

Photogrammetrie & Fernerkundung – vom Elektronenmikroskop bis zur Planetenbeobachtung

CHRISTIAN HEIPKE¹

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt den derzeitigen Stand und die Zukunftsperspektiven von Photogrammetrie & Fernerkundung. Nach einer kurzen Motivation wird auf die wechselseitigen Beziehungen zwischen Photogrammetrie & Fernerkundung und auf den gemeinsamen Bezug zur Geoinformatik eingegangen. Photogrammetrie & Fernerkundung – vom Elektronenmikroskop bis zur Planetenbeobachtung

Danach werden aktuelle Trends in der Bilderfassung sowie der Bildauswertung aufgezeigt. Der Beitrag schließt mit einem Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.

Die wesentlichen Aussagen des Beitrages sind die Beobachtung, dass viele der traditionell als photogrammetrisch bezeichneten Aufgaben heute entweder weitgehend automatisch oder mit Hilfe alternativer Techniken gelöst werden können. Dieser Einengung der photogrammetrischen Aktivitäten steht jedoch eine Erweiterung des Spektrums gegenüber, die sich durch die vermehrte Verfügbarkeit digitaler Bilder und die Möglichkeiten der automatisierten Interpretation der Bilder ergibt. Durch die Integration der gegebenen Daten und Auswertemethoden können neue Anwendungsfelder erschlossen werden. Stichworte in diesem Zusammenhang sind 3D-Stadtmodelle, verbunden mit ortsbezogenen Diensten (location based services) sowie die hochaufgelöste und hochfrequente Beobachtung der Erde aus dem Weltall für Zwecke der Landwirtschaft, Katastrophenschutz und Umweltforschung.

1. Einleitung

»Ein Bild sagt mehr als 1000 Worte«, dieses bekannte chinesische Sprichwort beschreibt viel von der Faszination, die von Photogrammetrie & Fernerkundung ausgeht, und insbesondere von den Bildern, die in Photogrammetrie & Fernerkundung aufgenommen und ausgewertet werden. Warum sagt uns Menschen ein Bild mehr als 1000 Worte? Eine von vielen möglichen Antworten liefert die Beobachtung, dass wir eine Szene in Windeseile mit den Augen aufnehmen (sehen) und genauso schnell interpretieren. Wir Menschen können die in Bildern implizit enthaltene Information also in Echtzeit verstehen und damit explizit machen. Diese Tätigkeit scheint uns keine spürbaren Schwierigkeiten zu bereiten, allerdings können wir nicht

angeben, wie wir diese Aufgabe bewerkstelligen; zum Stand der Forschung siehe z. B. HOFFMAN (2000) für eine allgemeinverständliche sowie ALBERTZ (1997) für eine wissenschaftlich orientierte Darstellung der menschlichen visuellen Wahrnehmung.

Photogrammetrie & Fernerkundung beschäftigen sich mit Bildaufnahme und -auswertung. 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. Der letztgenannte Aspekt hat dem Beitrag seinen Titel gegeben, immerhin werden photogrammetrische und fernerkundliche Methoden für verschiedenste Zwecke von der Rasterelektronenmikroskopie bis hin zur Beobachtung ganzer Planeten eingesetzt (siehe Abb. 1).

Dieser Artikel geht zunächst kurz auf das Verhältnis der Photogrammetrie zur Fernerkundung ein, beschreibt dann die Stellung des Gebietes im Umfeld von Geodäsie, Geoinformation und Bildanalyse. Danach werden aktuelle Trends in der Bildaufnahme und -auswertung aufgezeigt. Abschließend werden Perspektiven von Photogrammetrie & Fernerkundung beleuchtet und diskutiert.

2. Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation

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 wurden. Dabei kommen als Messgrößen Energie, Phase, Polarisierung und Laufzeit der elektromagnetischen Wellen in Betracht. Die Ableitung von Eigenschaften der abgebildeten Objekte aus diesen Messun-

¹ Prof. Dr.-Ing. Christian Heipke, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover, Nienburger Straße 1, 30167 Hannover; Tel.: (0511) 762-2482, Fax: (0511) 762-2483, e-mail: heipke@ipi.uni-hannover.de, <http://www.ipi.uni-hannover.de>

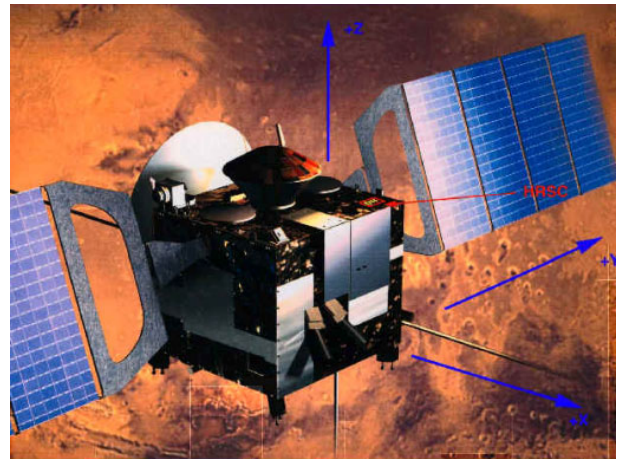
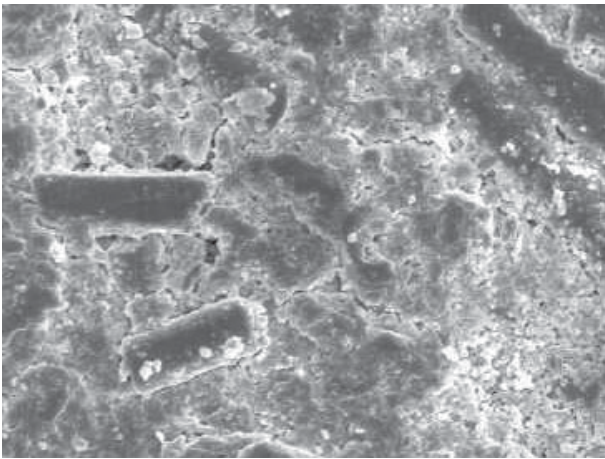


Abb. 1: Mit Photogrammetrie & Fernerkundung können Objekte fast beliebiger Größe ausgewertet werden: links ein Bild eines Rasterelektronenmikroskops (aus HEMMLEB, ALBERTZ 1998), rechts ein künstlerischer Anblick des Satelliten MarsExpress mit der HRSC, wie er Ende 2003 am Mars ankommt (© DLR, Berlin-Adlershof)

gen 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.

Unter Fernerkundung wird nach KONECNY/LEHMANN (1984, S. 11) die »Ermittlung von Informationen über entfernte Objekte verstanden, ohne mit ihnen in direkten Kontakt zu kommen. Als Informationsträger dienen Kraftfelder. Insbesondere ist das elektromagnetische Feld zur richtungsmäßigen Trennung der Objektinformation geeignet.« Entsprechend dieser Definition ist die Photogrammetrie, die als Kraftfeld elektromagnetische Strahlung des sichtbaren Lichtes und als Eingangsinformation flächenhaft verteilte Bildinformation voraussetzt, ein Teilbereich der Fernerkundung.

Früher standen die geometrischen Aspekte der Bildauswertung im Vordergrund der photogrammetrischen Forschung und Fragen der automationsgestützten thematischen Interpretation des Bildinhaltes im Zentrum der Forschung in der Fernerkundung. Die Beschäftigung mit digitalen Bildern innerhalb der Photogrammetrie hat aber dazu geführt, dass sich der Schwerpunkt von geometrischen Fragen hin zur Bildinterpretation verlagert hat. Gleichzeitig wurden geometrische Aspekte innerhalb der Fernerkundung aufgrund der gestiegenen geometrischen Bodenauflösung immer wichtiger. Heute ist die Eingliederung der Photogrammetrie in die Fernerkundung weitgehend vollzogen, der Name *Photogrammetrie* ist jedoch erhalten geblieben.² Entsprechend lautet die offizielle Definition der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung:

Photogrammetry and remote sensing is the science, technology and art of obtaining reliable information, from noncontact imaging and other sensor systems,

about the Earth and its environments, and other physical objects and processes, through recording, measuring, analyzing and representation.

