

Photogrammetrie & Fernerkundung – vom Elektronenmikroskop bis zur Planetenbeobachtung*

CHRISTIAN HEIPKE, Hannover

Keywords: photogrammetry, remote sensing, overview, applications, future perspectives

Zusammenfassung: Dieser Beitrag beschreibt den derzeitigen Stand und die Zukunftsperspektiven von Photogrammetrie & Fernerkundung. Nach einer kurzen Einleitung wird auf die wechselseitigen Beziehungen zwischen Photogrammetrie und Fernerkundung und auf den gemeinsamen Bezug zur Geoinformatik eingegangen. Danach werden aktuelle Trends in der Bildfassung sowie der Bildauswertung aufgezeigt. Der Beitrag schließt mit einem Ausblick auf zukünftige Entwicklungen.

Eine wesentliche Aussage des Beitrages ist 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, des Katastrophenschutzes und der Umweltüberwachung.

Summary: *Photogrammetry & remote sensing – from scanning electron microscopes to planetary observation.* This paper describes the current status and future perspectives of photogrammetry & remote sensing. After a short introduction we look at the relationship of photogrammetry and remote sensing, and their common connections to geomatics. Then we present current trends in image acquisition and interpretation. The paper concludes with a discussion of future developments.

An important point made in this paper is the observation that many processing steps traditionally classified as „photogrammetric“ are presently either carried automatically or by alternative means. On the other hand we witness a broader use of photogrammetric activities which is explained by the increasing availability of digital images and emerging possibilities for automatic image analysis. By integrating existing data and interpretation methods new areas of application are being opened up. Examples comprise 3D city models, connected with location based services, and high frequent and high resolution Earth observation from space for applications in agriculture, disaster management and environmental monitoring.

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. Photogram-

metrie & Fernerkundung beschäftigen sich mit Bildaufnahme und -auswertung. Im Zentrum des Interesses stehen heute digitale

* gekürzte Fassung eines Beitrags zum 50-jährigen Bestehen der Deutschen Geodätischen Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, abgedruckt in der Reihe E der Deutschen Geodätischen Kommission, Heft Nr. 26.

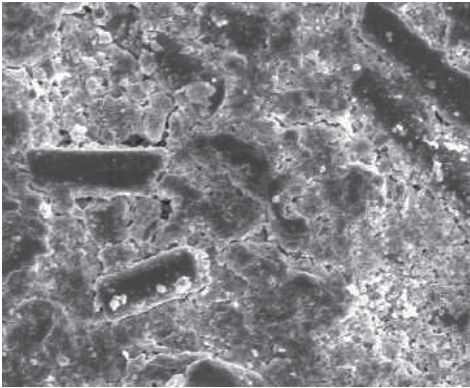


Abb. 1: Mit Photogrammetrie & Fernerkundung können Objekte fast beliebiger Größe ausgewertet werden: links ein Bild eines Rasterelektronenmikroskops (aus HEMMLEB & ALBERTZ 1998), rechts ein künstlerischer Anblick des Satelliten MarsExpress mit der HRSC, wie er Ende 2003 am Mars ankommt (© DLR, Berlin-Adlershof).

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).

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, Polarisation 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 geblieben¹. 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 (siehe z.B. HEIPKE 2002). Eine wesentliche Aufgabe von Photogrammetrie & Fernerkundung ist die Erfassung

¹ 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.

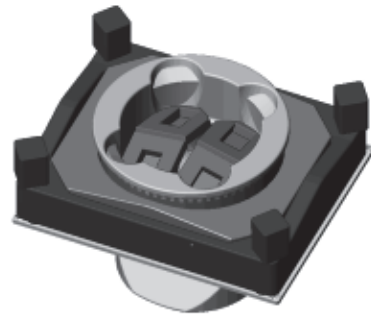
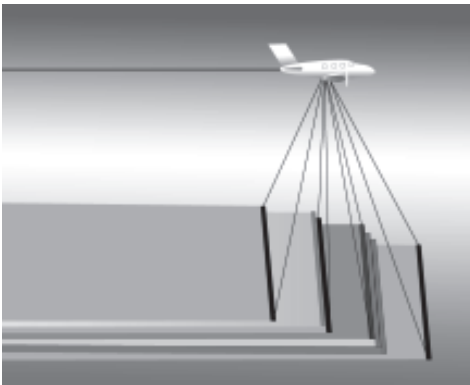


