

1. Einleitung

Geoinformationen sind Informationen über Objekte mit Raumbezug (IMAGI 2003). Sie werden unterteilt in die in Geobasisdaten (Kataster und Liegenschaftswesen, Topographie) enthaltenen Informationen, die von Vermessungsverwaltungen erhoben und verwaltet werden, sowie diejenigen Informationen, die aus Fachdaten wie z. B. Verkehr, Umwelt, Ver- und Entsorgung, Immobilien, Banken- und Versicherungssektor, Land- und Forstwirtschaft usw. gewonnen werden können. Die Bedeutung von Geoinformationen innerhalb der Gesellschaft ist in der letzten Zeit deutlich gestiegen. Schätzungen besagen, dass heute ca. 80% unserer Entscheidungen mit Geoinformationen zu tun haben.

Geoinformationen werden heute in Geo-Informationssystemen (GIS) und damit in digitaler Form vorgehalten und genutzt. Für den Wert eines GIS ist die Verfügbarkeit und insbesondere die Aktualität der zugrunde liegenden Informationen ein entscheidendes Kriterium. Besonders deutlich wird dieser Umstand, wenn die Daten z. B. für Fahrzeugnavigations- oder Verkehrsleitsysteme genutzt werden sollen: veraltete Straßen- oder Verkehrsdaten stellen die Vorteile dieser modernen Technologien ganz offensichtlich in Frage.

Geoinformationen können flächenhaft vorliegen, z. B. als Orthophotos oder digitale Geländemodelle (DGM), die oft im Rasterformat gespeichert werden. Eine andere Möglichkeit stellt die diskrete, objektbezogene Beschreibung z. B. als einzelne Gebäude, Straßen oder Flüsse dar. Letztere liegen in der Regel im Vektorformat vor und bilden – zusammen mit den die Objekte beschreibenden Attributen und bisweilen auch einem DGM – die Grundlage für räumliche Analysen.

Als *Erfassung* von Geoinformation wird in diesem Beitrag die Gewinnung vorab definierter Geoinformationen im Raster- oder Vektorformat aus unterschiedlichen Quellen bezeichnet. Der Schwerpunkt liegt auf der automatischen Erfassung aus Luft- und Satellitenbildern inkl. der dafür notwendigen Vorverarbeitungsschritte. Die *Aktualisierung* entspricht der Anpassung eines vorhandenen, digitalen Datenbestandes an die Veränderungen der Landschaft. Die Aktualisierung kann als Variante der Erfassung verstanden werden, wobei neben den primären Quellen für die Erfassung selber der (ev. veraltete) digitale Datenbestand tritt, und auch die Frage zu klären ist, ob zwischen dem alten und den neu erfassten Informationen tatsächlich ein für den betrachteten Zusammenhang relevanter Unterschied besteht.

Aus Sicht eines GIS werden zur Erfassung und Aktualisierung von Geoinformation oft auch dessen Verwaltung in einer räumlichen Datenbank gezählt, inkl. Fragen zur logischen Konsistenz der Daten, zur Verwaltung verschiedener Versionen, sowie zu Standards und Interoperabilität. Um den Rahmen des vorliegenden Übersichtsbeitrages nicht zu sprengen, werden diese Aspekte hier ausgeklammert. Stattdessen erfolgt eine Einschränkung auf topographische Geoinformationen. Zuerst werden die Datenquellen beschrieben, aus denen diese erfasst werden können. Danach wird das Konzept von Photogrammetrie & Fernerkundung als der wichtigsten Erfassungsmethode topographischer Geoinformationen kurz erläutert. Die sich anschließenden Kapitel 2 und 3 beschäftigen sich mit der Aufnahme und Auswertung von Luft- und Satellitenbildern. Dabei stehen die *digitale Bildaufnahme* sowie Möglichkeiten der *automatischen Auswertung* im Vordergrund. Im letzten Kapitel wird ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen gegeben. Leser, die an konkreten Beispielen zu der diskutierten Thematik interessiert sind, seien auf die umfangreiche Literatur verwiesen.

¹ Teile dieses Artikels stammen aus einer Publikation desselben Autors, die unter dem Titel „Photogrammetrie und Fernerkundung – vom Elektronenmikroskop bis zur Planetenbeobachtung“ in der Zeitschrift *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* im Heft 3, 2003, pp. 165-180 erschienen ist.

1.1 Vorhandene Quellen zur Erfassung und Aktualisierung topographischer Geoinformation

Zur Erfassung und Aktualisierung topographischer Geoinformation stehen verschiedene Quellen zur Verfügung:

- analoge Kartenwerke,
- digitale Daten einer größeren Auflösungsstufe,
- Ergebnisse einer terrestrischen Vermessung,
- Luft- und Satellitenbilder,
- Ergebnisse des topographischen Meldedienstes.

Die Digitalisierung analoger Kartenwerke wurde und wird häufig aus Kostengründen zur Ersterfassung digitaler Geoinformation eingesetzt. Die zugehörigen Datenmodelle enthalten jedoch oft Informationen, die in analogen Karten nicht verfügbar ist, für Straßen beispielsweise die Anzahl Fahrstreifen und die Oberflächenbeschaffenheit. Daneben ist die Digitalisierung prinzipiell weniger genau als die direkte Datenerfassung, und es können gerade bei der Aktualisierung Zeitprobleme auftreten, da erst nach Fertigstellung einer fortgeführten analogen Karte mit der Aktualisierung der digitalen Daten begonnen werden kann.

Digitale Daten unterschiedlicher Auflösungsstufen beruhen in der Vergangenheit oft auf unterschiedlichen Datenmodellen. Heutzutage werden unter dem Kürzel MRDB (multi resolution data base) Konzepte untersucht und umgesetzt, die Geoinformation auf der Grundlage eines abgestimmten Datenmodells in verschiedenen Auflösungen gemeinsam vorhalten. Ein Beispiel ist das AAA-Datenmodell der deutschen Landesvermessung. Grundlage von MRDB ist die Überlegung, Daten nur einmal (in einer hohen Auflösung) zu erfassen bzw. zu aktualisieren, und sie dann auch in allen anderen Auflösungen zu verwenden. Noch sind solche Lösungen allerdings nicht in praxisreifer Form verfügbar.