Eine zentrale und immer wichtiger werdende Rolle für Photogrammetrie & Fernerkundung spielen *Geoinformationen*, also Informationen über Objekte und Sachverhalte auf der Erdoberfläche mit Raumbezug, die mit Hilfe von Geo-Informationssystemen (GIS) verwaltet, analysiert, über verschiedene Informationskanäle verteilt sowie für Präsentationszwecke aufbereitet werden (z.B. HEIPKE 2002). Die wesentliche Aufgabe von Photogrammetrie & Fernerkundung ist die Erfassung und Aktualisierung der Geoinformation im Verbund mit terrestrischen Verfahren. Für Erfassung und Aktualisierung topographischer Geoinformation ist Photogrammetrie & Fernerkundung die weltweit anerkannte Standardmethode. Die Verwaltung dieser Informationen in Datenbankmanagementsystemen ist eine der grundlegenden Aufgabe für unseren Berufszweig und wird heute zunehmend zentral koordiniert und teilweise auch zentral durchgeführt. Die Nutzung der Information nicht nur innerhalb der Verwaltung, sondern durch breite Bevölkerungsschichten, setzt die Informationsweitergabe voraus, heutzutage immer mehr unter Zuhilfenahme des Internet. Die Präsentation der Geoinformation, ob auf Papier, am Bildschirm im Büro oder auf Displays von Personal Digital Assistants (PDA) und Mobiltelefonen zur Nutzung sogenannter ortsbezogener Dienste (location based services, LBS), ist der Kartographie zuzuordnen. Für die Stadt und die Regionalplanung, aber auch in der ländlichen Entwicklung und Bodenordnung werden neben Analysen auch Prognosen und Planungen auf der Grundlage von Geoinformationen und der daraus abgeleiteten kartographischen Darstellungen erstellt. Die Planungen können dann z.B. in einem Dorferneuerungs- oder Flurbereinigungsverfahren umgesetzt werden. Damit ist der Kreislauf von der Datenerfassung über Verwaltung, Verteilung, Analyse, Prognose und Pla-

² 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.

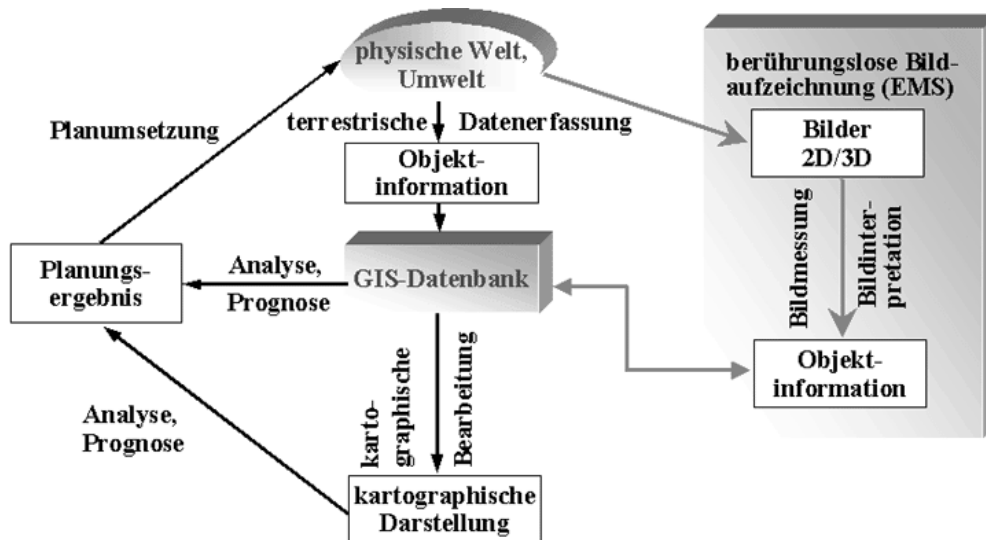


Abb. 2: Photogrammetrie & Fernerkundung im Zusammenhang mit GIS

nung bis hin zur Umgestaltung der Landschaft geschlossen (siehe auch Abb. 2). Die Integration der einzelnen traditionellen Disziplinen in diesen Kreislauf zur Erfassung, Inventarisierung und Aktualisierung von Daten der Erdoberfläche stellt eine der größten Herausforderungen dar, vor denen unser Berufszweig heute steht.

Aus diesen Ausführungen wird deutlich, dass Photogrammetrie & Fernerkundung in enger Verzahnung mit den Nachbardisziplinen einen wesentlichen Beitrag sowohl zu wissenschaftlichen Fragestellungen wie der Erforschung der menschlichen visuellen Wahrnehmung als auch zu praktischen Aufgaben wie der Erfassung, Dokumentation und Umgestaltung der menschlichen Umwelt leistet. Im Weiteren wird im Stile eines Überblicks auf aktuelle Entwicklungen in Photogrammetrie & Fernerkundung eingegangen. Dabei werden die Bereiche Bildaufnahme, geometrisch/radiometrische Bildauswertung und Bildinterpretation unterschieden.

3. Bildaufnahme

Traditionell hat sich die photogrammetrische Datenerfassung aus dem Flugzeug und im Nahbereich auf photographische, zentralperspektivische Aufnahmen einzelner Bilder mit Film als Träger beschränkt, in der Satellitenfernerkundung herrschten digitale Bilder mit weit geringerer geometrischer Auflösungen (10 m und schlechter) vor. Heute hat sich die Situation grundlegend gewandelt. Die modernen Trends werden im Folgenden aufgezeigt.

3.1 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

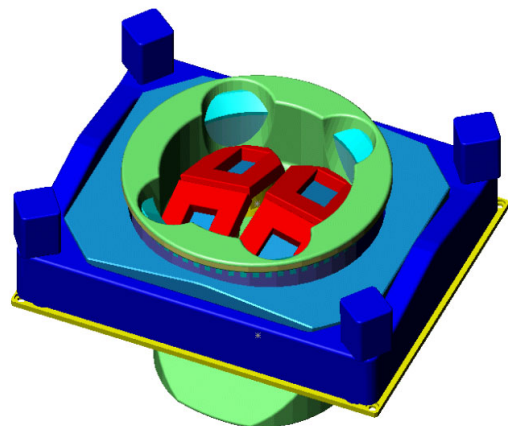
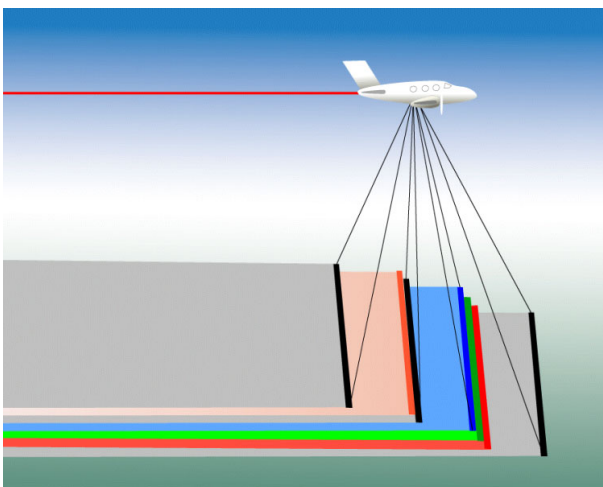


Abb. 3: Zwei verschiedene Systeme für digitale Luftbildkameras werden derzeit realisiert; links das Prinzip der ADS auf der Grundlage der Dreizeilengeometrie (© Leica Geosystems, Heerbrugg), rechts die Prinzipskizze der DMC mit den vier verschiedenen panchromatischen Kameraköpfen zur Erreichung eines flächenhaften digitalen Bildes (© Z/I Imaging, Oberkochen)

elektromagnetischen Strahlung, also Lichtenergie, Phase, Laufzeit und Polarisation, (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.

Im Nahbereich und in der Satellitenfernerkundung schon lange verbreitet, werden inzwischen auch für die Luftbildphotogrammetrie digitale Kameras auf der Grundlage der CCD-Technik entwickelt. Derzeit sind zwei konkurrierende Systeme kommerziell verfügbar, 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. 3). Daneben existieren weitere digitale Luftbildkameras, zu erwähnen ist insbesondere die bahnbrechende Entwicklung der High Resolution Stereo Camera (HRS) des DLR (WEWEL et al. 1998; SCHOLTEN et al. 2002), eines ursprünglich für den Einsatz im Weltraum konzipierten Systems auf der Grundlage der Dreizeilengeometrie, das in den letzten Jahren sehr erfolgreich vom Flugzeug aus eingesetzt wurde. Auch in Japan wird derzeit eine Dreizeilen-Kamera entwickelt, die den Namen TLS (Three Line Scanner) trägt. Daneben gibt es eine Reihe von Anbietern, die Kameras aus dem professionellen Photographiebereich erfolgreich im Flugzeug einsetzen.

3.2 Hochauflöste Satellitenaufnahmen

Nach einigen Fehlstarts gibt es seit ca. 3 Jahren Weltraumaufnahmen mit Bodenauflösungen von ca. 0,6 - 1 m panchromatisch und 2,4 - 4 m in den Kanälen Rot, Grün, Blau und Infrarot von kommerziellen Anbietern (PETRIE 2002). Alle verfügbaren und geplanten Systeme beruhen auf CCD Zeilensensoren und können stereoskopische Aufnahmen sowie in als auch quer zur Flugrichtung erstellen. Es hat sich gezeigt, dass sich die Bilddaten je nach Anforderungen des Objektartenkatalogs für die Erfassung topographischer Informationen im Bereich 1:10.000 bis 1:25.000 und kleiner eignen. Andere Anwendungen dieser Bilddaten wie Land- und Forstwirtschaft, Telekommunikation oder Versicherungswirtschaft, sollen hier nicht weiter diskutiert werden.

