielbranche (Erstellung von realitätsnahen Computerspielen)
- Fahrschulen für Autos und Strassenbahnen (Simulation von Verkehrssituationen)
- Notruf (Aufbau von Gebäudeinformationssystemen für Polizei, Notarzt und Feuerwehr)
- Fahrzeugnavigation
- Location Based Services

6. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Datenerfassung ist heute noch der Flaschenhals für die weit verbreitete Anwendung von Geoinformationssystemen, besonders wenn die Kriterien "flächendeckend und aktuell" erste Priorität haben. Mit digitalen oder digitalisierten Bilddaten besteht die grundsätzliche Möglichkeit, den Prozess der Geodatenerfassung und Objektextraktion zu automatisieren. Automatische Methoden und automatisierte Arbeitsabläufe bei der photogrammetrischen Datenerfassung gewähren eine hohe Effizienz bei der Erfassung und eine schnelle Verfügbarkeit von Geodaten. Durch die hochauflösenden Satellitenbilddaten von IKONOS-2, EROS-A1 und QuickBird-2 sowie den digitalen, multispektralen Bildern der neuen Generation von Luftbildkameras (ADS40 und DMC) stehen qualitativ hochwertige Rasterdaten zur Verfügung, um aus Pixeln die gewünschten Geodaten zu generieren. Die hohe geometrische und multispektrale Auflösung der Satellitenbilder und der digitalen Luftbilder werden eine bisher klare Trennung zwischen der Satellitenfernerkundung und der Luftbildphotogrammetrie verwischt, da es für viele Anwender schwierig sein wird, die Bilddaten und die daraus abgeleiteten Produkte zu unterscheiden.

Sowohl aus Satellitenbilddaten, als auch aus digitalen Luftbildern können in einer automatisierten photogrammetrischen Produktion digitale Orthophotos effizient hergestellt werden. Die Genauigkeit dieser Produkte liegt unter guten Bedingungen im Bereich von 1-3 Pixeln. Es hat sich auch in den letzten Jahren gezeigt, dass digitale Orthophotos sich einer zunehmenden Akzeptanz im Geodatenmarkt erfreuen. Das war nicht immer so. Hier waren und sind heute noch die Fahrzeugnavigations- und die GIS-Industrie die treibende Kraft für aktuelle und flächendeckende Geodaten. Private Investoren wie z.B. in der Schweiz, in Dänemark und auch in Großbritannien haben den Mut gehabt, flächendeckende Geodaten in Form von Orthophotos zu erstellen und zu vermarkten.

Der Telekommunikationsmarkt hat zudem durch den teilweise unkoordinierten Bedarf ein Boom bei der Erfassung von 3-D Daten wie Gelände-, Oberflächen- sowie Stadtmodelle gebracht. Dadurch hat sich die Technik und die Methodik zur automatischen und halbautomatischen 3-D Datenerfassung weiterentwickelt. Die Generierung von Oberflächenmodellen ist heute durch Bildkorrelation vollautomatisch, doch die gewünschte Qualität wird auch heute noch über intensives Editieren der Daten erreicht. Mit dem DOM/10 und DOM/2.5 wurden in der Schweiz zwei Produkte erstellt, die gerade für die (mobile) Telekommunikation im Bereich der Netz- und Funkplanung eine sehr wichtige Grundlage waren.

Bei der Erstellung von 3-D Stadtmodellen greift man nach der Automationseuphorie Ende der achtziger und Anfang der neunziger Jahre vermehrt auf halbautomatische Methoden zurück, die detaillierte und genaue 3-D Daten garantieren. Durch kleinere Projekte und Anwendungen wurden die Einsatzmöglichkeiten digitaler 3-D Stadtmodelle aufgezeigt. In Zukunft wird die Hauptaufgabe vieler staatlichen Vermessungsbehörden sein, flächendeckend 3-D Stadtmodelle und Landschaftsmodelle aufzubauen und nachzuführen. Dann werden aktuelle Kartenwerke aus Datenbanken projekt- und kundenorientiert zur Verfügung gestellt.