Die terrestrische Vermessung stellt gerade für großmaßstäbige GIS eine wichtige Möglichkeit zur Erfassung und Aktualisierung dar, ist aber für größere Gebiete mit hohen Kosten verbunden. Es sei erwähnt, dass in diese Kategorie neben den klassischen Methoden unter dem Stichwort „mobile mapping“ auch die satellitengestützte, dynamische Datengewinnung aus Messfahrzeugen unter Verwendung von GPS-Empfängern und inertialen Messeinheiten (IMU, inertial measurement unit) oder anderen Winkelmesssystemen zu zählen ist.

Luft- und Satellitenbilder haben einen sehr hohen Informationsgehalt und dokumentieren den Ist-Zustand zum Aufnahmezeitpunkt. Luftbilder werden in den meisten Ländern für bestimmte Maßstäbe flächendeckend und regelmäßig aufgenommen, auch Satellitenbilder sind zunehmend für größere Gebiete und regelmäßig verfügbar. Luft- und Satellitenbilder eignen sich im besonderen Maße für die hier diskutierten Aufgaben (s. u.).

Bereits zur Fortführung der analogen topographischen Daten hatten viele Vermessungsbehörden einen sogenannten topographischen Meldedienst eingerichtet: verschiedenste (meist staatliche) Institutionen, die Informationen über geplante oder durchgeführte Veränderungen in der Landschaft vorhalten, geben diese Informationen an eine zentrale Stelle – oft die Vermessungsbehörden – regelmäßig oder auf Anfrage weiter. Da die gewünschten Ergebnisse heutzutage im Rahmen der sich entwickelnden Geodateninfrastruktur digital und schnell verfügbar sind, erwächst dem topographischen Meldedienst für die Aktualisierung von Geo-Daten eine deutlich höhere Bedeutung als früher. Allerdings sind noch einige organisatorische Probleme, wie z. B. Kompatibilität von Datenmodellen und -formaten sowie rechtliche Aspekte, zu lösen.

Die Vielfalt der für die Erfassung und Aktualisierung topographischer Geoinformation möglichen Informationsquellen zeigt bereits, dass es sich dabei um eine komplexe Aufgabe in wissenschaftlicher, technischer und organisatorischer Hinsicht handelt. In diesem Beitrag wird auf die Möglichkeiten, die Photogrammetrie & Fernerkundung für diese Aufgabe bereitstellen, näher eingegangen, denn Photogrammetrie & Fernerkundung stellt nach wie vor die weltweit anerkannte Standardmethode für Erfassung und Aktualisierung topographischer Geoinformation dar.

1.2 Grundsätzliches zu Photogrammetrie & Fernerkundung

Photogrammetrie & Fernerkundung beschäftigen sich mit der Beschreibung von Objekten und Oberflächen auf der Grundlage von Bildern. Im Zentrum des Interesses stehen heute digitale Bilder verschiedenster Sensorsysteme, die Automatisierung der Auswertung mit dem Ziel, möglichst nah an die Interpretationsleistung des Menschen zu gelangen, sowie die Nutzung der abgeleiteten Produkte in unterschiedlichen traditionellen und innovativen Anwendungen. Wesentliche Charakteristika von Photogrammetrie & Fernerkundung sind die berührungslose Aufnahme, die kurze Aufnahmedauer und damit die Möglichkeit zur Erfassung dynamischer Prozesse, die umfassende flächenhafte und bildliche Dokumentation der aufgenommenen Szene, die Auswertung in drei Dimensionen sowie die Möglichkeit, fast beliebig große Objekte zu bearbeiten.

Zwischen Photogrammetrie & Fernerkundung bestehen schon lange enge Beziehungen. Das gemeinsame Prinzip besteht in der flächenhaften Messung verschiedener Eigenschaften elektromagnetischer Wellen eines bestimmten Wellenlängenintervalls, die von Objekten ausgestrahlt oder reflektiert wurde. Dabei kommen als Messgrößen Energie, Phase, Polarisierung und Laufzeit der elektromagnetischen Wellen in Betracht. Die Ableitung von Eigenschaften der abgebildeten Objekte aus diesen Messungen stellt das eigentliche Ziel von Photogrammetrie & Fernerkundung dar. Die Objekte werden sowohl geometrisch in Position, Lage, Größe und Form, als auch bzgl. ihrer Bedeutung (Objektklasse, Attribute), ihres radiometrischen und spektralen Aussehens (Helligkeit, Textur, spektrale Signatur) und ggf. ihres zeitlichen Verhaltens beschrieben. Nach Konecny, Lehmann (1984, p. 11) ist die Photogrammetrie ein Teilbereich der Fernerkundung, aus historischen Gründen ist jedoch der Begriff „Photogrammetrie“ gleichberechtigt mit „Fernerkundung“ erhalten geblieben. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen und gleichzeitig den photogrammetrischen Aspekt der Fernerkundung zu betonen, werden die Begriffe „Photogrammetrie“ und „Fernerkundung“ im vorliegenden Text mit dem Symbol „&“ verbunden.

2. Bildaufnahme in Photogrammetrie & Fernerkundung

Traditionell hat sich die photogrammetrische Datenerfassung aus dem Flugzeug auf photographische, zentralperspektivische Aufnahmen einzelner Bilder mit Film als Träger beschränkt, in der Satellitenfernerkundung herrschten digitale Bilder mit relativ geringer geometrischer Auflösung vor. Heute hat sich die Situation grundlegend gewandelt. Die modernen Trends werden im Folgenden aufgezeigt.

