

Automatisierte Verifikation topographischer Geoinformation unter Nutzung optischer Fernerkundungsdaten: Systemdesign und praktische Ergebnisse*

ANDREAS BUSCH, MARKUS GERKE, DIETMAR GRÜNREICH, CHRISTIAN HEIPKE,
CLAUS-EBERHARD LIEDTKE & SÖNKE MÜLLER, Frankfurt/Hannover

Keywords: GeoInformatics, automation, change detection, GIS, quality, updating

Summary: *Automated Verification of a Topographic Reference Dataset: System Design and Practical Results.* Quality of an official topographic reference dataset is important since it is the basis for many applications. Verification is classified as being part of quality management in this paper. Its main topic is the automated verification of a topographic reference dataset by means of orthoimages. The objects from the dataset are compared to an up-to-date orthoimage in order to obtain information on their quality. The main objects of interest are roads and built-up areas. As it is assumed that most of the objects in the database are correct, the strategy is to use the ATKIS objects stored in the Basis-DLM as a starting point. Automatic image operators being able to detect the objects of interest use prior knowledge from the dataset, such as contextual and geometrical information. Thus inconsistencies between the ATKIS objects and the image features can be detected. Positional accuracy of roads is also checked. To organise the verification of the data independently from its capture, a semi-automatic environment has been implemented. In an interactive step following the automatic one, the human operator just has to focus on those objects which were not accepted automatically. In this paper we introduce the whole system. We then focus on the automatic components and their integration into the semi-automatic workflow. A detailed report on the system in its daily application is given as well as an evaluation of results.

Zusammenfassung: Die Überprüfung der Qualität amtlicher topographischer Geoinformationen ist wichtig, weil diese das Fundament zahlreicher Anwendungen bilden. Verifikation wird in diesem Beitrag als Teil des Qualitätsmanagements verstanden, wobei hier eine automatisierte Verifikation eines topographischen Referenzdatensatzes mittels Orthophotos beschrieben wird. Die Objekte des Datensatzes werden mit einem aktuellen Orthophoto verglichen, um Informationen über ihre Qualität zu erhalten. Straßen und bebauete Gebiete sind von besonderem Interesse, da hier die meisten Änderungen zu erwarten sind. Automatische Bildoperatoren, welche in der Lage sind die entsprechenden Objekte aufzufinden, verwenden Vorwissen aus dem Datensatz, z. B. kontextabhängige und geometrische Informationen. Auf diese Weise werden Inkonsistenzen zwischen den ATKIS-Objekten und den Bildmerkmalen erkannt. Außerdem wird die Lagegenauigkeit von Straßen überprüft. Der automatische Verifikationsprozess ist in eine interaktive Arbeitsumgebung eingebettet, um einem Operateur eine abschließende Überprüfung des Verifikationsergebnisses zu ermöglichen. Wir stellen hier das gesamte System vor, konzentrieren uns anschließend auf die automatischen Komponenten und ihre Integration in einen halbautomatischen Arbeitsablauf und schließen mit einer Evaluierung der Ergebnisse.

* Überarbeitete Fassung eines in den *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Band 35, Teil B2, 2004, S. 735–740, erschienenen Beitrags.

1 Hintergrund

Verifikation wird in diesem Beitrag als Teil des Konzepts des Qualitätsmanagements für topographische Geoinformation verstanden, wie es am Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) umgesetzt wird. Zunächst wird der Hintergrund von Qualität und Qualitätsmanagement bezogen auf Geoinformation dargelegt.

1.1 Qualität der Geoinformation

Jede auf räumlichen Referenzdaten oder Geodaten basierende Anwendung erfordert gewisse Kenntnisse über deren Datenqualität oder zumindest eine Vorstellung über die Konsequenzen möglicher Fehler und die mit diesen Fehlern verbundenen Risiken. Je nach Anwendung benötigt der Nutzer unterschiedliche Information über die Qualität der Geobasisdaten. Viele Nutzer beurteilen die Qualität der raumbezogenen Referenzdaten nach ihrer Eignung für den praktischen Einsatz (fitness-for-use) und dem für die Handhabung der Datensätze notwendigen Aufwand. Firmen dagegen, die mittels Anbindung eigener Daten an Referenzdatensätze neue Produkte entwickeln, wollen wissen, ob die Referenzdaten die zugesicherten Eigenschaften tatsächlich besitzen.

Qualitätsmerkmale sind standardisiert oder Teil von Spezifikationen z. B. der ISO, CEN, DIN oder des Open Geospatial Consortiums (OGC). Diese Spezifikationen sollen nicht im Detail diskutiert werden. Ein System zur Beschreibung der Qualität von Geodaten liefert Joos (2000). Er definiert vier unabhängige Qualitätsmerkmale, nämlich Vollständigkeit, Korrektheit, Konsistenz und Genauigkeit. In unserem Zusammenhang empfiehlt sich eine Unterteilung der Qualitätsmerkmale in zwei Kategorien, die für die praktische Anwendung wichtig sind und den nachstehenden Definitionen entsprechen:

- logische Konsistenz, d. h. Konsistenz in Bezug auf das Datenmodell,
- inhaltliche Konsistenz, d. h. Übereinstimmung von Daten und Realität innerhalb des Anwendungsbereichs des Modells.