Abb. 2: Zwei verschiedene Systeme für digitale Luftbildkameras werden derzeit realisiert; links das Prinzip der ADS auf der Grundlage der Dreizeilengeometrie (© Leica Geosystems, Heerbrugg), rechts die Prinzipskizze der DMC, in der verschiedene CCD Flächensensoren mit jeweils eigener Optik zur Erreichung eines flächenhaften digitalen Bildes kombiniert werden (© Z/I Imaging, Oberkochen).

und Aktualisierung der Geoinformation im Verbund mit terrestrischen Verfahren. Für Erfassung und Aktualisierung topographischer Geoinformation ist Photogrammetrie & Fernerkundung die weltweit anerkannte Standardmethode.

2 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 geringeren geometrischen Auflösungen (10 m und schlechter) 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 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 (siehe Abb. 2).

Daneben existieren weitere digitale Luftbildkameras. Zu erwähnen ist insbesondere die bahnbrechende Entwicklung der High Resolution Stereo Camera (HRSC) des DLR (WEWEL et al. 1998).

2.2 Hochaufgelöste Satelliten-aufnahmen

Nach einigen Fehlstarts gibt es seit ca. 3 Jahren Weltraumaufnahmen mit Bodenaufösungen 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). 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.

2.3 Multispektral- und Hyperspektral-aufnahmen

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) vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) mit 79 und Hy-Map 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 Dynamische Bildaufnahme

Neben einzelnen Stereoaufnahmen werden zunehmend auch Bildsequenzen und Zeitreihen von einem bzw. von mehreren Standpunkten aus aufgenommen und photogram-

metrisch 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 zum Katastrophenmanagement. 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.

2.5 Laserscanner

Laserscanner liefern über Laufzeitmessung Strecken zwischen dem Sensor und der reflektierenden Oberfläche. Durch Ablenkung des Lasers quer zur Flugrichtung kann ein DOM bestimmt werden, wenn Position und Abstrahlwinkel des Laserstrahls bekannt sind bzw. gemessen werden können (Abb. 3). Laserscanning hat sich zu einer ernst zu nehmenden Konkurrenz zur indirekten Oberflächenbestimmung mit Hilfe

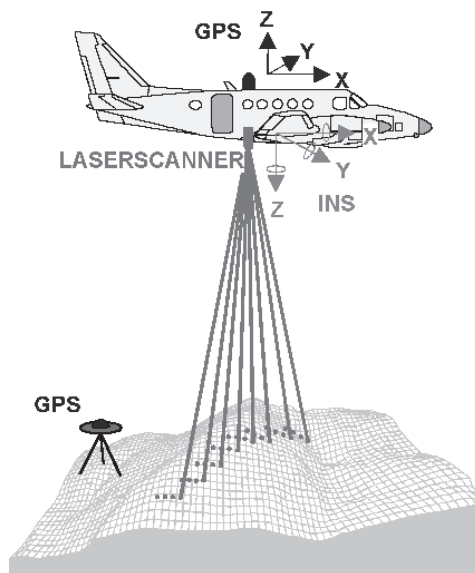


Abb. 3: Das Prinzip des Laserscanning (© Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart).

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 zurück gestrahlten Pulses möglich. Letztere stellt ein monochromatisches Bild dar, das allerdings eine deutlich schlechtere geometrische Auflösung als ein Luftbild besitzt. Deshalb gehen die Hersteller von Laserscannern dazu über, Sensorsysteme bestehend aus einem Laserscanner und einer digitalen Kamera anzubieten. Langfristig ist zu erwarten, dass eine simultane Abtastung der Erdoberfläche bzgl. Helligkeit und Abstand stattfinden wird.

2.6 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 spektaku-



Abb. 4: 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).

läres Beispiel war die Space Shuttle Topography Mission im Februar 2000 (Abb. 4). Liegen Szenen von verschiedenen Zeiträumen vor, lassen sich unter gewissen Voraussetzungen mit Hilfe des differentiellen InSAR auch kleine Höhenunterschiede bestimmen.

2.7 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 verschiedene Sensoren kombiniert zum Einsatz kommen. Der Weg führt hin zu komplexen Sensorsystemen, verbunden mit deutlich höheren Anforderungen an die Kalibrierung sowohl der einzelnen Sensoren und auch des Sensorsystems. Beispiele dafür sind auch die seit längerem bekannten Mobile Mapping Systeme (NOVAK 1991).