2.1 Digitale Aufnahmen

Digitale Aufnahmen haben eine Reihe von Vorteilen im Vergleich zu Photographien. Die wichtigsten sind (a) die quantitative Erfassung und damit die Möglichkeit zur quantitativen Auswertung der Lichtenergie, (b) die Erweiterung des erfassbaren elektromagnetischen Spektrums, (c) die höhere spektrale Auflösung, (d) die Möglichkeit zur simultanen Erfassung verschiedener Eigenschaften der elektromagnetischen Strahlung, also Lichtenergie, Phase, Laufzeit und Polarisierung, (e) die Möglichkeit, Kopien ohne jeglichen Verlust an Bildqualität herzustellen, (f) die Möglichkeit zur Datenübertragung durch Computernetze und schließlich (g) das Potenzial zur Echtzeitverarbeitung durch Automation der Auswertung. Diesen Vorteilen stehen als Nachteile Probleme bei der Langzeitarchivierung großer Datenmengen sowie der Verlust der unmittelbaren Wahrnehmbarkeit durch den Menschen gegenüber. Offensichtlich überwiegen die Vorteile bei weitem, denn Forschung und Praxis in Photogrammetrie & Fernerkundung gehen heute in überwiegender Mehrzahl von digitalen Bilddaten aus.

Derzeit sind im Luftbildbereich verschiedene konkurrierende Systeme kommerziell verfügbar, z. B. der auf der Dreizeilengeometrie beruhende Airborne Digital Scanner ADS 40 von Leica Geosystems und die auf der Kombination mehrerer Flächen-Chips mit jeweils eigener Optik beruhende Digital Modular Camera DMC von Z/I Imaging (s. Abb 1). Daneben existieren weitere digitale Luftbildkameras, zu erwähnen ist insbesondere die bahnbrechende Entwicklung der High Resolution Stereo Camera (HRSC) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR, Wewel et al. 1998) sowie die kürzlich vorgestellte UltraCam-D der Firma Vexcel.

2.2 Hochaufgelöste Satellitenaufnahmen

Nach einigen Fehlstarts gibt es seit 1999 Weltraumaufnahmen mit Bodenauflösungen von 0,6 - 1 m panchromatisch und 2,4 - 4 m in den Kanälen Rot, Grün, Blau und Infrarot von kommerziellen Anbietern (Petrie 2002). Es hat sich gezeigt, dass sich die Bilddaten je nach Anforderungen des Objektartenkatalogs für die Erfassung und Aktualisierung topographischer Informationen im Bereich 1:10.000 bis 1:25.000 und kleiner eignen. Aus praktischer Sicht werfen jedoch die nicht immer in kurzen Zeiträumen garantierbare Flächenabdeckung sowie relativ hohe Kosten noch einige Fragen auf. Andere Anwendungen dieser Bilddaten liegen z. B. in der Land- und Forstwirtschaft, der Telekommunikation oder der Versicherungswirtschaft.

2.3 Multispektral- und Hyperspektralaufnahmen

Multispektralaufnahmen sind in der Satellitenfernerkundung schon seit Jahrzehnten Standard. Hintergrund ist die Tatsache, dass sich topographische Objekte in den entsprechenden Auflösungen eher spektral und weniger durch geometrische Größen beschreiben lassen. Moderne Entwicklungen sind durch eine deutliche Erhöhung der Anzahl der Spektralkanäle gekennzeichnet. Beispiele sind DAIS (Digital Airborne Imaging Spectrometer) des DLR mit 79 und HyMap von Integrated Spectronics mit mehreren Hundert Spektralkanälen zwischen dem sichtbaren und dem Thermalbereich. Anwendungen bestehen vor allem in der geologischen Lagerstättenforschung und der Umweltbeobachtung.

2.4 Laserscanner

Laserscanner liefern über Laufzeitmessung Strecken zwischen dem Sensor und der reflektierenden Oberfläche. Durch Ablenkung des Lasers quer zur Flugrichtung kann ein digitales Oberflächenmodell (DOM) bestimmt werden, wenn Position und Abstrahlwinkel des Laserstrahls bekannt sind bzw. gemessen werden können (Abb. 2). Laserscanning hat sich zu einer ernstzunehmenden Konkurrenz zur indirekten Oberflächenbestimmung mit Hilfe stereoskopischer Höhenmessungen entwickelt. Allerdings wird die Strahlung z. B. von Wasser und nassem Untergrund fast vollständig absorbiert. Heute ist die simultane Erfassung des ersten und letzten reflektierten Pulses (first und last pulse) zusammen mit der Intensität des zurückgestrahlten Pulses möglich. Letztere stellt ein monochromatisches Bild dar, das allerdings eine deutlich schlechtere geometrische Auflösung als ein Luftbild besitzt. Deshalb sind die Hersteller von Laserscannern dazu übergegangen, Sensorsysteme bestehend aus einem Laserscanner und einer digitalen Multispektralkamera anzubieten.

2.5 Radar

Bildgebende Radarsensoren messen als aktive Sensoren die Laufzeit und die Intensität von ausgestrahlter und am Boden reflektierter elektromagnetischer Strahlung im Mikrowellenbereich. Sie sind von Beleuchtung und Bewölkung unabhängig und deswegen optischen Sensoren in manchen Anwendungen von vornherein überlegen. Heute sind für Photogrammetrie & Fernerkundung ausschließlich SAR-Sensoren (Synthetic Aperture Radar) im Einsatz. Aus dem Flugzeug aufgenommene SAR Bilder werden bereits in manchen Situationen für topographische Anwendungen eingesetzt. Sowohl die Geometrie als auch die speziellen Reflektionseigenschaften der Mikrowellen, insbesondere im Stadtbereich und bei metallischen Gegenständen, machen die Auswertung von Radarbilder allerdings zu einer recht großen Herausforderung. Darüber hinaus dringt die Strahlung je nach Wellenlänge und Bodenbeschaffenheit unterschiedlich stark in die Oberfläche ein.

Interferometrisches SAR (InSAR, manchmal auch als IfSAR bezeichnet; Bamler, Hartl 1998) beruht auf der Messung von Phasenunterschieden von zwei benachbarten Orten mit bekannter Position und liefert als Ergebnis ein DOM. InSAR hat bereits große Anwendung in verschiedenen Gebieten der Erde gefunden, ein spektakuläres Beispiel war die Space Shuttle Topography Mission SRTM im Februar 2000 (Bamler 1999, Koch et al. 2002 ; Abb. 3). Liegen Szenen von verschiedenen Zeiträumen vor, lassen sich unter gewissen Voraussetzungen mit Hilfe des differentiellen InSAR auch kleine Höhenunterschiede bestimmen.