Wir bezeichnen die erste Kategorie als logische Konsistenz, weil sie dadurch charakterisiert ist, dass sie ohne Vergleich der Daten mit der realen Welt überprüft werden kann. Man kann eine komplette Überprüfung dieser Kategorie unter ausschließlicher Verwendung des Datensatzes ohne zusätzliche Informationen vornehmen. Lediglich die entsprechenden Routinen und die Funktionalität innerhalb der Datenbank oder des GIS sind notwendig. Deshalb kann die Untersuchung der logischen Konsistenz automatisch ausgeführt werden. Formatspezifikationen, topologische Bedingungen, die Eindeutigkeit der Objektnummern und die Definitionsbereiche der Attribute sind Bestandteile der logischen Konsistenz. Für die zweite Kategorie, nämlich die inhaltliche Konsistenz, ist ein Vergleich der Daten mit der Realität, also der Landschaft, erforderlich. Grundsätzlich kann der Vergleich mittels aktueller Sensordaten oder im Feldvergleich erfolgen. Die Überprüfung der inhaltlichen Konsistenz bildet den Schwerpunkt dieses Beitrags.

1.2 Qualitätsmanagement am BKG

Eine der Hauptaufgaben des BKG besteht in der Bereitstellung der Geodaten des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems ATKIS auf dem Staatsgebiet der Bundesrepublik Deutschland. ATKIS® ist ein eingetragenes Warenzeichen der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV). Die wichtigsten Komponenten von ATKIS sind digitale Landschaftsmodelle (DLM) verschiedener Auflösungen und entsprechende digitale topographische Karten (DTK). Das ATKIS Basis-DLM, also das ATKIS DLM mit höchster Auflösung, wird von den Vermessungsverwaltungen der 16 Bundesländer erfasst und gepflegt und für grenzüberschreitende Fragestellungen an das BKG geliefert. Im GeoDatenZentrum (GDZ) des BKG wird das ATKIS Basis-DLM zu einem einheitlichen Datensatz für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik zusammengefügt und in einer Datenbank gespeichert. Da die

se Daten einerseits an Kunden weitergegeben und andererseits innerhalb des BKG verwendet werden, um Daten kleinerer Maßstäbe abzuleiten, ist ein System zur Qualitätskontrolle der ATKIS-Daten unverzichtbar. Die Daten werden am GDZ einer eingehenden Kontrolle unterzogen: Sie werden auf die flächendeckende Einhaltung der logischen Konsistenz, sowie der geometrischen Konsistenz an den Zuständigkeitsgrenzen der jeweiligen Vermessungsbehörden überprüft. Somit wird die Kontrolle auf logische Konsistenz in operationeller Weise innerhalb des täglichen Produktionsprozesses vorgenommen. Die während der Qualitätskontrolle aufgedeckten Fehler werden dem zuständigen Bundesland gemeldet.

Über diese gut etablierte, umfassende Überprüfung der logischen Konsistenz des ATKIS Basis-DLM hinaus betreibt das BKG eine inhaltliche Qualitätskontrolle.

Da praktisch alle Veränderungen in der Landschaft vom Menschen geplant und durchgeführt werden, sind Informationen darüber sehr frühzeitig verfügbar; für gewöhnlich bereits während der Planungsphase. Deshalb haben die Vermessungsverwaltungen in Deutschland ein sogenanntes topographisches Informationsmanagement eingerichtet, um Informationen über Veränderungen zu erhalten und diese in angemessener Zeit für die Aktualisierung der Geoinformationen zur Verfügung zu stellen.

Damit der gesamte Produktionsprozess von der Ersterfassung über Aktualisierungen bis zum aktuellen Datenbestand durchgreifend kontrolliert werden kann, ist ein Vergleich des ATKIS Basis-DLM mit der Landschaft notwendig. Hierfür hat das BKG ein gemeinsames Projekt mit der Universität Hannover initiiert, um ein System für die automatisierte Qualitätskontrolle des ATKIS Basis-DLM auf der Grundlage von Fernerkundungsdaten zu entwickeln (BUSCH & WILLRICH 2002). Da der Vergleich mit der realen Welt in der praktischen Anwendung noch weit davon entfernt ist, vollautomatisch abzulaufen, wurde das System als interaktives Verfahren, basierend auf ArcGIS® einerseits und auf automatischen Bildanalysemethoden andererseits, imple-

mentiert. Das wissensbasierte Bildinterpretationssystem GeoAIDA (LIEDTKE et al. 2001) und verschiedene Methoden der Objekterkennung bilden den Kern der automatischen Verfahren. Diese Algorithmen laufen separat im Batch-Modus und liefern Ergebnisse, die in die interaktive Arbeitsumgebung übernommen werden. In dem System werden Orthophotos neueren Datums als aktuelle Referenz verwendet. Diese werden zur Beurteilung der Vollständigkeit, der Korrektheit sowie der Lage- und zeitlichen Genauigkeit eingesetzt.