3 Bildauswertung

Die Bildauswertung wird hier in zwei Teilaspekte unterteilt, und zwar die geometrisch/radiometrische Bildauswertung sowie die Bildinterpretation. Zur geometrisch/ra-

diometrischen Bildauswertung gehören die Bildorientierung, die Ableitung digitaler Oberflächenmodelle (DOMs) und digitaler Geländemodelle (DGMs)² sowie 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. Heute zeichnet sich eine ähnliche Entwicklung ab wie vor ca. 30 Jahren zwischen Photogrammetrie und Fernerkundung: Trotz einiger eher historisch bedingter Unterschiede wachsen Photogrammetrie und Bildanalyse immer enger zusammen und sind, soweit ähnliche Aufgabenstellungen vorliegen, kaum noch voneinander zu trennen.

3.1 Geometrisch/radiometrische Bildauswertung

In der Vergangenheit waren die einzelnen Schritte der geometrisch/radiometrischen Bildauswertung relativ klar voneinander abgegrenzt. Heute verschwimmen die Grenzen

² Ein DOM enthält im Gegensatz zum DGM die topographischen Objekte auf dem Gelände (Gebäude, Vegetation). Algorithmen zur automatischen Entfernung dieses „Geländeraussehens“ werden derzeit entwickelt und haben bereits einen für die Praxis brauchbaren Stand erreicht.

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.

3.1.1 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. Die Zeilengeometrie wurde unabhängig voneinander von DERENYI & KONECNY (1966) und – speziell für die Dreizeilengeometrie – von HOFMANN et al. (1984) entwickelt. Daneben existieren je nach verwendetem Sensor noch Sonderfälle, wie z.B. bei der Verwendung von Panoramakameras oder Elektronenmikroskopen.

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 unbekanntenen Elementen der Ausgleichung (der Bildorientierung und den Objektkoordinaten der Verknüpfungspunkte) ist. Darüber hinaus ist die Einführung von linien- und flächenhaften konjugierten Bildelementen sehr komplex und unterbleibt deshalb in der Regel³. Ausgehend von diesen

³ Linien- und flächenhafte homologe Bildelemente sind zwar für die Bildorientierung nicht notwendig, können aber hilfreich sein.

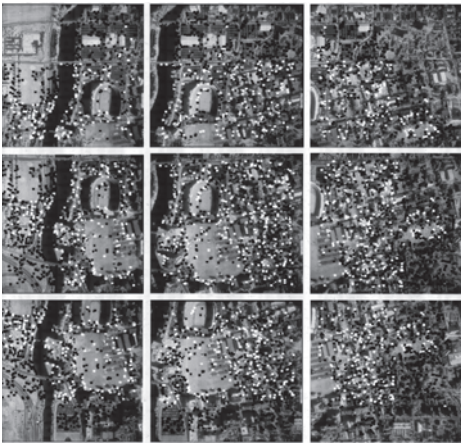


Abb. 5: Die Automatische Aerotriangulation kann mit sehr viel mehr Punkten pro Bild arbeiten als bei der manuellen Messung; hier ein Beispiel mit ca. 100 Punkten pro Bild.

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 alten 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. Die Ergebnisse können bei Bedarf als Näherungswerte in einer nachfolgenden Bündelausgleichung 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 aktueller 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. 5) auch in der Praxis verfügbar (HEIPKE & EDER 1998). Dabei werden die automatisch erzeugten Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte in der Regel interaktiv ergänzt bzw. korrigiert.

In der Luftbildphotogrammetrie sind in den letzten Jahren als Alternative zur Aerotriangulation die direkte und die integrierte Sensororientierung intensiv untersucht worden (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) 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. Inzwischen ist deutlich, 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. Im Nahbereich ist dagegen damit zu rechnen, dass die Bündelausgleichung weiterhin die Standardmethode zur Bestimmung der Bildorientierung bleiben wird.

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 siehe 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 und nur interaktiv zuverlässig ableiten. Diese Informationen sind beispielsweise für die Gebäuderekonstruktion zur anschließenden Visualisierung und 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. 6).