2.6 Fazit

Insgesamt lässt sich feststellen, dass sich das Spektrum der verfügbaren Sensoren und Bilddaten in bezug auf Aufnahmeprinzip und -technik sowie die geometrische, spektrale und zeitliche Auflösung deutlich vergrößert hat. Hinzu kommt, dass unter dem Stichwort „Datenfusion“ verschiedene Sensoren auch kombiniert zum

Einsatz kommen. Der Weg führt hin zu komplexen Sensorsystemen, verbunden mit deutlich höheren Anforderungen an die Kalibrierung sowohl der einzelnen Sensoren und als auch des Sensorsystems.

3. Bildauswertung in Photogrammetrie & Fernerkundung

Die Bildauswertung wird hier in zwei Teilaspekte unterteilt, und zwar die geometrisch/radiometrische Bildauswertung sowie die Bildinterpretation. Zur geometrisch/radiometrischen Bildauswertung gehören die Bildorientierung, die Ableitung DOMs und DGMs² und die Orthoprojektion und Visualisierung. Die Bildinterpretation umfasst die – in der Regel dreidimensionale – Extraktion und Beschreibung von Objekten. Eine strenge Trennung zwischen beiden Gebieten ist allerdings sowohl bei der manuellen als auch bei der automatischen Bildauswertung nicht möglich, da sie sich gegenseitig beeinflussen und benötigen.

Um den Aspekt der Automation in der Bildinterpretation, der heute in Forschung und Entwicklung eine wesentliche Rolle spielt, stärker zu betonen, wird im Folgenden statt von „Interpretation“ von „Bildanalyse“ gesprochen. Während unter „Interpretation“ sowohl eine manuelle als auch eine automatische Auswertung verstanden werden kann, setzt sich für „Bildanalyse“ immer mehr eine Definition analog der von Rosenfeld (1982) durch, nach der Bildanalyse die „automatische Ableitung einer expliziten und bedeutungsvollen Beschreibung von Objekten der realen Welt mit Hilfe von Bildern“ ist.

3.1 Geometrisch/radiometrische Bildauswertung

In der Vergangenheit waren die einzelnen Schritte der geometrisch/radiometrischen Bildauswertung relativ klar voneinander abgegrenzt. Heute verschwimmen die Grenzen etwas, nicht zuletzt, weil der früher entscheidende Messaufwand aufgrund der Automation viel von seiner Relevanz verloren hat, und deshalb z. B. in der Orientierungsphase bereits mit einer Punktdichte gearbeitet werden kann, die auch für manche DOMs ausreicht. Konzepte zur integrierten Bestimmung von Bildorientierung, DOM und Orthophotos sind schon seit längerem bekannt (Ebner et al. 1987; Wrobel 1987; Helava 1988; Heipke 1990). Der Übersichtlichkeit halber sollen die einzelnen Schritte im Folgenden trotzdem getrennt betrachtet werden.

3.1.1. Bildorientierung

Die Bildorientierung wird zweckmäßigerweise in die Teile Sensormodell, also die mathematische Transformation zwischen Bild- und Objektraum, und Bestimmung homologer Bildprimitive (in den meisten Fällen Bildpunkte) als Eingangswerte für die Transformation unterteilt. Als Sensormodell kommt in der Regel die flächenhafte Zentralprojektion zur Anwendung, ggf. in abgewandelten Varianten wie z. B. zur Beschreibung von Zeilensensoren. Die Bestimmung homologer Punkte geschieht heute fast ausschließlich über digitale Bildzuordnung. Die Bildorientierung ist für den Luftbild- und Satellitenbereich inzwischen weitgehend ausgereift und unter dem Stichwort „Automatische Aerotriangulation“ auch in der Praxis verfügbar (Heipke, Eder 1998).

Als Alternative zur Aerotriangulation setzt sich immer mehr die direkte und die integrierte Sensororientierung durch (Schwarz et al. 1993; Colomina 1999; Cramer 2001). In beiden Fällen werden Daten von GPS-Empfängern und IMUs zur Bestimmung der Elemente der äußeren Orientierung verwendet. Bei der direkten Sensororientierung ersetzen diese Daten Verknüpfungspunkte und damit die gesamte Aerotriangulation, bei der integrierten Sensororientierung werden alle Informationen in einer gemeinsamen Ausgleichung zur Bestimmung der Bildorientierung verwendet. Umfangreiche Tests (Heipke et al. 2002; Cramer 2003) haben die Praxisreife dieser Lösung insbesondere für die Herstellung von Orthophotos deutlich gemacht. Wird der Kalibrierung des Gesamtsystems die nötige Aufmerksamkeit geschenkt, lassen sich heute mit Hilfe der direkten Sensororientierung Punktgenauigkeiten am Boden im Bereich weniger dm erreichen, bei der integrierten Sensororientierung erreicht man dieselben Genauigkeiten wie in der Aerotriangulation, und zwar bei sehr viel höherer Flexibilität bzgl. der Flugplanung und unter Einsparung von Passpunkten.

² Ein DOM enthält im Gegensatz zum DGM die topographischen Objekte auf dem Gelände (Gebäude, Vegetation).

3.1.2. Ableitung digitaler Oberflächenmodelle und Geländemodelle

Zur Ableitung digitaler Oberflächenmodelle aus flugzeuggetragenen Daten existieren zur Zeit drei konkurrierende Verfahren: die indirekte DOM-Bestimmung auf der Grundlage stereoskopischer Aufnahmen, die wie die Orientierung auf der digitalen Bildzuordnung beruht, sowie die beiden direkten Aufnahmeverfahren Laserscanning und InSAR. Während sich mit Laserscanning und InSAR im Allgemeinen höhere Automationsraten erreichen lassen (für einen Vergleich beider Verfahren s. Mercer 2001), haben die stereoskopischen Bilder eine höhere Auflösung, deshalb ist auch für das resultierende DOM ein höherer Detailgrad erreichbar. Aus demselben Grund lässt sich geomorphologische Information (Geländekanten usw.) derzeit zuverlässig nur aus Bildern ableiten. Diese Informationen sind beispielsweise für die hochgenaue Geländemodellierung in der Hydrographie wesentlich.