Während die endgültige Entscheidung über Fehler einem Operateur überlassen bleibt, geht es zunächst darum, möglichst viele ATKIS-Objekte automatisch in den Bilddaten zu finden. Diese als korrekt angenommenen Objekte können dann ausgeblendet werden, so dass sich der Operateur auf jene Objekte konzentrieren kann, bei denen das automatische Verfahren keine Verifikation vornehmen konnte. Unser Hauptinteresse gilt wichtigen Objekten mit den am häufigsten auftretenden Änderungen, also dem Straßennetz und bebauten Gebieten.

Wir betrachten die Qualitätskontrolle als unabhängiges Verfahren zur Beurteilung der Qualität von Geodaten anhand von Stichproben und um Mängel innerhalb der Produktionskette aufzuspüren. Je nach Bildquelle können verschiedene Objekte und Attribute auf ihre Richtigkeit überprüft werden. So kann beispielsweise anhand von Orthophotos die Lagegenauigkeit sowohl von Objekten als auch geometrischen Attributen, z. B. der Straßenbreite, bestimmt werden. Daneben existieren noch Attribute, die den Bilddaten nicht entnommen werden können. In diesen Fällen muss die Qualitätskontrolle auf anderem Wege durchgeführt werden.

1.3 *Automatisierte Verifikation und Fortführung räumlicher Datenbanken anhand von Bildern*

Automatische und halbautomatische Objekterkennung ist seit Jahrzehnten einer der Schwerpunkte internationaler Forschung

der Photogrammetrie und des Computersehens (Computer Vision) (z. B. BALTSAVIAS et al. 2001, HEIPKE et al. 2004). Inzwischen gelangen die Ergebnisse auch auf den kommerziellen Markt. Da jeder Algorithmus zur Objekterkennung eine gewisse Fehleranfälligkeit aufweist, muss er derzeit noch in einen interaktiven Arbeitsablauf eingebunden werden, wobei endgültige Entscheidungen einem Operateur überlassen bleiben. Um einen effizienten Arbeitsablauf zu gewährleisten, müssen die Algorithmen mit einer geeigneten und zuverlässigen Selbstdiagnosefunktion ausgestattet sein, die dem Operateur die Konzentration auf jene Fälle ermöglicht, bei denen das automatische Verfahren versagt. Z. B. entwickelte WALTER (2004) ein System, das den Operateur bei der Qualitätskontrolle flächen- und linienhafter Objekte in ATKIS unterstützt, indem es Landbedeckungsklassen aus Satellitenbildern mittels automatischer Klassifikation extrahiert und sie mit den entsprechenden ATKIS-Objekten vergleicht. WALTER verwendet dem existierenden ATKIS-Datensatz entnommenes Vorwissen, um Trainingsdatensätze für eine überwachte Klassifizierung zu definieren. ATKIS-Objekte, die mit hoher Wahrscheinlichkeit Änderungen gegenüber den extrahierten Objekten aufweisen, werden als verändert angenommen und zur Unterstützung der endgültigen interaktiven Analyse durch den Operateur visualisiert.

Vielfach beruhen solche Ansätze auf einem wissensbasierten System zur Bildinterpretation. Wissensbasierte Systeme haben sich als nützliches Mittel zur Darstellung von Objektwissen und dessen Auswertung während des Bildinterpretationsprozesses erwiesen. Unser System modelliert strukturelle Abhängigkeiten mittels semantischer Netze und wurde bereits bei der Klassifizierung von Landbedeckungen mittels Orthophotos, digitaler Oberflächenmodelle und Vorwissen aus einem GIS erfolgreich angewendet (BÜCKNER et al. 2002).

In unserem System enthält der Vergleich des ATKIS Basis-DLM mit der Realität zwei Schritte, nämlich die Verifikation und die Erfassung von Veränderungen. Die Veri-

fikation wird durch folgende Merkmale charakterisiert:

- Der Bildanalyseprozess wird durch GIS-Informationen über die zu verifizierenden Objekte gestützt, d. h. der Algorithmus verwendet die in einem GIS enthaltenen Informationen, um das Bildobjekt zu lokalisieren.
- Falls ein gewisser Übereinstimmungsgrad der Bildmerkmale und der GIS-Information besteht, wird das Objekt akzeptiert und als verifiziert angesehen.
- Andernfalls wird das Objekt als nicht akzeptiert ausgewiesen.

Somit ist die Verifikation für bestimmte Aussagen zur Qualität des Datensatzes geeignet. Objekte, für die die automatisierte Verifikation nicht möglich war, können sich gegenüber dem erfassten Datenbestand verändert haben. Für die Erfassung von Veränderungen müssen jedoch auch Informationen über ein neues, noch nicht im Datensatz gespeichertes Objekt oder über Veränderungen des alten Objektes aus dem Bild extrahiert werden. Unter praktischen Gesichtspunkten ist es sinnvoll, Differenzen zwischen Datenbestand im GIS und entsprechenden Objekten im Bild automatisch aufzudecken und den Erfassungsprozess des veränderten oder neuen Objektes separat und stärker vom Operateur kontrolliert durchzuführen. Deshalb beginnt ein sinnvoller Arbeitsablauf mit einem automatischen Verifikationsschritt.