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 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,

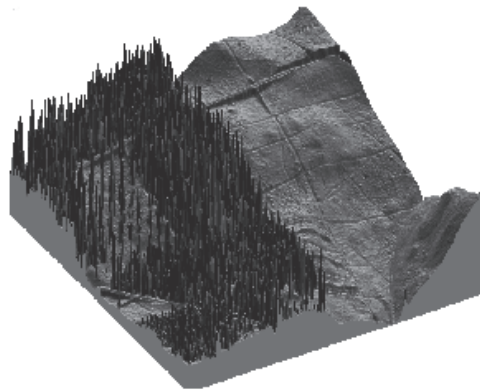


Abb. 6: Automatische Ableitung eines DGM (rechts) aus einem DOM (links).

und zwar als semiautomatische Methode, in der einfaches Gelände automatisch bearbeitet wird, komplexere Gebiete wie Siedlungen dagegen manuell.

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 diverse sogenannte „shape from X“-Methoden. 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; 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.

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 Orthobilder, für die bei der Differenzialentzerrung 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 Orthobildern 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 (Abb. 7) und bewegter Computeranimationen, beides immer wichtiger werdende 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 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.

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



Abb. 7: Original (links) und photorealistische Visualisierung (rechts), hier am Beispiel der Bibliothek des Doms von Siena (© Zentrum für Graphische Datenverarbeitung, Fraunhofer-Gesellschaft, Darmstadt).

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. Aus diesem Grund 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 notwendig sind. Auch können Ergebnisse, die sich bei der Übertragung der Modelle von einem Bilddatensatz auf einen anderen ergeben müssten, nicht vorhergesagt werden. Diese Erkenntnis hat dazu geführt, neben Ansätzen zum automatischen Lernen auch statistische Verfahren wie Neuronale Netze zur Wissensrepräsentation zu verwenden. 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 Überle-

gung, 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 (siehe 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 (BAUMGARTNER et al. 1997, WIEDEMANN 2002; Abb. 8) und teilweise auch in bebauten Gebieten (HINZ & BAUMGARTNER 2002), Gebäude (FISCHER et al. 1998, BAILLARD et al. 1999; Abb. 9) und Vegetation (BORGEFORS et al. 1999, PAKZAD 2001) können in-



Abb. 8: Ergebnis einer automatischen Straßenextraktion im offenen Gelände (© Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität München)

zwischen unter gewissen Voraussetzungen erfolgreich automatisch extrahiert werden. 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. 10).

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 Fotografie (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 Objekt-raum, dabei gleichberechtigte Verwendung von Punkt-, Linien- und Flächenin-



Abb. 9a: Ausgangsbilder für eine Gebäuderekonstruktion aus sechs sich überlappenden Bildern (aus BAILLARD et al. 1999).

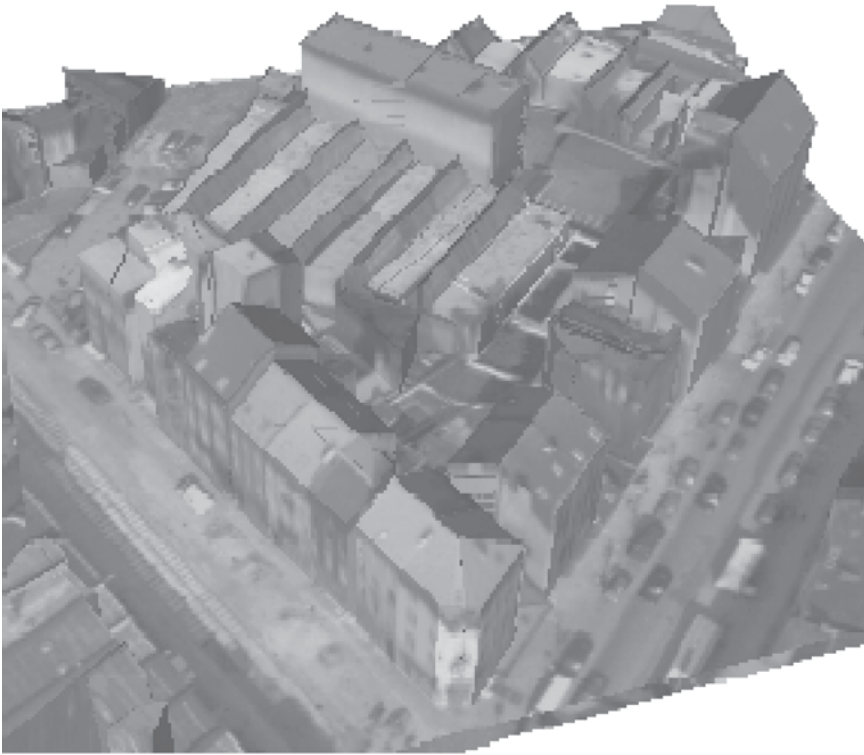


Abb. 9b: Ergebnis einer Gebäuderekonstruktion in Schrägsicht (aus BAILLARD et al. 1999).