Allen drei Verfahren gemeinsam ist das Problem, aus dem abgeleiteten DOM bei Bedarf ein DGM zu berechnen. Dabei handelt es sich eigentlich um ein Problem der Bildanalyse, denn die störenden Objekte auf dem Gelände (Gebäude, Bäume etc.) müssen erkannt und dann eliminiert werden. Die Aufgabe wird derzeit jedoch mit vergleichsweise einfachen Bildverarbeitungsoperatoren und statistischen Methoden relativ erfolgreich gelöst (Kraus 1997; Vosselman 2000; Abb. 4).

Es ist zu erwarten, dass sich die Bodenauflösung von Laserscanning und InSAR und damit auch die Qualität der DOMs verbessern wird. Dies wird wie bei der Bildorientierung zu einer größeren Bedeutung der beiden direkten im Vergleich zu dem indirekten Verfahren führen. Falls jedoch auch Bilder, z. B. für Visualisierungszwecke, als Ergebnis benötigt werden, ist der Aufwand für den zusätzlichen Sensor gegen den Vorteil der höheren Automation abzuwägen. Für hochqualitative DOM und DGM wird wahrscheinlich die stereoskopische Vorgehensweise weiterhin Bestand haben, und zwar als semi-automatische Methode, in der einfaches Gelände automatisch bearbeitet wird, komplexere Gebiete wie Siedlungen dagegen manuell.

3.1.3. Orthoprojektion und Visualisierung

Die Orthoprojektion ist ein seit langem bekanntes Verfahren und soll nur insofern erwähnt werden, als es inzwischen erste kommerziell verfügbare Lösungen für sogenannte „true orthos“ gibt (Mayr 2002). True orthos sind Orthophotos, für die bei der Differentialverzerrung ein strenges DOM und nicht wie traditionell ein DGM verwendet wurde, und bei denen die dabei entstehenden sichttoten Räume durch Information aus Nachbarbildern gefüllt wird. Als Ergebnis finden sich zum Beispiel Dachflächen und Brücken am geometrisch korrekten Ort, Hauswände sind nicht sichtbar, und auch die aus traditionellen Orthophotos großen Maßstabs bekannten Doppelabbildungen treten nicht auf.

Prinzipiell unterscheidet sich die Orthoprojektion nicht von der Texturierung dreidimensionaler geometrisch beschriebener Objekte, die in der Computergraphik auch mit den Begriff „rendering“ und „texture mapping“ bezeichnet wird. Insofern sind die Erstellung photorealistischer Visualisierungen und bewegter Computeranimationen, beides immer wichtiger werdenden Gebiete der Virtuellen Realität, Bereiche mit engen Beziehungen zur Photogrammetrie. Die vielfach zitierte und praktizierte Erstellung von Geländeüberflügen und virtuellen Städtespaziergängen, aber auch Flugsimulatoren und Computerspiele sind Beispiele dafür.

3.2. Bildanalyse

3.2.1. Hintergrund und a priori Wissen

Wie schon erwähnt kann die Bildanalyse als automatische Ableitung einer expliziten Beschreibung der in den Bildern dargestellten Objektraumscene definiert werden. Dazu müssen einzelne Elemente der Szene, im Folgenden Objekte genannt, erkannt werden. Diese Erkennung setzt Wissen über die Objekte in Form von Modellen voraus, das dem Rechner vorab zugänglich gemacht werden muss. Wenn die Modelle unabhängig von den Auswerteprozeduren formuliert werden, wird auch von „modellbasierter“ oder „wissensbasierter“ Bildanalyse gesprochen. Es ist inzwischen klar, dass sowohl geometrische als auch radiometrische Informationen über die einzelnen Objekte benötigt werden. Je größer der Maßstab der zu analysierenden Bilder und je höher damit der gewünschte Detailgrad ist, desto wichtiger werden dabei geometrische Informationen, da man immer weiter in den Bereich der menschlichen Aktivitäten eindringt, der bzgl. der Objekte (Strassen, Häuser usw.) durch geradlinige Begrenzungen, Symmetrien, rechte Winkel und andere geometrische Aspekte

gekennzeichnet ist. Demgegenüber dominieren in geringeren Auflösungen radiometrische und spektrale Eigenschaften, was den guten Erfolg der Multispektralklassifikation für Satellitenbilder größerer Bodenauflösung ebenso erklärt wie die mäßigen Ergebnisse derselben Technik für hochauflösende Satelliten- und Luftbilder selbst bei wissensbasierter Steuerung.

Die Erstellung der Objektmodelle ist ein Kernproblem der modellbasierten Bildanalyse. Bis heute erfolgt sie per Hand, und es ist dabei vorab nicht klar, welche Elemente einer Objekt- und Szenebeschreibung für die Aufgabe notwendig sind. Auch können Ergebnisse, die sich bei der Übertragung der Modelle von einem Bilddatensatz auf einen anderen ergeben müssten, im Allgemeinen nicht vorhergesagt werden. Diese Erkenntnis hat u. a. dazu geführt, auch Ansätze zum automatischen Lernen der Modelle, z. B. auf der Grundlage Neuronaler Netze, zu verwenden, um die Modellerstellung zu objektivieren und zu erleichtern. Derzeit sind diese Ansätze noch in den Anfängen begriffen, es ist jedoch offensichtlich, dass eine effiziente Lösung zur automatischen Erstellung von Wissensbasen eine wesentliche Voraussetzung für den Erfolg der Bildanalyse insgesamt ist.