2 Grundlegender Ansatz

2.1 Konzept des Prototypen

Das Konzept des Systems zur Verifikation von topographischen Geoinformationen wird durch die folgenden Ideen charakterisiert:

- Transfer wissensbasierter Bildinterpretationstechniken in operationelle Lösungen für praktische Anwendungen (siehe Abschnitt 1.3).
- Entwicklung eines Prototyps für den Vergleich des ATKIS Basis-DLM mit der

Realität auf der Basis digitaler Orthophotos.

- Effiziente Integration des Prototyps in einen interaktiven Arbeitsablauf.

Das entwickelte System ist in ein umfassendes Konzept einer wissensbasierten Arbeitsstation eingebettet, die für die Erfassung und Pflege von Geoinformationen verschiedene Funktionsweisen aus Photogrammetrie, GIS und Kartographie bereitstellt.

Durch Anwendung von Verfahren, die im Forschungs- und Entwicklungsprojekt mit der Universität Hannover entwickelt wurden, wird die interaktive Qualitätskontrolle derzeit Schritt für Schritt automatisiert. Der Operateur startet automatische Schritte der Bildauswertung, die zu einem Ergebnis führen, das wiederum Eingriffe des Operateurs ermöglicht.

Das Ziel ist die Reduzierung der menschlichen Eingriffe mittels automatisch ablaufender Routinen. Schwierige Situationen werden anschließend in einem separaten Schritt vom Operateur analysiert und gelöst.

Die Ergebnisse des automatischen Verfahrens werden ähnlich einer Ampelanzeige, d. h. mittels roter und grüner Farbe, an den Operateur weitergeleitet. Wenn der Algorithmus das entsprechende Bildobjekt ohne Widersprüche verifizieren kann, wird das ATKIS-Objekt mit grüner Farbe markiert, anderenfalls in rot.

Da der Operateur über Annahme oder Ablehnung lediglich im Falle der roten Ob-

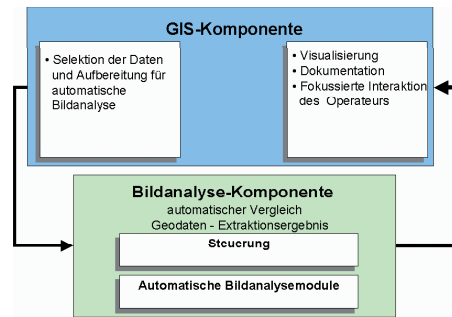


Abb. 1: Die Systemkomponenten für Qualitätskontrolle.

jekte entscheidet, muss die Entscheidung des automatischen Verfahrens insbesondere bei grün gekennzeichneten Objekten sehr zuverlässig sein. Die unterschiedlichen Situationen, die beim Vergleich der menschlichen Entscheidung und der Diagnose durch automatische Verfahren auftreten können, sind in Tab. 1 dargestellt.

2.2 Systemkomponenten

Das System ist als wissensbasierte Arbeitsstation konzipiert. Deren Funktionalität umfasst die wissensbasierte photogrammetrische Bildanalyse und weitere Schritte für die Produktion von Geoinformation. Es besteht aus zwei Hauptteilen: der GIS-Komponente und der Bildanalysekomponente (Abb. 1).

Die GIS-Komponente beruht auf ArcGIS®. Sie dient zur Selektion der ATKIS-Daten, als Schnittstelle zur Datenbank und zum Bildanalyse-System sowie als Umgebung für interaktive Nachbearbeitung automatisch abgeleiteter Ergebnisse.

Die Bildanalyse-Komponente führt vollautomatisch die Extraktion relevanter Objekte sowie deren Vergleich mit den zu überprüfenden Geodaten durch und ist aus Sicht des Benutzers als „Black Box“ konzipiert.

3 Automatische Bildanalysemodule

Die Überprüfung des topographischen Datensatzes erfolgt unter Verwendung des wissensbasierten Bildinterpretationssystems

Tab. 1: Entscheidungsmatrix: Operateur im Vergleich zum automatischen Verfahren. Die Entscheidung des Operateurs dient als Referenz.

Operateur \ automatisch	grün	rot
grün	richtigerweise angenommen	fälschlicherweise verworfen (Fehler 1. Art)
rot	fälschlicherweise angenommen (Fehler 2. Art)	richtigerweise verworfen

GeoAIDA (LIEDTKE et al. 2001), das am Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung, Universität Hannover, entwickelt wurde. GeoAIDA basiert auf einem semantischen Netz, das die zu analysierende Szene abbildet. Es wurde für die Interpretation vollständiger Szenen entwickelt und innerhalb der genannten Kooperation für Zwecke der ATKIS Basis-DLM-Verifikation modifiziert.