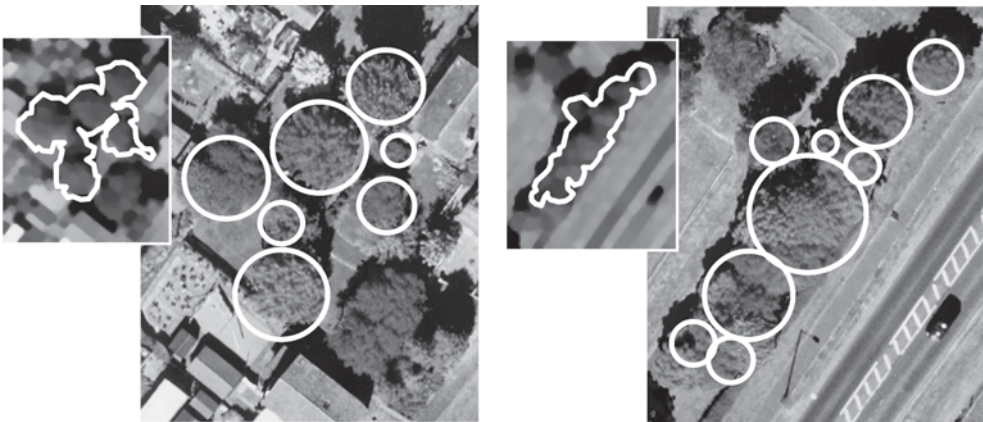


Abb. 10: Zwei Ergebnisse einer automatischen Extraktion von Bäumen aus Multispektralbildern und einem DOM in mehreren Auflösungsstufen (aus STRAUB & HEIPKE 2001).

- 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

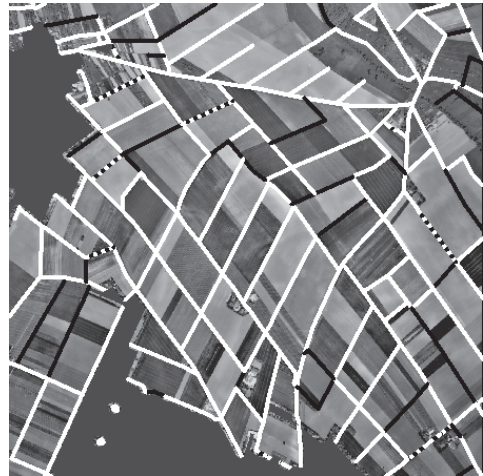


Abb. 11: Automatische Überprüfung des ATKIS-Straßennetzes: weiße Straßen wurden verifiziert, schwarze Straßen konnten im Bild nicht erkannt werden, bei den gestrichelt dargestellten Straßen konnte keine eindeutige Entscheidung getroffen werden (aus WILLRICH 2002).

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 (WILLRICH 2002; Abb. 11) sowie in der Schweiz (ZHANG 2003) 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, 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. Darüber hinaus wächst die Bedeutung der Geoinformatik als Dach von Photogrammetrie & Fernerkundung.

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. In beiden Bereichen besteht natürlich Zusammenarbeit mit und Konkurrenz zu Nachbardisziplinen, insbesondere mit 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, dass 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 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 landwirtschaftliche 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.

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 und 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, also um „mobile real-time vision on demand“.