Eine zukünftige Vision stellt die on-the-flight Produktion von Orthophotos und Geländemodellen in Flugzeugen, die mit einer digitalen Kamera, mit DGPS und einem Inertialsystem (INS) sowie mit einem Laser-Scanning-System ausgerüstet sind, dar (Abb. 20). Die Orientierung des Kamerasystems, das hochauflösende Bilddaten auf einer real-time Disk speichert, wird durch DGPS und INS bestimmt, während das Geländemodell parallel durch Laser-Scanning gemessen wird. Mit diesen erfassten Daten können anschließend während des Fluges digitale Orthophotos generiert werden, so dass der Kunde nach dem Flug seine Daten auf CD-ROM oder DVD bereits am Flughafen in Empfang nehmen kann. Die technischen Voraussetzungen sind dafür heute bereits vorhanden, doch wird es noch einige Zeit dauern, bis alle Schnittstellen in einem komplettem Multisensor Real-Time-Mapping System (Datenerfassung, Postprocessing und Qualitätskontrolle) mit der entsprechenden Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit funktionieren.



Abb. 20: Multisensor-Flugzeug für zukünftiges Real-Time Mapping

LITERATUR:

- BALTSAVIAS, E. P., 1998. Photogrammetric scanner survey, technological developments and requirements. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32 (1), pp. 163-170.
- BALTSAVIAS, E. P., HAERING, S., KERSTEN, TH., DAM, A., 1998. Geometric and Radiometric Evaluation of the DSW300 Roll Film Scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 53, No. 4, pp. 217-234.
- BALTSAVIAS, E. P., KAESER, CH., 1998. Evaluation and testing of the Zeiss SCAI roll film scanner. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32 (1), pp. 67-74.
- BALTSAVIAS, E., PATERAKI, M., ZHANG, L., 2001. Radiometric and geometric evaluation of Ikonos GEO images and their use for 3D building modeling. *Proc. Joint ISPRS Workshop "High Resolution Mapping from Space 2001"*, Hannover, Germany, 19-21 September, 21 p. (on CD-ROM).
- CALÖRTSCHER, M., KERSTEN, Th., 1998. Hochauflösende digitale Orthophotos in der Planungs- und Ingenieurpraxis. VPK - Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Heft 9, pp.470-477.
- CIESLIK, B., 2002. DSGK-3D in Hamburg Erfahrungen mit der Einführung eines 3D-Stadtmodells in Verwaltung und Wirtschaft. *Tagungsband "Kartographie als Baustein moderner Kommunikation", Symposium Praktische Kartographie 2002*, 6. 8. Mai, Königslutter.
- CHENG, P., TOUTIN, T., 2002. Orthorectification and DEM generation from high resolution satellite data. *Paper pre*sented the 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 5-9 November, Singapore.
- FRASER, C., BALTSAVIAS, E., GRUEN, A., 2001. Ikonos Geo Stereo Images: Geometric Potential and Suitability for 3D Building Reconstruction. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation: Geodaten schaffen Verbindun*gen, E. Seyfert (Ed.), Publikation der DGPF, Vol. 10, pp. 113-121.
- FRICKER, P., 2001. ADS40 Progress in digital aerial data collection. Photogrammetric Week '01, Eds. Fritsch/Spiller, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 105-116.
- FRITZSCHE, H., 2001. Debatte im Deutschen Bundestag zum Thema Geoinformation (Berichte aus Forschung und Praxis). ZfV Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 3, pp. 156-169.
- GRÜN, A., STEIDLER, F., WANG, X., 1998. CyberCity Modeler ein System zur halbautomatischen Generierung von 3-D Stadtmodellen. VPK - Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Nr. 9, pp. 457-460.
- GUELCH, E., MÜLLER, H., LÄBE, Th., 2000. Semi-automatische Verfahren in der photogrammetrischen Objekterfassung. PFG - Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Heft 3, pp. 199-209.
- HARTFIEL, P., 1997. Higher Performance with-Automated Aerial Triangulation. *Proceedings of 43rd Photogrammetric Week '97*, Eds. Fritsch/Hobbie, Wichmann Verlag Karlsruhe, pp. 109-113.
- HINZ, A., DÖRSTEL, CH., HEIER, H., 2001. DMC Digital Modular Camera: Systemkonzept und Ablauf der Datenverarbeitung. *PFG - Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation,* Heft 3, pp. 189-198.