3.1 Straßenverifikation

Der erste Schritt der Straßenverifikation besteht in einer der Datenbank entnommenen Festlegung einer Region für jedes Straßenobjekt. Es wird ein Puffer um den die Straßenachse darstellenden Vektor definiert, die Pufferbreite entspricht der geometrischen Genauigkeit des Straßenobjekts und dem Attribut der Straßenbreite in der ATKIS-Datenbank. Falls letzterer Wert einen Plausibilitätstest nicht besteht oder gar nicht vorhanden ist, wird ein vordefinierter Wert verwendet. Anschließend wird ein für die Bearbeitung im Bildbereich des Puffers geeigneter Straßenextraktionsalgorithmus ausgewählt. Die Auswahl enthält eine Parameterkontrolle unter Berücksichtigung des Wissens über die entsprechende Kontextregion. Derzeit wird der von WIEDEMANN 2002 beschriebene Straßenextraktionsalgorithmus verwendet. Dieser Ansatz modelliert Straßen als lineare Objekte in Luft- oder Satellitenbildern mit einer Auflösung von ca. 1 bis 2 m. Zu beachten ist, dass dieser Algorithmus für ländliche Gebiete entwickelt wurde. Deshalb beziehen sich die folgende Diskussion und die Ergebnisse der Straßenextraktion ausschließlich auf ländliche Bereiche.

Im Verlauf der Straßenextraktion werden zunächst unter Verwendung eines Ansatzes von STEGER 1998 extrahierte Linien durch Fuzzy-Werte entsprechender Attribute wie Länge, Geradlinigkeit und Homogenität in Breite und Grauwerten bewertet. Der letzte Schritt der Straßenextraktion, wie er in der Verifikation Anwendung findet, ist die Gruppierung einzelner Linien, um einen topologisch korrekten und geometrisch opti-

malen Weg zwischen Startpunkten ableiten zu können. Die Entscheidung, ob extrahierte und bewertete Linien in einem Straßenobjekt zusammengefasst werden sollen, wird anhand eines Kollinearitätskriteriums gefällt. Die beschriebene Straßenextraktionssoftware wurde an unsere speziellen Aufgaben angepasst, insbesondere durch Anwendung individueller Parameter für verschiedene Kontextbereiche und die separate Extraktion jedes Straßenobjektes.

Das vorgestellte Verfahren ist eingebettet in einen zweistufigen, auf der Graphentheorie basierenden Ansatz, der die Verbindungsfunktion von Straßen ausnutzt und zu einer Reduzierung falscher Entscheidungen während der Verifikation führt (GERKE et al. 2004). In der ersten Phase wird die Straßenextraktion mit strikter Parameterkontrolle angewendet, was zu einer relativ geringen Anzahl korrekt extrahierter Straßen führt. Andererseits werden auch zahlreiche Straßen abgewiesen, obwohl sie korrekt sind. Ziel dieses Schrittes ist es, Fehler 2. Art praktisch auszuschließen. Für die zweite Phase werden alle verworfenen Objekte hinsichtlich ihrer Verbindungsfunktion innerhalb des Straßennetzes überprüft. Es wird angenommen, dass in der ersten Phase akzeptierte Straßen über einen optimalen, d. h. kurzen, Weg miteinander verbunden sind. Alle zurückgewiesenen Straßen aus der ersten Phase, die diese Netzwerkfunktionen erfüllen, werden in der zweiten Phase erneut überprüft, jedoch mit einer toleranteren Parameterkontrolle für die Straßenextraktion.

Für den praktischen Einsatz ist die Einstellung der Parameter von großer Bedeutung. Die Parameter für die Straßenextraktion lassen sich grob in zwei Bereiche einteilen: Parameter für geometrische Straßeneigenschaften und solche für radiometrische Eigenschaften. Erstere sind abhängig von der Region, in der die ATKIS-Daten liegen. Beispielsweise können im Flachland weniger starke Krümmungen im Straßenverlauf erwartet werden als im Bergland (Serpentinen). Hier bedarf es spezifischer Anpassungen, die ein erfahrener Operateur aber leicht einbringen kann. Die Güte der Einstellung radiometrischer Parameter hängt sowohl

von den Straßen (Material), als auch von den Bilddaten und Aufnahmeeinflüssen (Sonnenstand, Filmmaterial/digitaler Sensor, Weiterverarbeitung etc.) ab. Eine genaue Anpassung an radiometrische Eigenschaften – hier: über den Kontrast bei der Liniextraktion – ist wegen des verwendeten topologischen Ansatzes nicht sehr kritisch. Die Kontrastparameter werden im ersten Schritt sehr streng gewählt, im zweiten Schritt eher tolerant, wodurch oben genannte Einflüsse keine signifikanten Auswirkungen auf das Ergebnis haben.

3.2 Verifikation flächenhafter Gebiete

Während dieser Analyse werden zwei unterschiedliche, sich gegenseitig ergänzende Ansätze verwendet. Für die Entscheidung zwischen den vier Klassen *bewirtschaftete Flächen*, *Wald*, *Industrie- und Wohnbauflächen* wird eine Texturanalyse der Szene vorgenommen. Zur weiteren Unterscheidung wird zusätzlich eine Strukturanalyse des Bildes durchgeführt, welche nach den wichtigsten Elementen für *Siedlungsgebiete*, Häusern und Industriehallen, sucht.