3.3 Multispektral- und Hyperspektralaufnahmen

Multispektralaufnahmen, also simultane Aufnahmen in mehreren Spektralkanälen, 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. Wie bereits erwähnt, besitzen auch die ADS 40 und die DMC,

die beide Bodenauflösungen unterhalb von 10 cm ermöglichen, neben einem panchromatischen Kanal vier Multispektralkanäle (Rot, Grün, Blau und Infrarot). Farbbilder werden vor allem für Visualisierungen und damit auch für die Orthoprojektion zunehmend wichtig. Der Infrarotkanal bietet insbesondere für Vegetationsanwendungen wichtige, zusätzliche Informationen und spielt im Rahmen der automatischen Auswertung zur Trennung von Vegetations- und vegetationslosen Flächen eine große Rolle.

Andere Entwicklungen sind durch eine deutliche Erhöhung der Anzahl der Spektralkanäle gekennzeichnet. Beispiele sind DAIS (Digital Airborne Imaging Spectrometer) vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit 79 und HyMap von Integrated Spectronics mit mehreren Hundert Spektralkanälen vom sichtbaren bis zum Thermalbereich, die Bilddaten werden in sogenannten Bildwürfeln (Abb. 4) verwaltet und später auch analysiert. Anwendungen bestehen vor allem in der geologischen Lagerstättenforschung und der Umweltbeobachtung.

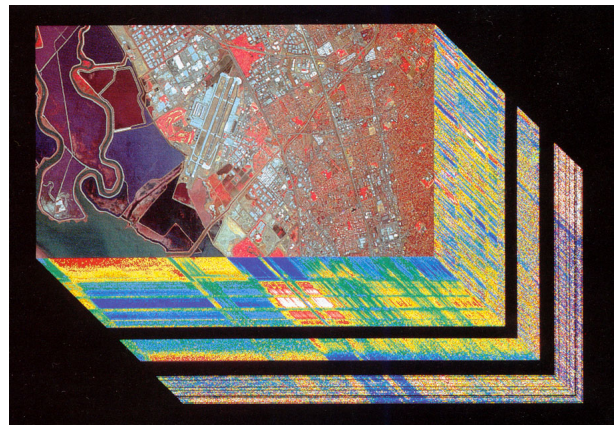


Abb. 4: Hyperspektralaufnahme eines Teils der San Francisco Peninsula mit dem NASA Ames Research Center, aufgenommen mit AVIRIS (Airborne Visible and Infrared Imaging Spectrometer). Hinter dem Farbinfrarotbild sind verschiedene Kanäle von 0,4 bis 2,45 μm Wellenlänge zu sehen. Die vertikale Achse des so entstandenen Bildwürfels beschreibt die Wellenlänge (von DOZIER, HERRING, 1988).

3.4 Dynamische Bildaufnahme

Neben einzelnen Stereoaufnahmen werden zunehmend auch Bildsequenzen und Zeitreihen von einem bzw. von mehreren Standpunkten aus aufgenommen und photogrammetrisch verarbeitet. Zum einen vereinfachen sich manche Auswerteschritte, etwa die Bildzuordnung, da sich die einzelnen Bilder nur sehr wenig voneinander unterscheiden. Zum anderen ist es damit möglich, bewegliche Objekte auszuwerten. Anwendungen reichen von der Crashvermessung im Automobilbau über die Beobachtung von Wasseroberflächen zum Zweck des Küstenschutzes bis hin zur Erntevorhersage in der Landwirtschaft und zum Katastrophenmanagement auf der Grundlage von täglich aufgenommenen Bildern aus dem Weltraum. So geben beispielsweise GIERKE, SEYFERT (2002) an, dass während der großen Überschwemmungen an der Oder im Frühjahr 1997 ein Bedarf an Luftbildern bestand, die nicht älter als 20 h sein sollten.

3.5 Laserscanner

Laserscanner liefern analog zu elektronischen Distanzmessern über Laufzeit- oder Phasenmessung Strecken zwischen dem Sensor und der reflektierenden Oberfläche. Durch Ablenkung des Lasers in zwei senkrecht zueinander verlaufenden Richtungen kann ein DOM bestimmt werden, wenn Position und Abstrahlwinkel des Laserstrahls bekannt sind bzw. gemessen werden können (Abb. 5). Laserscanner sind aktive Sensoren und damit von der Beleuchtung unabhängig, sie können also auch nachts eingesetzt werden. Flugzeuggetragene Laserscanner wurden ursprünglich zur DGM-Erfassung im Wald entwickelt. Die Idee beruhte auf der Beobachtung, dass in bewaldeten Gebieten zumindest einige Laserpulse den Boden erreichten und von dort reflektiert wurden. Für Laubwald und Befliegungen im Winter hat sich diese Idee inzwischen eindrucksvoll durchgesetzt, auch in anderen Bereichen ist Laserscanning aus dem Flugzeug eine ernstzunehmende Konkurrenz zur indirekten Oberflächenbestimmung mit Hilfe stereoskopischer Höhenmessungen. 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 die Oberfläche nur lückenhaft abtastet und eine deutlich schlechtere geometrische Auflösung als ein Luftbild besitzt. Deshalb gehen die Hersteller von Laserscannern dazu über, Sensorsysteme bestehend aus einem Laserscanner und einem Multispektralscanner anzubieten. Langfristig

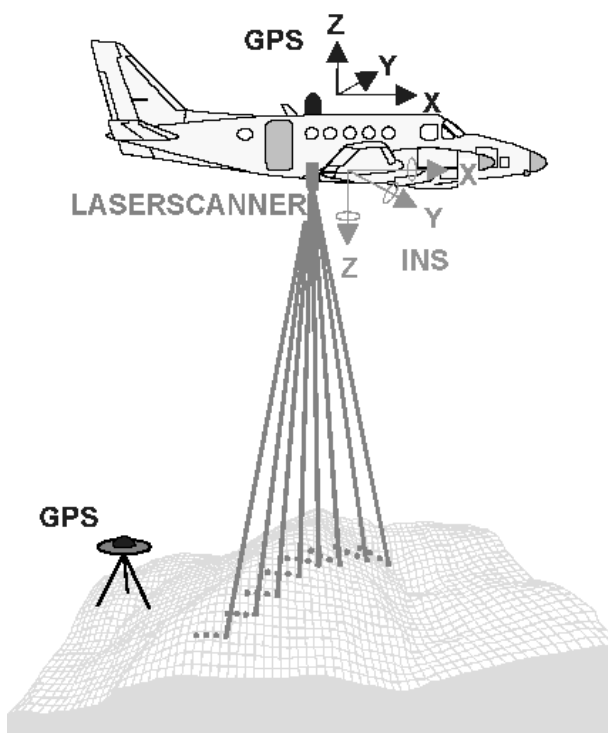


Abb. 5: Das Prinzip des Laserscanning (© Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart)

ist zu erwarten, dass eine engere Kopplung zwischen der Messung von Lichtenergie und Laufzeit und damit eine simultane Abtastung der Erdoberfläche bzgl. Helligkeit und Abstand stattfinden wird.

3.6 Radar

Bildgebende Radarsensoren messen als aktive Sensoren die Laufzeit und die Intensität von ausgestrahlter und am Boden reflektierter elektromagnetischer Strahlung im Mikrowellenbereich (LEBERL 1990). Das Prinzip der Laufzeit- und damit der Entfernungsmessung setzt Schrägaufnahmen voraus. Eine Bildzeile entsteht durch gleichabständiges Abtasten des reflektierten Signals, die zweite Dimension des Bildes kommt durch die Vorwärtsbewegung des Sensors zustande. SAR- (Synthetic Aperture Radar) Sensoren verwenden kohärente Strahlung, mit der die Auflösung in Flugrichtung durch künstliche Verlängerung der Antenne deutlich verbessert werden kann.

Heute sind für Photogrammetrie & Fernerkundung ausschließlich SAR-Sensoren im Einsatz. Sie sind von Beleuchtung und Bewölkung unabhängig und deswegen optischen Sensoren in manchen Anwendungen von vornherein überlegen. In der Vergangenheit war die schlechte Bildqualität, die aus dem bei kohärenter Strahlung mit einer gewissen Bodenauflösung prinzipiell auftretenden Speckle resultiert, allerdings ein gravierender Nachteil von Radarbildern. Multilook Techniken ermöglichen heute eine gewisse Abschwächung des Speckle, aus dem Flugzeug aufgenommene SAR Bilder werden bereits in manchen Situationen für topographische Anwendungen eingesetzt. Sowohl die Geometrie – Radarbilder sind Entfernungsbilder und deshalb für den menschlichen Operateur in Bezug auf die Geometrie ungewohnt – als auch die speziellen Reflexionseigenschaften der Mikrowellen, insbesondere im Stadtbereich und bei metallischen Gegenständen, machen die Auswertung von Radarbildern allerdings zu einer recht großen Herausforderung. Darüber hinaus dringt die Strahlung je nach Wellenlänge und Bodenbeschaffenheit unterschiedlich stark in die Oberfläche ein.