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.
- BAMLER, R. & HARTL, P., 1998: Synthetic aperture radar interferometry. – Inverse Problems (14): R1-R54.
- BAUMGARTNER, A., ECKSTEIN, W., MAYER, H., HEIPKE, C. & 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). – 299–308, Birkhäuser, Basel.
- BAUMGARTNER, A., HINZ, S. & WIEDEMANN, C., 2002: Efficient methods and interfaces for road tracking. – IAPRS (34) 3B: 28–31.
- BORGEFORS, G., BRANDTBERG, T. & WALTER, F., 1999: Forest parameter extraction from airborne sensors. – IAPRS (32) 3-2W5: 151–158.
- BRENNER, C., 2000: Dreidimensionale Gebäude-rekonstruktion aus digitalen Oberflächenmo-

- dellen 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.
- DERENYI, E. & KONECNY, G., 1966: Infrared scan geometry. – PE&RS (32) 5: 773–778.
- EBNER, H., FRITSCH, D., GILLESSEN, W. & HEIPKE, C., 1987: Integration von Bildzuordnung und Objektrekonstruktion innerhalb der digitalen Photogrammetrie. – BuL, **55** (5): 194–203.
- FAUGERAS, O. (1993): Three-dimensional computer vision: a geometric viewpoint. – 663 p., MIT Press, Cambridge, Mass.
- FISCHER, A., KOLBE, T., LANG, F., CREMERS, A. B., FÖRSTNER, W., PLÜMER, L. & 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, **2000** (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.
- GIERKE, M. & SEYFERT, E., 2002: Hochgenaue digitale Geländemodelle für die Belange des Hochwasserschutzes und des Vermessungswesens an der Oder. – PFG, **2002** (5): 351–359.
- VAN GOOL, L., TUYTELAARS, T., FERRARI, V., STRECHA, C., VAN DEN WYDINGAERD, 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). – 103–114, Balkema Publishers, Lisse.
- GRÜN, A. & VAN GOOL, L. (Eds.): Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (III). – Balkema Publishers, Lisse.
- GRÜN, A. & WANG, X., 2001: News from Cyber-City-Modeler. – In: BALTSAVIAS, E., GRÜN, A. & VAN GOOL, L. (Eds.): Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (III). – 93–101, Balkema Publishers, Lisse.
- HAALA, N., 1996: Gebäuderekonstruktion durch Kombination von Bild- und Höhendaten. – DGK Reihe C, Nr. 460, 67 p.
- HARTLEY, R. & ZISSERMAN, A., 2000: Multiple view geometry in computer vision. – 607 p., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- 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., 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.
- HEMMELEB, M. & ALBERTZ, J., 1998: Photogrammetrische Auswertung elektronenmikroskopischer Bilder – Grundlagen und praktische Anwendungen. – PFG, **1998** (1): 5–16.
- HINZ, S. & BAUMGARTNER, A., 2002: Urban road net extraction integrating internal evaluation models. – IAPRS (34) 3A: 163–168.
- 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.
- 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, H. 1, S. 15–30.
- MAYER, H., 1998: Automatische Objektextraktion aus digitalen Luftbildern. – DGK, Reihe C, Nr. 494, 131 p.
- MAYR, W., 2002: Bemerkungen zum Thema „True orthoimage“. – PFG, **2002** (4): 237–244.
- MERCER, B., 2001: Combining LIDAR and If-SAR: what can we expect? – In: FRITSCH, D. & SPILLER, R. (Eds.): Photogrammetric Week

- '01. – 227–237, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- 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.
- 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, 10 p., University of Maryland.
- ROTTENSTEINER, F., 2001: Halbautomatische Gebäudeauswertung durch Integration von hybrider Ausgleichung und 3D Objektmodellierung. – PFG, **2001** (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): 1667–1674.
- 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). – 207–277, Balkema Publishers, Lisse.
- 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.
- WEWEL, F., SCHOLTEN, F., NEUKUM, G. & ALBERTZ, J., 1998: Digitale Luftaufnahme mit der HRSC – ein Schritt in die Zukunft der Photogrammetrie. – PFG, **1998** (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**: 7–62, Springer Verlag, Berlin.
- Zhang, C., 2003: Updating of cartographic road databases by image analysis. – Dissertation, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, Bericht Nr. 79.

Anschrift des Autors:

Prof. Dr.-Ing. CHRISTIAN HEIPKE
 Institut für Photogrammetrie und GeoInformation (IPI), Universität Hannover
 Nienburger Straße 1, D-30167 Hannover
 Tel.: +49-511-762 2482
 e-mail: heipke@ipi.uni-hannover.de

Manuskript eingereicht: Januar 2003
 Angenommen: März 2003