3.2.1 Texturanalyse

Die Texturanalyse verwendet einen Segmentierungsalgorithmus wie in GIMEL'FARB 1997 beschrieben. Er wurde um die Funktionalität erweitert, in verschiedenen Auflösungen zu arbeiten. Die ATKIS-Objektarten *Ackerland* und *Grünland* werden wegen ihrer ähnlichen Textur in der einheitlichen Klasse *bewirtschaftete Fläche* zusammengefasst. Die textuellen Eigenschaften der einzelnen Klassen müssen anhand klassifizierter Trainingsgebiete angelernt werden. Bei diesem Anlernen kann der Auflösungsgrad für jede Klasse bestimmt werden, bei der sie signifikante Signaturen aufweist und so am besten von anderen Klassen getrennt werden kann. Das Ergebnis des Anlernens wird in einer Evaluationsmatrix gespeichert.

Bei der Texturanalyse wird das Eingangsbild zunächst in jeder Auflösungsstufe mit dem oben genannten Verfahren segmentiert. Im Folgenden wird die resultierende Klas-

sifikation aus einer Kombination der jeweiligen Segmentierungsergebnisse aus allen Auflösungsstufen unter Berücksichtigung der Evaluationsmatrix berechnet.

Das Anlernen ist entscheidend für die Effizienz und Güte der abgeleiteten Ergebnisse. Es ist nicht notwendig, den Segmentierungsalgorithmus für jedes Bild anzulernen, ein einmaliger Lernprozess pro Befliegung ist nach unserer bisherigen Erfahrung ausreichend. Um den Lernprozess zu beschleunigen, können die Grenzen der Trainingsgebiete auch einem GIS entnommen werden. Da aber die vollautomatische Ableitung von Trainingsgebieten zu inhomogenen Gebieten führen kann, ist die manuelle Festlegung von Flächengrenzen vorzuziehen.

3.2.2 Strukturanalyse

Die Strukturanalyse basiert auf dem Auffinden von Gebäuden, die als komplexe, aus mehreren Teilen bestehenden Strukturen modelliert werden. Es wird ein Beleuchtungsmodell bei normaler Sonneneinstrahlung unterstellt; folglich werden Schatten neben einem Gebäude erwartet. Der Azimut- und Zenitwinkel der Sonne wird als Vorwissen verwendet. Hypothesen für Schatten und Dächer werden unter Verwendung zweier verschiedener Bildsegmentierungsoperatoren generiert. Um diese Hypothesen zu verifizieren, müssen Hypothesen für Dächer mit einem oder mehreren Schatten kombiniert werden. Schattenhypothesen von Gebäuden werden unter Verwendung des Grauerthistogramms gewonnen. Zusätzlich dürfen Schatten nur eine maximale Fläche haben, so dass z. B. Schatten in der Nähe eines Waldes unberücksichtigt bleiben. Dachhypothesen werden in einem komplexeren Verfahren generiert. Hier wird zunächst das Verfahren „Colour-Structure-Code“ (REHRMANN & PRIESE 1998) für die Segmentierung des gesamten Eingangsbildes verwendet. Es werden nur Dachhypothesen plausibler Größe ausgewählt; zusätzlich werden Kompaktheit und Orthogonalität überprüft. Die Position eines Schattens zu einem Dach muss dem Beleuchtungsmodell entsprechen. Die sich ergebenden Ge-

bäudeinstanzen werden unter Berücksichtigung ihrer Größe in Häuser und Gewerbehallen unterteilt. Die wenigen benötigten Parameter für die Extraktion von Schatten- und Dachflächen lassen sich leicht einstellen; selbst bei suboptimaler Wahl der Parameter arbeitet die Gebäudeextraktion durch die restriktive Überprüfung mit Hilfe des Beleuchtungsmodells zuverlässig.

3.2.3 Verifikation einer ATKIS-Region

Die Ergebnisse des struktur- und des texturbasierten Ansatzes werden zusammengeführt, um die ATKIS-Gebiete zu verifizieren. Beide Ansätze führen zu verschiedenen Qualitätsmaßen. Die Texturklassifikation führt zu einer pixelweisen Zuordnung zu den verschiedenen Klassen. Der strukturelle Ansatz identifiziert Gebäude unter Berücksichtigung verschiedener Merkmale und der Struktur von Primitiven wie Dach und Schatten zueinander. Die berücksichtigten ATKIS-Gebiete werden mittels eines Evaluationskatalogs bewertet, der aus dem ATKIS-Objektartenkatalog mit Hilfe der Erfahrung von Operateuren erstellt wurde. Sowohl die textuellen als auch die strukturellen Bedingungen müssen für eine korrekte ATKIS-Region erfüllt werden. *Wohnbauflächen* und *Industrieflächen* werden anhand der gefundenen Gebäude verifiziert. Vegetationsklassen werden verworfen, wenn Gebäude in diesen Regionen auftreten. Innerhalb bewirtschafteter Flächen wird ein gewisser Prozentsatz an *Wald* toleriert, häufig zu finden an den Rändern dieser Flächen.