Im interferometrischen Modus liefern Radarsensoren darüber hinaus auch DOMs. Interferometrisches SAR (InSAR, manchmal auch als IfSAR bezeichnet; BAMLER, HARTL 1998) beruht auf dem möglichst gleichzeitigen Empfang eines Signals an zwei benachbarten Orten mit bekannter Position. Ein spektakuläres Beispiel für eine InSAR Mission war die Space Shuttle Topography Mission im Februar 2000 (Abb. 6). Die Messung des Phasenunterschieds des Signals lässt sich in einen Wegunterschied umrechnen, aus dem man einen Höhenunterschied des betrachteten Punktes relativ zu einer Referenzhöhe bestimmen kann. InSAR hat bereits große Anwendung in verschiedenen Gebieten der Erde gefunden. Liegen Szenen von verschiedenen Zeiträumen vor, lassen sich unter gewissen Voraussetzungen mit Hilfe des differentiellen InSAR auch kleine Höhenunterschiede bestimmen. Diese Methode wird zum Beispiel zur kontinuierlichen Beobachtung von Vulkanen genutzt.

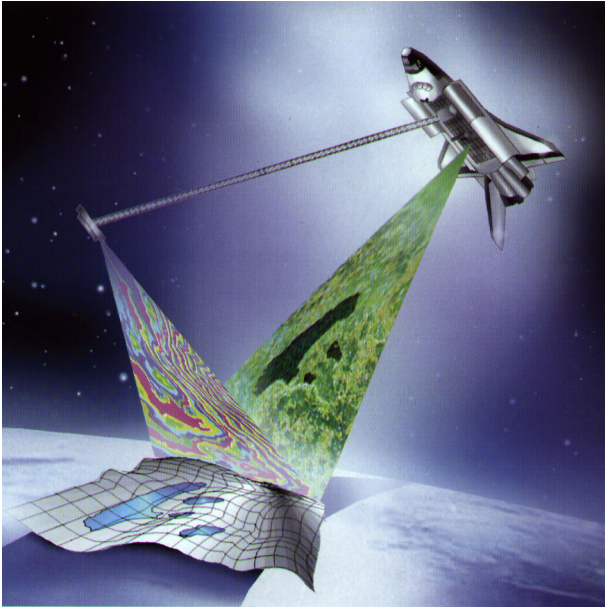


Abb. 6: SRTM, die Space Shuttle Topography Mission, eine interferometrische SAR Mission, die an Bord des Space Shuttle im Februar 2000 11 Tage die Erde umkreiste (© DLR, Oberpfaffenhofen)

3.7 Fazit

Insgesamt lässt sich feststellen, dass sich das Spektrum der verfügbaren Sensoren und Bilddaten sowohl in Bezug auf Aufnahmeprinzip und -technik, als auch auf die geometrische, spektrale und zeitliche Auflösung deutlich vergrößert hat. Hinzu kommt, dass verschiedene Sensoren kombiniert zum Einsatz kommen. So benötigen sowohl flugzeuggetragene Zeilenscanner als auch Laserscanner und SAR-Sensoren prinzipiell Position und Lage des Sensors zu jedem Zeitpunkt. Diese Forderung wird durch die direkte Messung der äußeren Orientierung mittels Verwendung von GPS (global positioning system) Empfängern in Verbindung mit inertialen Messeinheiten (inertial measurement unit, IMU) erfüllt. GPS und IMU werden darüber hinaus zunehmend auch für konventionelle Luftbildkameras als Ergänzung, teilweise auch als Ersatz für die indirekte Bestimmung der äußeren Orientierung durch eine Bündelausgleichung eingesetzt.

Der Weg führt eindeutig hin zu komplexen Sensorsystemen, verbunden mit deutlich höheren Anforderungen an die Kalibrierung sowohl der einzelnen Sensoren und als auch des Sensorsystems. Beispiele dafür sind auch die seit längerem bekannten Mobile Mapping Systeme (NOVAK 1991; SOOD, FAHRENHORST 1999). Für die mit diesen Multi-sensorsystemen aufgezeichneten Daten sind allerdings noch geeignete Konzepte und Methoden zur integrierten Auswertung (Fusion) zu entwerfen. Einige Aspekte der Sensor- und Datenfusion werden in den nächsten Kapiteln erörtert.

4. Bildauswertung

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 digitaler Oberflächenmodelle (DOMs) und digitaler Geländemodelle (DGMs)³ 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. Die Vorarbeiten zur Bildanalyse stammen vor allem aus der Informatik, insbesondere aus den Bereichen der Bildverarbeitung, der formalen Wissensrepräsentation und -verarbeitung und der Mustererkennung, sowie aus der Elektrotechnik. Trotz der offensichtlichen Überschneidungen, beide Bereiche haben das gleiche Ziel, nämlich die automatisierte Auswertung digitaler Bilder, liefen die Entwicklungen von Photogrammetrie & Fernerkundung sowie der Bildanalyse lange Zeit parallel, ohne sich gegenseitig entscheidend zu beeinflussen. Heute zeichnet sich eine ähnliche Entwicklung ab wie vor ca. 30 Jahren zwischen Photogrammetrie und Fernerkundung: trotz einiger eher historisch bedingter Unterschiede wachsen beide Bereiche immer enger zusammen und sind, soweit ähnliche Aufgabenstellungen vorliegen, kaum noch voneinander zu trennen.

4.1 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 Orthobildern 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 Ein DOM enthält im Gegensatz zum DGM die topographischen Objekte auf dem Gelände (Gebäude, Vegetation). Algorithmen zur automatischen Entfernung dieses „Geländerausbaus“ werden derzeit entwickelt und haben bereits einen für die Praxis brauchbaren Stand erreicht.

4.1.1 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) unterteilt. Bei den Sensormodellen ist zunächst die flächenhafte Zentralprojektion als klassischem Standardfall der Photogrammetrie von der Zeilengeometrie (Parallelprojektion quer zur Zeilenrichtung, Zentralprojektion in Zeilenrichtung), die sowohl den Dreizeilenkameras als auch praktisch allen modernen optischen Satellitenfernerkundungssensoren zugrunde liegt, zu unterscheiden. Die Zeilengeometrie wurde unabhängig voneinander von DERENYI, KONECNY (1966) und – speziell für die Dreizeilengeometrie – von HOFMANN et al. (1984) entwickelt. Weitere wesentliche Ergebnisse enthält MÜLLER (1991) und HOFMANN et al. (1993). Daneben existieren je nach verwendetem Sensor noch Sonderfälle wie z.B. bei der Verwendung von Panoramakameras oder Elektronenmikroskopen. Die Auswahl des Sensormodells richtet sich also nach dem verwendeten Sensor.

Die flächenhafte Zentralprojektion wird traditionell im Rahmen einer Bündelblockausgleichung mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen formuliert. Die Vorteile und Erfolge dieses Vorgehens sind hinlänglich bekannt. Allerdings ist festzuhalten, dass das resultierende Gleichungssystem nicht-linear in den unbekannten Elementen der Ausgleichung (der Bildorientierung und den Objektkoordinaten der Verknüpfungspunkte) ist. Deshalb ist es erforderlich, Näherungswerte für die Unbekannten zu beschaffen und die Unbekannten selbst iterativ zu berechnen. Darüber hinaus ist die Einführung von linien- und flächenhaften konjugierten Bildelementen sehr komplex und unterbleibt deshalb in der Regel⁴. Ausgehend von diesen Beobachtungen und der bekannten Problematik, gerade im Nahbereich Näherungswerte für die Bildorientierung zu beschaffen, wurden in den letzten Jahren alternative Ansätze für die flächenhafte Zentralprojektion auf der Grundlage der projektiven Geometrie untersucht (FAUGERAS 1993; HARTLEY, ZISSERMAN 2000; WROBEL 2001), teilweise ausgehend von alter Arbeiten aus der Photogrammetrie (RINNER 1963; THOMPSON 1968). Die erarbeiteten Methoden beruhen auf linearen Gleichungssystemen für die Berechnung der Orientierung von bis zu drei Bildern und ermöglichen so die schnelle Bestimmung der Bildorientierung ohne Vorinformation. Die Ergebnisse können bei Bedarf als Näherungswerte in einer nachfolgenden Bündelblockausgleichung verwendet werden. Darüber hinaus lassen sich auf elegante Weise punkt-, linien- und flächenhafte Bildprimitive gemeinsam verarbeiten (FÖRSTNER 2000), eine Eigenschaft, die für die stereoskopische Bildanalyse sehr vorteilhaft ist.