Eine andere Möglichkeit zur Einführung von a priori Wissen beruht auf der Überlegung, dass Bilder in der Regel für einen bestimmten Zweck analysiert werden, der zumindest in den Grundzügen vorab festgelegt ist. Beispielsweise sind die in GIS vorzuhaltenden Informationen in Objektartenkatalogen beschrieben. Daraus können wichtige Hinweise zur Formulierung der Objektmodelle der Bildanalyse entnommen werden (s. auch Heipke et al. 2000). Weiterhin folgt aus dieser Überlegung, dass die Objektmodelle der Bildanalyse ebenso wie die Objektartenkataloge in GIS hierarchisch aufgebaut werden sollten. In der oberen Ebene werden nur grobe Kontextgebiete unterschieden, etwa Siedlung, Wald, offene Landschaft und Wasserflächen. Eine Verfeinerung findet dann innerhalb des jeweiligen Kontextgebietes statt.

Wird die Bildanalyse zur Überprüfung oder Aktualisierung von GIS-Datenbeständen eingesetzt, so können die vorhandenen Daten auch direkt als Wissensbasis verwendet werden. Die Berücksichtigung der Qualität der verwendeten Daten stellt bei dieser Vorgehensweise noch einen offenen, aber wesentlichen Punkt dar. Trotz vielfältiger Anstrengungen existiert heute noch kein allgemeines Verfahren zur Qualitätsbeschreibung von Geoinformation. Die bisweilen angeführte Definition, nach der Qualität „fitness for use“ sei, hilft hier wenig weiter, da in diesem Zusammenhang gerade eine von einer spezifischen Anwendung unabhängige und damit allgemeingültige Beschreibung der Qualität von Geoinformation benötigt wird.

3.2.2. Stand und Perspektiven

In der Bildanalyse sind in den letzten Jahren wichtige Fortschritte erzielt worden (z. B. Mayer 1998), wenn auch ein Durchbruch in Richtung praktische Anwendungen noch auf sich warten lässt. Einzelne topographische Objekte wie Straßen im offenen Gelände (Wiedemann 2002; Baumgartner 2003; Abb. 5) und teilweise auch in bebauten Gebieten (Hinz 2003), Gebäude (Fischer et al. 1998; Baillard et al. 1999) und Vegetation (Borgefors et al. 1999; Pakzad 2001; Straub 2003) können inzwischen unter gewissen Voraussetzungen erfolgreich automatisch aus Bilddaten extrahiert werden. Auch Daten anderer Sensoren wurden in dieser Hinsicht intensiv untersucht, dies gilt insbesondere für Laserscanner (Maas, Vosselman 1999) und InSAR (Sörgel 2003). Durch Kombination von Bilddaten mit DOMs und/oder Grundrissinformation aus dem Kataster können die Ergebnisse weiter verbessert werden (Haala 1996; Brenner 2000; Straub, Heipke 2001; Abb. 6).

Die derzeitigen Überlegungen und Entwicklungen in der Bildanalyse lassen sich wie folgt zusammenfassen (s. auch Baltsavias 2004):

- simultane Verwendung mehrerer Bilder, verbunden mit einem frühzeitigen Übergang in den dreidimensionalen Objektraum,
- reichhaltige, modulare Objektmodellierung, die geometrische, radiometrische und spektrale Informationen umfasst,
- gemeinsame Verwendung mehrerer Bildauflösungen und Detailstufen in der Objektmodellierung im Sinne einer Multiskalenanalyse,
- simultane Auswertung von verschiedenen Datenquellen, z. B. Einzelbilder und Bildsequenzen mit DOMs und Grundrissdaten, mit kombinierten Methoden,

- Verfeinerung und Erweiterung existierender GIS-Datenbestände, z. B. durch Integration von 2D Vektordaten mit DGMs,
- verstärkte Modellierung von Kontext und ganzer Szenen statt einzelner Objektklassen,
- Untersuchungen zur Formulierung und Verwendung von unsicherem Wissen, z. B. auf der Grundlage von Bayesnetzen und Ansätzen zur fuzzy logic, damit die erzielten Ergebnisse im Sinne einer Selbstdiagnose automatisch bewertet werden können,
- Untersuchungen zur automatischen Erstellung von Wissensbasen.

Eine wichtige Rolle bei der Weiterentwicklung der Bildanalyse spielt die Frage, wie die Strategie der gesamten Auswertung aussieht. Dazu gehören Entscheidungen, welche Daten in welchen Auflösungen und mit welchen Methoden in der Auswertung verwendet werden sollen (etwa die Trennung eines Bildes in Kontextgebiete durch Multispektralklassifikation mit grob aufgelösten Bilddaten, gefolgt von der Detektion einzelner Objekte auf der Grundlage eines DOMs und die verfeinerte Rekonstruktion mittels hochauflösender Bilddaten). Auch Antworten auf Fragen wie, zu welchem Zeitpunkt der Wechsel vom Bild- in den Objektraum vollzogen werden soll, oder welches Modellwissen für die Extraktion und welches für die Selbstdiagnose verwendet wird, müssen im Rahmen der Definition der Auswertestrategie beantwortet werden. Es hat sich gezeigt, dass derartige strategische Entscheidungen einen wesentlichen Einfluss auf den Erfolg der Bildanalyse haben.

Trotz dieser vielfältigen Aktivitäten ist derzeit nicht absehbar, dass Systeme zur rein automatischen Bildanalyse in der nächsten Zeit praxisreif werden. Dagegen zeigen sich erste Erfolge im Bereich der semi-automatischen Verfahren. Semi-automatische Ansätze beziehen den menschlichen Operateur im Gegensatz zu automatischen Ansätzen von vornherein in den Auswerteprozess mit ein. Der Operateur erledigt dabei vor allem Aufgaben, die Entscheidungen (z. B. Auswahl von Algorithmen und Parametereinstellungen) sowie die Beurteilung und ggf. Korrektur von Zwischen- und Endergebnissen erfordern. Beispiele sind die Arbeiten von Rottensteiner (2001; Gebäudeerfassung) und Baumgartner et al. (2002; Straßenextraktion), die kommerziellen Softwarepakete CyberCity Modeller (Grün, Wang 2001) und inJect (Gülch, Müller 2001) zur Erfassung von 3D Stadtmodellen sowie Ansätze zur Verifikation und Verfeinerung von Straßendaten, die derzeit in Deutschland (Gerke et al. 2004; Abb. 7) sowie in der Schweiz (Zhang 2004) umgesetzt werden. Es ist zu erwarten, dass sich diese semi-automatischen Ansätze, die heute an der Schwelle zur breiten Anwendung stehen, in den nächsten Jahren in der Praxis immer mehr durchsetzen werden. Für die Akzeptanz beim Nutzer wird voraussichtlich die Benutzeroberfläche von größerer Bedeutung sein als der Automationsgrad, vorausgesetzt, dass letzterer es ermöglicht, effizienter zu arbeiten als in einem rein manuellen Prozess.