4 Vollständiger Arbeitsablauf

Hauptmerkmal des kompletten Arbeitsablaufs der automatisierten Qualitätskontrolle ist die Kombination automatischer Abläufe (s. Abb. 2) mit den interaktiven Schritten und Entscheidungen, die vom Operateur vorgenommen werden. Orthophotos und das ATKIS Basis-DLM sind sowohl für die automatischen Verfahren wie auch für den Operateur verfügbar. Der Operateur betrachtet beides mit Hilfe einer entsprechend angepassten Oberfläche unter ArcGIS. Die

Ergebnisse der automatischen Abläufe erhält der Operateur in Form von Ampel-Diagnosen, die ebenfalls von ArcGIS eingelesen und am Bildschirm dargestellt werden. Wenn man sich auf die vom automatischen Verfahren akzeptierten Objekte, d. h. die grün hervorgehobenen ATKIS-Objekte, verlässt, kann der automatische Arbeitsablauf im Vergleich zu einem rein interaktiven Verfahren deutlich beschleunigt werden. Der Operateur muss sich ausschließlich auf eine Entscheidung für die zurückgewiesenen ATKIS-Objekte konzentrieren. So entsteht ein Zeitersparnis, die dem Anteil der automatisch akzeptierten ATKIS-Objekte entspricht. Die sich hieraus ergebenden Konsequenzen werden in Tab. 2 dargestellt. Der aus dem Vergleich eines ATKIS-Objekts mit dem Orthophoto resultierende Prozentsatz von Übereinstimmungen zeigt die Effizienz des Systems. Diese Effizienz entspricht der Ersparnis an interaktiver Arbeitszeit. Wenn der in Abb. 2 gezeigte Arbeitsablauf zugrunde gelegt wird, führen vom automatischen Verfahren akzeptierte Objekte, die vom Operateur verworfen würden, zu unentdeckten Fehlern (Fehler 2. Art). Ihr prozentualer Anteil muss deshalb so gering wie möglich gehalten werden. Um fälschlich verworfene Objekte (Fehler 1. Art) entsprechend Tab. 1 zu vermeiden, werden alle vom automatischen Ablauf zurückgewiesenen ATKIS-Objekte einer Endkontrolle durch den Operateur unterzogen. Nur bei diesen Objekten findet eine interaktive Prüfung

Tab. 2: Entscheidungsmatrix: Operateur im Vergleich zum automatischen Verfahren. Auswirkungen (siehe auch Tab. 1).

	automatisch	grün	rot
menschlicher Operateur			
grün		Effizienz	interaktive Endkontrolle
rot		nicht aufgefundene Fehler	interaktive Endkontrolle

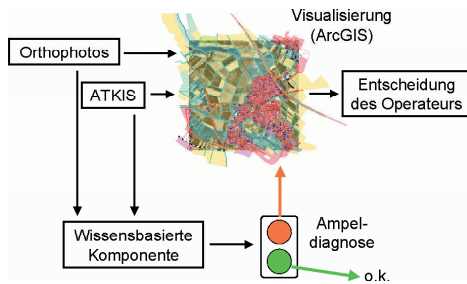


Abb. 2: Arbeitsablauf der Qualitätskontrolle.

statt, wie sie ohne automatische Unterstützung für alle Objekte durchgeführt werden müsste.

Fehler 1. und 2. Art lassen sich im Allgemeinen nicht unabhängig voneinander minimieren. So bewirkt eine Verminderung des Fehlers 1. Art eine Vergrößerung des Fehlers 2. Art und führt zu mehr unentdeckten Fehlern. In unserem Fall wurde eine Effizienz von 50%, also eine Einsparung der Hälfte an interaktiver Arbeitszeit, bei gleichzeitig verschwindend kleinem Fehler 2. Art als ein akzeptables Ergebnis definiert. Für eine vollständige Beurteilung des Verfahrens müsste gegebenenfalls zusätzlich die Art bzw. Schwere der nicht gefundenen Fehler hinzugezogen werden. Dies gibt auch Hinweise auf Schwächen der Bildauswertung, die dann durch verbesserte oder erweiterte Modellierung verbessert werden könnten.

5 Beispiele und Ergebnisse

Das System ist in der beschriebenen Form seit Mitte 2003 am BKG installiert. Die erzielten Verifikationsergebnisse wurden mit denen eines Operateurs verglichen. Das Testgebiet umfasst 14 Szenen einer Größe von je 2 km × 2 km in Nordrhein-Westfalen.

Abb. 3 zeigt als Beispiel eine durch die automatische Straßenverifikation erzeugte Situation. Der rot markierte Weg entspricht nicht den Genauigkeitsvorgaben von ATKIS und wurde vom automatischen System deshalb nicht akzeptiert.

Während die Straßenextraktion gegenwärtig auf die im ATKIS Basis-DLM ent-

Tab. 3: Statistische Angaben zur Straßenverifikation. Der Prozentsatz bezieht sich auf die Anzahl getesteter ATKIS-Objekte.

	automatisch	grün	rot
Operateur			
grün		65.7 %	32.0 %
rot		0.76 %	1.53 %

haltenen Straßenobjekte beschränkt ist, bezieht sich die flächenhafte Verifikation auf das gesamte Orthophoto. So zielt die Analyse darauf, bebauten Gebiete zu verifizieren, ihre Änderungen und Erweiterungen zu erfassen, und schließlich Neubaugebiete und während der Datenerfassung übersehene bebauten Gebiete aufzufinden.