- KAESER, Ch., CZÀKA, Th., KUNZ, Th., 1999. Digital Aerotriangulation for Map Revision with MATCH-AT. *OEEPE Official Publication No. 37*, pp. 269-274.
- KERSTEN, Th., 1999a. Results from digital aerial triangulation using different software packages. *OEEPE Official Publication No. 37*, pp. 241-256.
- KERSTEN, Th., 1999b. Digitale Aerotriangulation über die ganze Schweiz. VPK Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Heft 9, pp. 473-478.
- KERSTEN, Th., 1996a. Das Projekt swissphoto Flächendeckende und aktuelle Geodaten als Grundlage für viele GIS-Anwendungen in der Schweiz. GIS - Geo-Informations-Systeme, Nr. 6, pp. 12-19.
- KERSTEN, Th., O'SULLIVAN, W., 1996b. Experiences with the Helava Automated Triangulation System. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 31 (B3), pp. 591-596.
- KERSTEN, Th., HAERING, S., 1997a. Automatic Interior Orientation of Digital Aerial Images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 63, No. 9, pp. 1079-1084.
- KERSTEN, Th., HAERING, S., 1997b. Efficient Automated Digital Aerial Triangulation Through Customisation of a Commercial Photogrammetric System. *Int. Arch. of Photogr. and Remote Sensing*, Vol. 32, Part 3-2W3, pp. 72-79.
- KERSTEN, Th., CUCHE, L., 1999. Auf dem Weg zur virtuellen Stadt (Cyber City) Photogrammetrische Datenerfassung für 3-D Stadtmodelle. Workshop "Erfassen, Verwalten und Visualisieren von 3-D Stadtmodellen", ETH Zürich, 9. Februar.
- KERSTEN, Th., BALTSAVIAS, E., SCHWARZ, M., LEISS, I., 2000. IKONOS-2 CARTERRA[™] GEO Erste geometrische Genauigkeitsuntersuchungen in der Schweiz mit hochaufgelösten Satellitendaten. VPK - Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Nr. 8, pp. 490-497.
- LUE, Y., 1995. Fully Operational Automatic Interior Orientation. *Proceedings of GeoInformatics* '95, Hong Kong, Vol. 1, pp. 26-35.
- MATTER, P., ROTH, D., HOLLMANN, D, 2000. Sender- und Funknetzplanung mit 3D-Computersimulation. Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV/VSE), Nr. 3, pp. 7-14.
- MEINEL, G., NEUBERT, M., REDER, J, 2001. Pixelorientierte versus segmentorientierter Klassifikation von IKONOS-Satellitenbilddaten ein Methodenvergleich. *PFG Photogrammetrie Fernerkundung, Geoinformation,* Heft 3, pp. 157-170.
- NEUKUM, G., HRSC-A TEAM, 2000. The airborne HRSC-AX cameras: evaluation of the technical concept and presentation of application results after one year of operations. *Photogrammetric Week '01, Eds. Fritsch/Spiller*, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp. 117-130.
- PETRIE, G., 2000. The new millennium has indeed been reached Orthophotos in the UK!! *GeoInformatics*, Vol. 3, April/Mai.
- RENOUARD, L., LEHMANN, F., 1999. High Resolution Digital Surface Models and Orthoimages for Telecom Network Planning. *Photogrammetric Week '99, Eds. Fritsch/Spiller,* Wichmann Verlag, Karlsruhe, pp. 241-246.
- RÜTGERS, J., 1989. Neue Chancen durch Satellitenüberwachung. wt Wehrtechnik, Nr. 1, pp. 68-69.
- SCHICKLER, W., 1995. Ein operationelles Verfahren zur automatischen inneren Orientierung von Luftbildern. ZPF Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, Nr. 3, pp. 115-122.
- SCHOLTEN, F., SUJEW, S., WEWEL, F., 2001. Einsatz digitaler Kameras im Auflösungsbereich von 5 cm bis 1 m -Die neue HRSC-AX Kamerageneration in der geometrischen Analyse. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation: Geodaten schaffen Verbindungen, E. Seyfert (Ed.), Publikation der DGPF*, Vol. 10.
- SIMMONS, G., 2000. UK's largest Aerial Photographic Survey Project. GeoInformatics, Vol. 3, Januar/Februar.

TOUTIN, T., CHENG, P., 2000. Demystification of IKONOS. EOM, Vol. 10, 7/2000, pp. 17-20.

- TOUTIN, T., CHENG, P., 2001. DEM from Stereo IKONOS: a Reality if EOM, Vol.10, 7/2001, 4 pages.
- URSET, A., MAALEN-JOHANSEN, I., 1999. Automatic Triangulation in Nordic Terrain Experiences and Challenges with MATCH-AT. *OEEPE Official Publication No. 37*, pp. 259-266.
- WESTIN, T., FORSGREN, J., 2001. Orthorectification of EROS A1 images. *IEEE/ISPRS joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, Rome, November 8-9th.
- WUNDERLICH, TH., 2001. Ortsbezogene Information jederzeit und überall. ZfV Zeitschrift für Vermessungswesen, Heft 3, pp. 117-122.