4. Ausblick

Wie die Ausführungen gezeigt haben, stellen Photogrammetrie & Fernerkundung eine wichtige Methode zur Erfassung und Aktualisierung von Geoinformation dar. Diese Methodik befindet sich in einem grundlegenden Wandel: im technischen Bereich sind die Entwicklungen der letzten Jahre im Bereich der digitalen Bildaufnahme sicher am spektakulärsten, aus wissenschaftlicher Sicht gilt dies für die Fortschritte bei der Automation der Bildinterpretation, aus Sicht der Anwender wohl für die 3D Stadtmodelle. Viele der klassischen Aufgaben werden inzwischen automatisch oder mit alternativen Techniken gelöst. Gleichzeitig gibt es eine Welle der Integration bzw. Fusion verschiedener Sensoren, Daten und Methoden.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang u. a. der Trend hin zu immer mehr Bildern. Heutzutage gibt es mehr Videokameras und mehr Satellitenbilder als jemals zuvor, und alles deutet darauf hin, dass sich dieser Trend weiter verstärkt. Den Hintergrund für diese Entwicklungen bilden sowohl die durch Fernsehen, Video- und Computerspiele usw. geprägte „visuelle Welt“, in der wir leben, als auch die Möglichkeiten, die sich z. B. in der Land- und der Versicherungswirtschaft sowie in der Umweltforschung durch eine hochauflösende und hochfrequente Beobachtung der Erde ergeben. Konsequenterweise wird beispielsweise derzeit in Deutschland mit RapidEye ein Beobachtungssystem aufgebaut, das die wichtigsten landwirtschaftlichen Flächen in Europa und den USA mehrfach pro Woche aufnehmen kann, in den USA gibt es mit Resource21 und GEROS ähnliche Entwicklungen. In diesen Bereich gehört auch die zunehmende Bedeutung von Radar, die sich z. B. sowohl in

der zunehmenden Nutzung der flugzeuggetragenen Systeme als auch in den Satellitenprojekten ENVISAT und TerraSAR manifestiert.

Bei all diesen Fragestellungen spielen GIS und vielfach auch ortsbezogene Dienste (location based services) eine Mittlerrolle zwischen den Bildern und dem Nutzer, der mit den Bildern und den darin enthaltenen Informationen etwas Sinnvolles anfangen möchte. Da es wenig wahrscheinlich ist, dass alle für derartige Anwendungen notwendigen Daten vorab erfasst, ausgewertet und gespeichert werden können, ergeben sich langfristig für Photogrammetrie & Fernerkundung neuen Anforderungen und Möglichkeiten innerhalb von GIS: es geht z. B. um die Interpretation von Bildsequenzen in Echtzeit, aufgenommen von beliebigen Standorten aus, also um „mobile real-time vision on demand“.

5. Literatur

- Baillard C., Schmid C., Zisserman A., Fitzgibbon A. (1999): Automatic line matching and 3D reconstruction of buildings from multiple views, IAPRS (32) 3-2W5,69-80.
- Baltsavias E. (2004): Object extraction and revision by image analysis using existing geodata and knowledge: current status and steps towards operational systems, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (58) 3-4, 129-151.
- Bamler R., Hartl P. (1998): Synthetic aperture radar interferometry, Inverse Problems (14), R1-R54.
- Baumgartner A. (2003): Automatische Extraktion von Straßen aus digitalen Luftbildern, DGK Reihe C, Nr. 564, 80 p.
- Baumgartner A., Hinz S., Wiedemann C. (2002): Efficient methods and interfaces for road tracking, IAPRS (34) 3B, 28-31.
- Bamler, R., 1999: The SRTM Mission – A World-Wide 30 m Resolution DEM from SAR Interferometry in 11 Days. – In: Fritsch, D., Spiller, R. (Eds.), 1999: Photogrammetrische Woche '99. 145-154, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Borgefors, G., Brandtberg, T. and Walter, F. (1999): Forest parameter extraction from airborne sensors, IAPRS (32) 3-2W5, 151–158.
- Brenner C. (2000): Dreidimensionale Gebäuderekonstruktion aus digitalen Oberflächenmodellen und Grundrissen, DGK Reihe C, Nr. 530, 124 p.
- Colomina I. (1999): GPS, INS and aerial triangulation: What is the best way for the operational determination of photogrammetric image orientation?, IAPRS (32) 3-2W5, 121-130.
- Cramer M. (2001): Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerotriangulation, DGK Reihe C, Nr. 537, 122 p.
- Cramer M. (2003): Integrated GPS/inertial and digital aerial triangulation – recent test results, in: Fritsch D. (Ed.), Photogrammetric Week '03, Wichmann Verlag, Heidelberg, 161-172.
- Ebner H., Fritsch D., Gillessen W., Heipke C. (1987): Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der digitalen Photogrammetrie, BuL (55) 5, 194-203.
- Fischer, A., Kolbe, T., Lang, F., Cremers, A. B., Förstner, W., Plümer, L. and Steinhage, V. (1998): Extracting buildings from aerial images using hierarchical aggregation in 2D and 3D, Computer Vision and Image Understanding, 72(2), 185–203.
- Gerke M., Butenuth M., Heipke C., Willrich F., 2004: Graph-supported verification of road databases, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (58) 3-4, 152-165.
- Gülch E., Müller H. (2001): New application of semi-automatic building acquisition, in: Baltsavias E., Grün A., van Gool L. (Eds.), Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (III), Balkema Publishers, Lisse, 103-114.
- Grün A., Wang X. (2001): News from CyberCity-Modeler, in: Baltsavias E., Grün A., van Gool L. (Eds.), Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (III), Balkema Publishers, Lisse, 93-101.
- Haala N. (1996): Gebäuderekonstruktion durch Kombination von Bild- und Höhendaten, DGK Reihe C, Nr. 460, 67 p.
- Heipke C. (1990): Integration von digitaler Bildzuordnung, Punktbestimmung, Oberflächenrekonstruktion und Orthoprojektion innerhalb der digitalen Photogrammetrie, DGK Reihe C, Nr. 366, 89 p.