Die Bestimmung homologer Punkte geschieht heute fast ausschließlich über digitale Bildzuordnung. Während diese Aufgabe im Nahbereich aufgrund der teilweise stark unterschiedlichen Perspektiven der Bilder noch ein aktu-

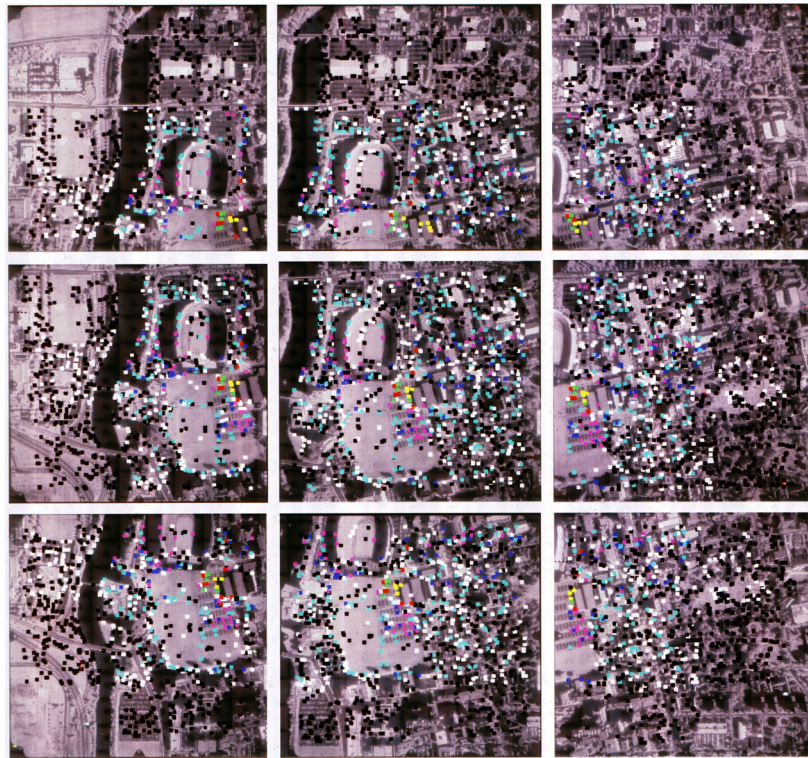


Abb. 7: Die Automatische Aerotriangulation kann mit sehr viel mehr Punkten pro Bild arbeiten als es bei der manuellen Messung möglich ist; hier ein Beispiel mit ca. 100 Punkten pro Bild

⁴ Linien- und flächenhafte homologe Bildelemente sind zwar für die Bildorientierung nicht notwendig, können aber hilfreich sein.

eller Forschungsgegenstand ist (z.B. VAN GOOL et al. 2002), sind die Methoden im Luftbild- und Satellitenbereich inzwischen weitgehend ausgereift und unter dem Stichwort *Automatische Aerotriangulation* (Abb. 7) auch in der Praxis verfügbar (HEIPKE, EDER 1998). Probleme wie unterschiedlicher Bildmaßstab, starke Höhenunterschiede im Gelände, unterschiedliche Beleuchtungsbedingungen, sich wiederholende Textur und partiell geringer Kontrast behindern die Bildzuordnung und führen dazu, dass die automatisch erzeugten Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte in der Regel interaktiv ergänzt bzw. korrigiert werden müssen.

In der Luftbildphotogrammetrie sind in den letzten Jahren als Alternative zur Aerotriangulation die direkte und die integrierte Sensororientierung intensiv untersucht worden (SCHWARZ 1993; COLOMINA 1999; 2002; 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) haben die Praxisreife dieser Lösung insbesondere für die Herstellung von Orthobildern, aber auch die damit verbundenen besonderen Herausforderungen 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. Aus Sicht der Praxis ist insbesondere die direkte Sensororientierung eine äußerst attraktive, weil automationsfreundliche Lösung. Inzwischen ist deutlich (s. auch ACKERMANN, 1986!), dass die Bedeutung der Aerotriangulation stark zurückgehen wird. Sie wird in Zukunft für die meisten Anwendungen lediglich eine Methode zur Kalibrierung des Sensorsystems zur direkten Sensororientierung sein, und gelegentlich im Rahmen der integrierten Sensororientierung zur Genauigkeitssteigerung der Ergebnisse eingesetzt werden. Allerdings ist darauf zu achten, dass bereits kleine Fehler in den Messungen und/oder den Kalibrierparametern wegen der Extrapolation der Ergebnisse vom Projektionszentrum der Kamera auf die Erdoberfläche große Abweichungen in den Ergebnissen, insbesondere in der Höhe, zur Folge haben können. Im Nahbereich ist dagegen damit zu rechnen, dass die Bündelausgleichung weiterhin die Standardmethode zur Bestimmung der Bildorientierung bleiben wird.

4.1.2 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 Orientie-

rung auf der digitalen Bildzuordnung beruht, sowie die beiden direkten Aufnahmeverfahren Laserscanning und InSAR. Stereoskopische Aufnahmen und InSAR werden auch von Satelliten aus verwendet, ebenso wie die Laseraltimetrie, bei der im Gegensatz zum Laserscanning lediglich Entfernungsmessungen entlang der Nadirspur des Satelliten, nicht aber quer dazu durchgeführt werden. 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 nur aus Bildern zuverlässig ableiten. Diese Informationen sind beispielsweise für die Gebäuderekonstruktion zur anschließenden Visualisierung und in der Hydrographie wesentlich. Es muss allerdings gesagt werden, dass die Kanteninformation derzeit noch interaktiv erfasst werden muss.

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 usw.) 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; LOHMANN 2002; Abb. 8).

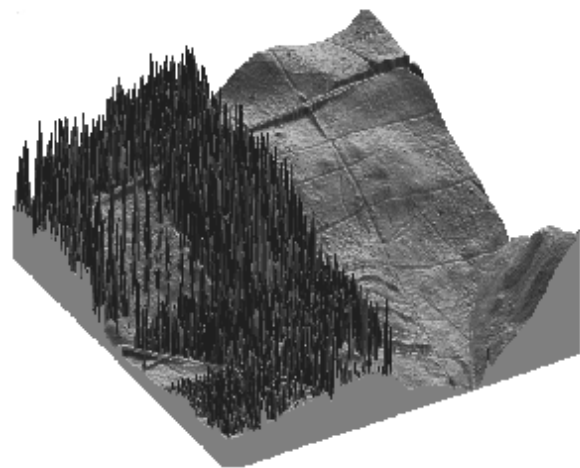


Abb. 8: Automatische Ableitung eines DGM (rechts) aus einem DOM (links)

Es ist zu erwarten, dass sich die Bodenaufklärung 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 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. Der menschliche Operateur wird daneben die Qualitätskontrolle des automatisch erzeugten Ergebnisses durchführen.

Im Nahbereich stellt sich das Problem der Oberflächenbestimmung anders dar. Photogrammetrische Bilddaten und Laserscanning werden ebenso verwendet wie vom Flugzeug und vom Satelliten aus, aufgrund der geringeren Objektentfernung besteht bzgl. der Sensorauswahl und der Auswertemethodik aber eine größere Flexibilität. Zu erwähnen sind die bekannten Lichtschnittverfahren sowie auch diverse sogenannte »Shape from X«-Methoden (HARALICK, SHAPIRO 1993). X kann dabei z. B. für Bewegung, Fokussierung, Konturen, Schattierung (dieses Verfahren wird unter dem Namen shape-from-shading auch in der planetaren Fernerkundung eingesetzt; HORN 1986; PIECHULLEK 2000) und Textur stehen. Gute Ergebnisse werden derzeit im Nahbereich mit Laserscanning, mit Lichtschnittverfahren in Verbindung mit Bildzuordnung und – vor allem für bewegte Objekte und mit kostengünstigen Sensorausrüstungen – mit Stereoverfahren erzielt (POLLEFEYS et al. 2002), letztere oft in Verbindung mit projektiver Geometrie zur Bestimmung der Bildorientierung.

4.1.3 Orthoprojektion und Visualisierung

Die Orthoprojektion ist ein seit langem bekanntes Verfahren in Photogrammetrie & Fernerkundung und soll nur insofern erwähnt werden, als es inzwischen erste kommerziell verfügbare Lösungen für sogenannte »true orthos« gibt (MAYR 2002). True orthos sind Orthobilder, für die bei der Differentialentzerrung 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 mehr sichtbar, und

auch die aus traditionellen Orthobildern großen Maßstabs bekannten Doppelabbildungen treten nicht mehr 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 (Abb. 9) und bewegter Computeranimationen, beides interessante und immer wichtiger werdenden Gebiete der Virtuellen Realität, Bereiche mit engen Beziehungen zur Photogrammetrie und zukünftige Märkte für unsere Absolventen. Die vielfach zitierte und praktizierte Erstellung von Geländeüberflügen und virtuellen Städtespaziergängen, aber auch Simulationssysteme für Katastropheneinsatzkräfte, Flugsimulatoren und Computerspiele sind nur einige Bereiche, die unser vermehrtes Augenmerk verdienen. Ein wichtiger Aspekt dieser Anwendungen ist die Integration luftgestützter und terrestrischer Bilddaten sowie deren Fusion mit anderen Messmethoden, insbesondere mit terrestrischem Laserscanning.