- Heipke C., Eder K. (1998): Performance of tie-point extraction in automatic aerial triangulation, OEEPE Official Publications No. 35, 125-185.
- Heipke C., Jacobsen K. Wegmann H. (2002): Analysis of the results of the OEEPE test integrated sensor orientation, in: , Heipke C., Jacobsen K. Wegmann H. (Eds.), Integrated Sensor Orientation, OEEPE Official Publication No. 43.
- Heipke C., Pakzad K., Straub B.-M. (2000): Image analysis for GIS data acquisition, Photogrammetric Record, 16 (96), 963-985.
- Helava U.V. (1988): Object-space least-squares correlation, PE&RS (54) 6, 711-714.
- Hinz S. (2003): Automatische Extraktion urbaner Straßennetze aus Luftbildern, Dissertation, Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München.
- IMAGI (2003): Geoinformation und moderner Staat, Broschüre des Interministeriellen Ausschusses für Geoinformationswesen der deutschen Bundesregierung, Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- Koch A., Heipke C., Lohmann P. (2002): Bewertung von SRTM Digitalen Geländemodellen – Methodik und Ergebnisse, PFG 6, 389-398.
- Konecny G., Lehmann G. (1984): Photogrammetrie, de Gruyter, Berlin.
- Kraus K. (1997): Eine neue Methode zur Interpolation und Filterung von Daten mit schiefer Fehlerverteilung, Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation, Heft 1, 25-30.
- Maas H.-G., Vosselman G. (1999): Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (54), 153-163.
- Mayer H. (1998): Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern, DGK Reihe C, Nr. 494, 131 p.
- Mayr W. (2002): Bemerkungen zum Thema „True orthoimage“, PFG (4), 237-244.
- Mercer B. (2001): Combining LIDAR and IfSAR: what can we expect?, in: Fritsch D., Spiller R. (Eds.), Photogrammetric Week '01, Wichmann Verlag, Heidelberg, 227-237.
- Pakzad K. (2001): Wissensbasierte Interpretation von Vegetationsflächen aus multitemporalen Fernerkundungsdaten, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 243 und DGK Reihe C, Nr. 543, 104 p.
- Petrie G. (2002): Commercial space imagery revisited, Geoinformatics (5) 6, 18-27.
- Rosenfeld, A. (1982): Computer image analysis: an emerging technology in the service of society. Computer Science Technical Reports TR-1177, MCS-79-23422, University of Maryland. 10 p.
- Rottensteiner F. (2001): Halbautomatische Gebäudeauswertung durch Integration von hybrider Ausgleichung und 3D Objektmodellierung, PFG 4, 289-301.
- Schwarz K.-P., Chapman M.E., Cannon E., Gong P. (1993): An integrated INS/GPS approach to the georeferencing of remotely sensed data, PE&RS (59) 11, pp. 1667-1674.
- Sörgel U. (2003): Iterative Verfahren zur Detektion und Rekonstruktion von Gebäuden in SAR- und InSAR-Daten, Dissertation, Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung, Universität Hannover.
- Straub B.-M. (2003): Automatische Extraktion von Bäumen aus Fernerkundungsdaten, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 249 und DGK Reihe C, Nr. 572, 99 p.
- Straub B.-M., Heipke C. (2001): Automatic extraction of trees for 3D city models from images and height data, in: Baltsavias E., Grün A., von Gool L. (Eds.), Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (III), Balkema Publishers, Lisse, 267-277.
- Vosselman G. (2000): Slope based filtering of laser altimetry data, IAPRS (33) 3, 935-941.
- Wewel F., Scholten F., Neukum G., Albertz J. (1998): Digitale Luftaufnahme mit der HRSC – ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie, PFG 6, 337-348.
- Wiedemann C. (2002): Extraktion von Straßennetzen aus optischen Satellitenbildern, DGK Reihe C, Nr. 551, 94 p.
- Wrobel B. (1987): Facets stereo vision (FAST Vision) - A new approach to computer stereo vision and to digital photogrammetry, Interlaken, Proc. "Fast processing of Photogrammetric Data", 231-258.
- Zhang C. (2004): Towards an operational system for automated updating of road databases by integration of imagery and geodata, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing (58) 3-4, 166-186.

Abbildungsunterschriften

Abb. 1: Zwei verschiedene Systeme für digitale Luftbildkameras werden derzeit realisiert; links das Prinzip der ADS auf der Grundlage der Dreizeilengeometrie (© Leica Geosystems, Heerbrugg), rechts die Prinzipskizze der DMC mit den vier verschiedenen panchromatischen Kameraköpfen zur Erreichung eines flächenhaften digitalen Bildes (© Z/I Imaging, Oberkochen)

Abb. 2: Das Prinzip des Laserscanning (© Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart)

Abb. 3: SRTM, die Space Shuttle Topography Mission, eine interferometrische SAR Mission, die an Bord des Space Shuttle im Februar 2000 11 Tage die Erde umkreiste (© DLR, Oberpfaffenhofen)

Abb. 4: Automatische Ableitung eine DGM (rechts) aus einem DOM (links)

Abb. 5: Ergebnis einer automatischen Straßenextraktion im offenen Gelände (© Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München)

Abb. 6: Zwei Ergebnisse einer automatischen Extraktion von Bäumen aus Multispektralbildern und einem DOM in mehreren Auflösungsstufen (aus Straub, Heipke 2001)

Abb. 7: automatische Überprüfung des ATKIS-Straßennetzes: weiße Straßen wurden verifiziert, schwarze Straßen konnten im Bild nicht erkannt werden, bei den gestrichelt dargestellten Straßen konnte keine eindeutige Entscheidung getroffen werden (aus Gerke et al. 2004)