4.2 Bildanalyse

4.2.1 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 einzelnen 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. Aus diesem Grund wird auch von *modellbasierter* oder *wissensbasierter* Bildanalyse gesprochen. Diese Beobachtung führt zu wesentlichen Fragen der Bildanalyse, die auch nach ca. zwei Jahrzehnten Forschungstätigkeit noch nicht allgemein beantwortet werden können und deshalb Ge-



Abb. 9: Original (links) und photorealistische Visualisierung (rechts), hier am Beispiel der Bibliothek des Doms von Siena (© Zentrum für Graphische Datenverarbeitung, Fraunhofer-Gesellschaft, Darmstadt)

genstand weiterer Untersuchungen sind (siehe auch BALTSAVIAS 2002):

- Welches Wissen ist über die einzelnen Objekte vorzuhalten, welche Detailstufen der Objektmodelle sind bei vorgegebenen Bilddaten für die Bildanalyse wichtig?
- Wie ist dieses Wissen zweckmäßig in rechnerlesbarer Form zu repräsentieren?
- Wie kann das Wissen erworben werden, welche Möglichkeiten bestehen insbesondere zur automatischen Gewinnung dieses Wissens?

Es ist inzwischen klar, dass sowohl geometrische als auch radiometrische Informationen über die einzelnen Objekte vorhanden sein müssen, um erfolgreich Bildanalyse betreiben zu können. 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 Objektmodelle werden heute oft in Form von semantischen Netzen repräsentiert (NIEMANN et al. 1990; SAGERER, NIEMANN 1997; LIEDTKE et al. 2001). Diese Art der Repräsentation hat den Vorteil, dass neben den Objekteigenschaften auch die Beziehungen zwischen einzelnen Objekten berücksichtigt werden. Die Beziehungen, auch Kontext genannt, haben wesentlichen Einfluss auf die Bildanalyse, z. B. wird eine städtische Straße in Luftbildern wegen Verdeckungen und Schattenwurf durch Gebäude, Bäume, Fahrzeuge, aber auch wegen der weit komplexeren Verkehrsführung deutlich anders abgebildet als eine Straße im ländlichen Gebiet. Konsequenterweise muss für die Extraktion von Straßen je nach Kontextgebiet eine angepasste Erfassungsmethode entwickelt werden.

Die Erstellung der semantischen Netze 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 in den Netzen enthalten sein müssen. Auch können Ergebnisse, die sich bei der Übertragung eines Netzes von einem Bilddatensatz auf einen anderen ergeben müssten, nicht vorhergesagt werden. Diese Erkenntnis hat dazu geführt, neben Ansätzen zum automatischen Lernen (SESTER 1995) auch statistische Verfahren wie Neuronale Netze zur Wissensrepräsentation zu verwenden (BARSİ et al. 2002). Derzeit sind diese Ansätze noch in den Anfängen begriffen, und es kann nicht abgeschätzt werden, welche dieser Ansätze unter welchen Voraussetzungen erfolgreich arbeiten. Es ist jedoch offensichtlich, dass die effiziente Lösung zur

automatischen Erstellung von Wissensbasen eine wesentliche Voraussetzung für den Erfolg der Bildanalyse insgesamt sind.

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. Auch wenn diese Objektartenkataloge wie gesagt im Hinblick auf die Nutzung und nicht auf die Erfassung der Informationen (und schon gar nicht im Hinblick auf die Bildanalyse) aufgestellt werden, können daraus doch wichtige Hinweise zur Formulierung der Objektmodelle der Bildanalyse entnommen werden (s. auch HEIPKE et al. 2000). Es muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass die Objektmodelle von vornherein dreidimensional ausgelegt sein sollten, und dass sie Störungen, z.B. aufgrund von Verdeckungen und Schatten, berücksichtigen müssen. Ebenso ist es notwendig, das Aussehen der Objekte in den Bildern in Form von Helligkeits- bzw. Farbwerte und/oder Textur sowie den Kontext mitzumodellieren.

Weiterhin folgt fast zwangsläufig, dass die Objektmodelle der Bildanalyse ebenso wie die Objektartenkataloge in GIS hierarchisch aufzubauen sind. 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. Die groben Kontextgebiete können – falls entsprechende Bilddaten vorliegen – z.B. durch Multispektralklassifikation voneinander getrennt werden, eine andere Möglichkeit besteht in der Verwendung eventuell vorliegender GIS-Daten.



Abb. 10: Ergebnis einer automatischen Straßenextraktion im offenen Gelände (© Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München)

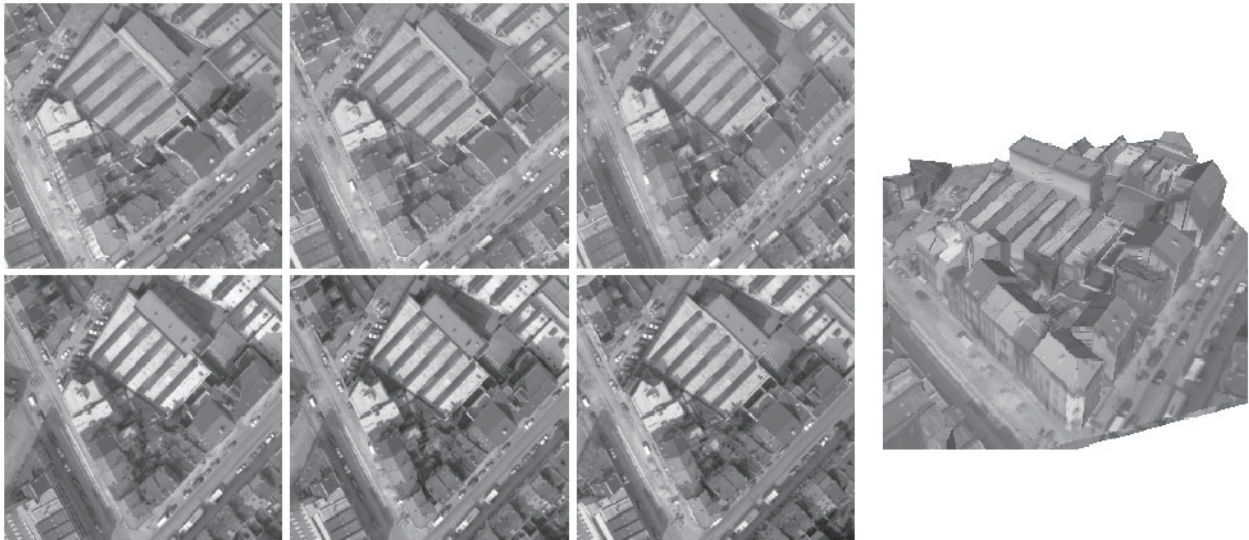


Abb. 11: Gebäuderekonstruktion aus sechs sich überlappenden Bildern, links Ausgangsbilder, rechts Ergebnis in Schrägansicht (aus BAILLARD et. al. 1999)

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 jedoch noch einen offenen, aber wesentlichen Punkt dar. Trotz vielfältiger Anstrengungen (s. z. B. JOOS 2000) existiert heute noch kein allgemeines Verfahren zur Qualitätsbeschreibung von Geoinformation. Die bisweilen zu lesende 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.

4.2.2 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 (BAUMGARTNER et al. 1997; 1999; WIEDEMANN 2002; Abb. 10) und teilweise auch in bebauten Gebieten (HINZ, BAUMGARTNER 2002), Gebäude (FISCHER et al. 1998; BAILLARD et al. 1999; LANG 1999; HEUEL 2000; Abb. 11) und Vegetation (BORGEFORS et al. 1999; PAKZAD 2001) können inzwischen unter gewissen Voraussetzungen erfolgreich automatisch extrahiert werden. Durch Kombination von Bild-daten mit DOMs und/oder Grundrissinformation aus dem Kataster können die Ergebnisse weiter verbessert werden, teilweise werden dabei auch nur DOMs und Grundriss-daten ohne Berücksichtigung der Bildinformation verwendet (HAALA 1996; WEIDNER 1997; MAAS 1999; BRENNER 2000; GERKE et al. 2001; STILLA et al. 2001; STRAUB, HEIPKE 2001; Abb. 12).



Abb. 12: Zwei Ergebnisse einer automatischen Extraktion von Bäumen aus Multispektralbildern und einem DOM in mehreren Auflösungsstufen (aus STRAUB, HEIPKE 2001)

Im Nahbereich sind die Erfassung und Verfolgung von Menschen sowie die Gesichts- und Gestenerkennung in Videosequenzen zentrale Themen. Anwendungsfelder liegen hier z. B. in der Erforschung von Bewegungsabläufen im Hochleistungssport, in der Überwachung von sicherheitsrelevanten Einrichtungen durch visuelle Zugangskontrolle, in der Blickverfolgung als Steuerungsinformation für dynamische Mensch-Maschine-Schnittstellen (Stichwort *Augmented Reality*) und in der 3D-Modellierung und Visualisierung von Menschen als Erweiterung der klassischen Photographie (z. B. FUA 2000).

Die derzeitigen Überlegungen und Entwicklungen in der Bildanalyse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Simultane Verwendung mehrerer Bilder, verbunden mit einem frühzeitigen Übergang in den dreidimensionalen Objektraum, dabei gleichberechtigte Verwendung von Punkt- Linien- und Flächeninformation durch Verwendung der projektiven Geometrie,
- 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

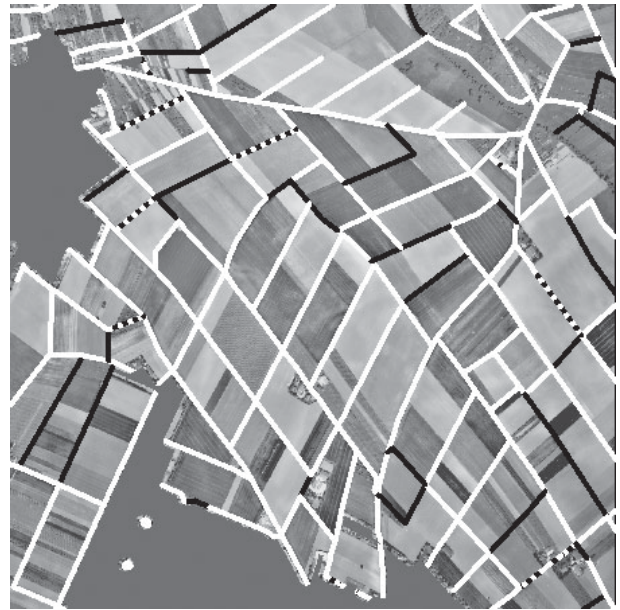


Abb. 13: Automatische Überprüfung des ATKIS-Straßennetzes: weiße Straßen wurden verifiziert, schwarze Straßen konnten im Bild nicht erkannt werden, bei den gestrichelt dargestellten Straßen konnte keine eindeutige Entscheidung getroffen werden (aus WILLRICH 2002)

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 Parameter-einstellungen) sowie die Beurteilung und ggf. Korrektur von Zwischen- und Endergebnissen erfordern. Beispiele sind die Arbeiten von ROTTENSTEINER (2001; Gebäude-erfassung) und BAUMGARTNER et al. (2002; Straßen-extraktion), 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 u. a. in der Schweiz (EIDENBENZ et al. 2000) sowie in Deutschland (WILLRICH 2002; Abb. 13) als Kooperation zwischen Hochschule und Verwaltung 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, und dass der Automationsgrad dieser Systeme langsam aber stetig steigen wird. Für die Akzeptanz beim Nutzer wird allerdings die Benutzeroberfläche von größerer Bedeutung sein als der Automationsgrad, vorausgesetzt, dass letzterer es ermöglicht, effizienter zu arbeiten als in einem rein manuellen Prozess.

Aus wissenschaftlicher Sicht kommt die Forschung damit der Frage, wie Systeme zur vollautomatischen Bildanalyse aussehen müssen, immer näher; aus Sicht der Anwendung ergeben sich aber bereits vor Klärung der wissenschaftlichen Fragestellung brauchbare Ergebnisse. Nach Ansicht des Autors stellt diese Kombination ein typische »win-win« Situation dar, wie sie auch in anderen Bereichen von Forschung und Entwicklung anzustreben ist.

5. Ausblick

Wie die Ausführungen gezeigt haben, stehen Photogrammetrie & Fernerkundung vor wichtigen Änderungen. Viele der klassischen Aufgaben werden heute automatisch oder mit alternativen Techniken gelöst. Gleichzeitig gibt es eine Welle der Integration bzw. Fusion verschiedener Sensoren, Daten und Methoden, die es nicht leichter macht, die richtige Lösung für ein gegebenes Problem zu finden. Darüber hinaus wächst die Bedeutung der Geoinformatik als Dach von Photogrammetrie & Fernerkundung immer mehr an, und die Wechselbeziehungen zwischen beiden Bereichen werden immer enger.

Im technischen Bereich sind die Entwicklungen der letzten Jahre im Bereich der Bildaufnahme sicher am spektakulärsten, aus wissenschaftlicher Sicht gilt dies für die Fortschritte bei der Automation der Bildinterpretation, die teilweise auf den neuen Bildaufnahmesystemen und teilweise auf neuen Erkenntnissen aus der Erforschung der menschlichen Wahrnehmung beruhen. In beiden Bereichen besteht natürlich Zusammenarbeit mit und Konkurrenz zu Nachbardisziplinen, insbesondere der Elektrotechnik und der Informatik. Der spezifische Vorteil der Photogrammeter war bisher ihre Kenntnis der Anwendungen, insbesondere für topographische Anwendungen, es sollte unser Anliegen sein, das dies auch weiterhin so bleibt.

Wichtig ist auch 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. Der Hintergrund ist sowohl die durch Fernsehen, Video- und Computerspiele usw. geprägte »visuelle Welt«, in der wir leben, aber auch die realen 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, dass die wichtigsten landwirtschaftliche Flächen in Europa und den USA alle paar Tage erreichen kann (SCHERER, KRISCHKE 2001), in den USA gibt es mit Resource21 und Geros ähnliche Entwicklungen (PETRIE 2002). 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.

Mit den neuen Daten und den neuen Möglichkeiten sind zu den klassischen Anwendungen von Photogrammetrie

& Fernerkundung viele neue hinzugetreten. Einige wurden im Text bereits genannt, zentral für die Zukunft sind sicher 3D Stadtmodelle, deren Erstellung, aber insbesondere auch deren Nutzung für verschiedene Planungszwecke, aber auch für breite Anwenderkreise, z. B. in Verbindung mit ortsbezogenen Diensten (location based services) über das Internet absehbar ist. Dabei wird es zu einer immer stärkeren Integration zwischen luftgestützten und terrestrischen Methoden der Datenerfassung sowie einer weitgehenden Verschmelzung zwischen Bildanalyse und Computergraphik im Rahmen der Erstellung virtueller, photorealistischer Ansichten der Umwelt kommen. Da es wenig wahrscheinlich ist, dass alle für derartige Dienste notwendigen Daten vorab erfasst und gespeichert werden können, ergeben sich langfristig für die Bildanalyse neuen Anforderungen und Möglichkeiten: es geht z. B. um die Interpretation von Bildsequenzen in Echtzeit, aufgenommen von beliebigen Standorten aus, es geht um »mobile real-time vision on demand«.

Dieser Beitrag hat mit einem alten chinesischen Sprichwort begonnen, er soll mit einer Aussage beschlossen werden, die Sokrates zugeschrieben wird. Der Betrag, den Photogrammetrie & Fernerkundung auch in der Zukunft zum Verständnis unseres Planeten im Großen und im Kleinen leisten werden, könnte deutlicher kaum formuliert werden als in dieser fast 2500 Jahre alten Weisheit.

Wir müssen uns erheben über die Erde,
hoch in die Atmosphäre und darüber hinaus –
erst dann werden wir die Welt verstehen
in der wir leben.

SOKRATES, 470 – 399 v. Chr.

6. Literatur

- ACKERMANN F. (1986): *The use of camera orientation data in photogrammetry – A review*, IAPRS (26) 1, pp. 93-99.
- ALBERTZ J. (1997, Ed.): *Wahrnehmung und Wirklichkeit – Wie wir unsere Umwelt sehen, erkennen und gestalten*, Schriftenreihe der Freien Akademie, Berlin (17), 263 p..
- ALBERTZ J., SCHOLTEN F., EBNER H., HEIPKE C., NEUKUM G. (1993): *Two camera experiments on the Mars 94/96 missions*, GIS (6) 4, 11-16.
- 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. (2002): *Object extraction and revision by image analysis using existing geospatial data and knowledge: state-of-the-art and steps towards operational systems*, IAPRS (34) 2, 13-22.
- BAMLER R., HARTL P. (1998): *Synthetic aperture radar interferometry*, Inverse Problems (14), R1-R54.
- BARSI A., HEIPKE C., WILLRICH F. (2002): *Junction extraction by artificial neural network system – JEANS*, IAPRS (34) 3B, 18-21.
- BAUMGARTNER, A., ECKSTEIN, W., MAYER, H., HEIPKE, C. and EBNER, H. (1997): *Context supported road extraction*, in: Grün A., Baltsavias E., Henricsson O. (Eds.), Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (II), Birkhäuser, Basel, 299–308.

- BAUMGARTNER A., STEGER C., MAYER H., ECKSTEIN, EBNER (1999): *Automatic road extraction based on multi-scale, grouping, and context*, PE&RS (65) 7, 777-785.
- BAUMGARTNER A., HINZ S., WIEDEMANN C. (2002): *Efficient methods and interfaces for road tracking*, IAPRS (34) 3B, 28-31.
- 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.
- COLOMINA I. (2002): *Modern sensor orientation technologies and procedures*, in: Heipke C., Jacobsen K. Wegmann H. (Eds.), *Integrated Sensor Orientation*, OEEPE Official Publication No. 43.
- CRAMER M. (2001): *Genauigkeitsuntersuchungen zur GPS/INS-Integration in der Aerotriangulation*, DGK Reihe C, Nr. 537, 122 p.
- DERENYI E., KONECNY G. (1966): *Infrared scan geometry*, PE&RS (32) 5, 773-778.
- DOZIER J., HERRING M. (1988): *HIRIS – NASA's high resolution imaging spectrometer for the Earth Observation System (EOS)*, Proceedings ESA Workshop on Imaging Spectrometry for Land Applications, ESA-SP 1101, 17-25.
- EBNER H., FRITSCH D., GILLESSEN W., HEIPKE C. (1987): *Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der digitalen Photogrammetrie*, BuL (55) 5, 194-203.
- EIDENBENZ C., KÄSER C., BALTSAVIAS E. (2000): *ATOMI – Automated reconstruction of topographic objects from aerial images using vectorized map information*, IAPRS (33) 3/1, 462-471.
- FAUGERAS O. (1993): *Three-dimensional computer vision: a geometric viewpoint*, MIT Press, Cambridge, Mass., 663 p.
- 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.
- FÖRSTNER W. (2000): *Moderne Orientierungsverfahren*, PFG 3, 163-176.
- FUA P. (2000): *Regularized bundle-adjustment to model heads from image sequences without calibration data*, International Journal of Computer Vision, 38(2), 153-171.
- GERKE M., HEIPKE C., STRAUB B.-M. (2001): *Building extraction from aerial imagery using a generic scene model and invariant geometric moments*, Proceedings of the IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas, IEEE Piscataway, ISBN 0-7803-7059-7, 85-89.
- GIERKE M., SEYFERT E. (2002): *Hochgenaue digitale Geländemodelle für die Belange des Hochwasserschutzes und des Vermessungswesens an der Oder*, PFG 5, 351-359.
- VAN GOOL L., TUYTELAARS T., FERRARI V., STRECHA C., VAN DEN WYNDENGAERD J., VERGAUWEN M. (2002): *3D modeling and registration under wide baseline conditions*, IAPRS, (34) 3A, 3-14.
- 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.
- HARALICK R., SHAPIRO L. (1993): *Computer and robot vision* Volume II, Addison-Wesley Reading, Mass., 630 p.
- HARTLEY R., ZISSERMAN A. (2000): *Multiple view geometry in computer vision*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 607 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. (2002): *Requirements for modern geographic information systems*, IAPRS (34) 2, 173-183.
- HEIPKE C., EDER K. (1998): *Performance of tie-point extraction in automatic aerial triangulation*, OEEPE Official Publications No. 35, 125-185.
- HEIPKE C., PAKZAD K., STRAUB B.-M. (2000): *Image analysis for GIS data acquisition*, Photogrammetric Record, 16 (96), 963-985.
- 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.
- HELAVA U.V. (1988): *Object space least squares correlation*, PE&RS (54) 6, 711-714.
- HEMMLEB M., ALBERTZ J. (1998): *Photogrammetrische Auswertung elektronenmikroskopischer Bilder – Grundlagen und praktische Anwendungen*, PFG (1), 5 – 16.
- HEUEL S. (2000): *Zur automatischen Erfassung von Gebäuden aus Luftbildern*, PFG 3, 177-188.
- HINZ S., BAUMGARTNER A. (2002): *Urban road net extraction integrating internal evaluation models*, IAPRS (34) 3A, 163-168.
- HOFFMAN D. (2000): *Visuelle Intelligenz – wie die Welt im Kopf entsteht*, Klett-Cotta Verlag, Stuttgart, 331 p.
- KONECNY G., LEHMANN G. (1984): *Photogrammetrie*, 4. Aufl., de Gruyter, Berlin.
- HOFMANN O., NAVÉ P., EBNER H. (1984): *DPS – a digital photogrammetric system for producing digital elevation models and orthophotos by means of linear array scanner imagery*, PE&RS (50) 8, 1135-1142.
- HOFMANN O., KALTENEGGER A., MÜLLER F. (1993): *Das flugzeuggetragene, digitale Dreizeilenaufnahme- und Auswertesystem DPA – erste Erprobungsergebnisse*, in: Fritsch D., Hobbie D. (Eds.), *Photogrammetric Week '93*, Wichmann Verlag, Karlsruhe, 97-107.
- HORN B.K.P. (1986): *Robot vision*, MIT Press, Cambridge, Mass., 509 p.
- JOOS G. (2000): *Zur Qualität von objektstrukturierten Geodaten*, Schriftenreihe des Studienganges Geodäsie und Geoinformation der Universität der Bundeswehr München, Nr. 66.
- KRAUS K. (1997): *Eine neue Methode zur Interpolation und Filterung von Daten mit schiefer Fehlerverteilung*, Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation, Heft 1, 25-30.
- LANG F. (1999): *Geometrische und semantische Rekonstruktion von Gebäuden durch Ableitung von 3D Gebäudeecken*, Shaker Verlag Reihe Informatik.

- LEBERL F. (1990): *Radargrammetric image processing*, Artech House, Norwood MA, 595 p.
- LIEDTKE C.-E., BÜCKNER J., PAHL M., STAHLHUT O. (2001): *Knowledge-based systems for the interpretation of complex scenes*, in: Baltsavias E., Grün A., van Gool L. (Eds.), Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (III), Balkema Publishers, Lisse, 3-12.
- LOHMANN P. (2002): *Segmentation and filtering of laser scanner digital surface models*, IAPRS (34) 2, 311-315.
- MAAS H.-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.
- MÜLLER F. (1991): *Photogrammetrische Punktbestimmung mit Bilddaten digitaler Dreizeilenkameras*, DGK Reihe C, Nr. 372, 82 p.
- NIEMANN, H., SAGERER, G. F., SCHRÖDER, S. and KUMMERT, F. (1990): *ERNEST: a semantic network system for pattern understanding*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, (12) 9, 883-905.
- NOVAK K. (1991): *Integration von GPS und digitalen Kameras zur automatischen Vermessung von Verkehrswegen*, ZPF (59) 4, 112-120.
- 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.
- PIECHULLEK, C. (2000): *Oberflächenrekonstruktion mit Hilfe einer Mehrbild-Shape-from-Shading-Methode*, DGK Reihe C, Nr. 518, 98 p.
- POLLEFEYS M., VAN GOOL L., VERGAUWEN M., CORNELIUS K., VERBIEST F., TOPS J. (2002): *Video-to-3D*, IAPRS (34) 3A, 252-257.
- RINNER K. (1963): *Studien über eine allgemeine, voraussetzungslose Lösung des Folgebildanschlusses*, Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen, Sonderheft (23).
- 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.
- SAGERER, G., NIEMANN, H. (1997): *Semantic networks for understanding scenes - advances in computer vision and machine intelligence*. Plenum Publishing Corp., New York, 512 p.
- SCHERER S., KRISCHKE M. (2001): *The RapidEye optical satellite family for high resolution imagery*, in: Fritsch D., Spiller R. (Eds.), Photogrammetric Week '01, Wichmann Verlag, Heidelberg, 139-145.
- SCHOLTEN F., GWINNER K., WEWEL F. (2002): *Angewandte digitale Photogrammetrie mit der HRSC*, PFG 5, 317-332.
- 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.
- SESTER M. (1995): *Lernen struktureller Modelle für die Bildanalyse*, DGK Reihe C Nr. 441, 116 p.
- SOOD R., FAHRENHORST C. (1999): *Geocoded image sequences*, in: Fritsch D., Spiller R. (Eds.), Photogrammetric Week '99, Wichmann Verlag, Heidelberg, 313-316.
- STILLA U., SOERGEL U., THOENNESSEN U., MICHAELSEN E. (2001): *Segmentation of LIDAR and InSAR elevation data for building reconstruction*, in: Baltsavias E., Grün A., van Gool L. (Eds.), Automatic extraction of man made objects from aerial and space images (III), Balkema Publishers, Lisse, 297-307.
- STRAUB B.-M., HEIPKE C. (2001): *Automatic extraction of trees for 3D city models from images and height data*, in: Baltsavias E., Grün A., van Gool L. (Eds.), Automatic extraction of man made objects from aerial and space images (III), Balkema Publishers, Lisse, 267-277.
- THOMPSON E. (1968): *The projective theory of relative orientation*, Photogrammetria (23), 67-75.
- VOSSELMAN G. (2000): *Slope based filtering of laser altimetry data*, IAPRS (33) 3, 935-941.
- WEIDNER U. (1997): *Gebäudeerfassung aus digitalen Oberflächenmodellen*, DGK Reihe C, Nr. 474, 154 p.
- 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.
- WILLRICH F. (2002): *Quality control and updating of road data by GIS-driven road extraction from imagery*, IAPRS (34) 4, 761-767.
- 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.
- WROBEL B. (2001): *Minimum solutions for orientation*, in: Grün A., Huang T. (Eds.), Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision, Springer Series in Information Sciences Vol. 34, Springer Verlag, Berlin, 7-62.