Tab. 3 fasst die Ergebnisse der Straßenverifikation zusammen. Diese basieren auf der Untersuchung von ca. 2300 ATKIS-Straßenobjekten innerhalb ländlicher Gebiete. Es wird ersichtlich, dass durch das automatisierte Verfahren etwa zwei Drittel der interaktiven Arbeitszeit eingespart werden konnte. Nach den bisherigen Erfahrungen benötigt ein Operateur für die rein interaktive Kontrolle der Straßen und Wege, d. h. ohne Unterstützung durch die automatische Bildauswertung, für ein Orthophoto (4 km²) etwa 4 Stunden. Die Zeitersparnis betrug für das beschriebene Projekt demnach ca. 40 Stunden.

Abb. 4 zeigt das Beispiel eines automatisch erfassten Neubaugebietes. Die statistischen Angaben für die Verifizierung bebauter Flächen sind in Tab. 4 enthalten. Die Ergebnisse basieren auf denselben Eingangsdaten wie diejenigen der Straßenverifikation. Die Prozentsätze in Tab. 4 beziehen sich erneut auf die Anzahl getesteter ATKIS-Objekte. Die flächenhafte Kontrolle der Wohnbau- und Industrieflächen, bewirtschafteter Flächen und des Waldes erledigt der Operateur ohne automatische Unterstützung in etwa 8 Stunden pro Orthophoto.

Es zeigen sich vergleichsweise mehr Fehler 2. Art (s. Tab. 1). Die meisten dieser Fälle

Tab. 4: Statistische Angaben zur Verifikation bebauter Flächen. Der Prozentsatz bezieht sich auf die Anzahl getesteter ATKIS-Objekte.

automatisch \ Operateur	grün	rot
grün	69.5%	21.2%
rot	6.2%	3.1%

stammen von Einzelgebäuden, die nur einen kleinen Teil, oft weniger als 10%, der untersuchten Fläche bedecken. Diese Schwäche des Verfahrens wird derzeit anhand einer Anpassung des Verfahrens an solche Fälle behoben.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das hier beschriebene automatisierte Verifikationsverfahren ist durch einen effizienten Arbeitsablauf automatischer Verfahren und eine abschließende, manuelle Bearbeitung von Situationen, die sich in einer automatischen Selbstdiagnose als kritisch herausstellten, charakterisiert. Ein Beispielprojekt hat gezeigt, dass das Verfahren im praktischen Einsatz zu einer erheblichen Zeiterparnis in der täglichen Arbeit führt. Für die nahe Zukunft ist geplant, die Methoden mit Bildern hochauflösender Satelliten zu testen. Daneben ist für Straßen ein Modul zur Änderungsdetektion in Arbeit. Dadurch sollen dem Operateur auch Straßen angezeigt werden können, die sich im Vergleich ATKIS Basis-DLM zu Bilddaten als neu herausgestellt haben.



Abb. 3: Beispiel einer Straßenverifikation. Orthophoto und ATKIS Basis-DLM: grün = akzeptierte Objekte, rot = verworfenes Objekt.

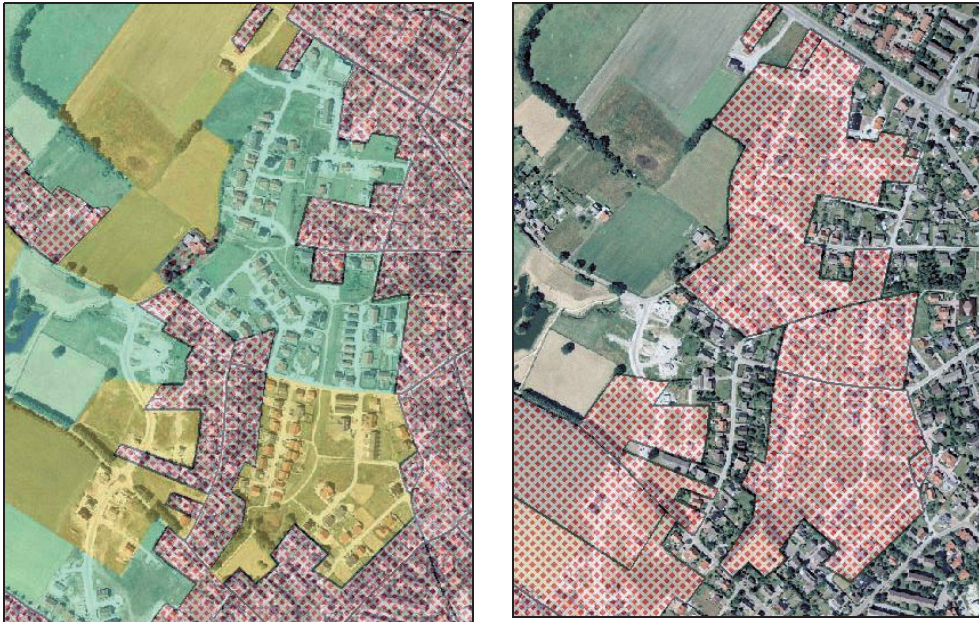


Abb. 4: Verifikationsbeispiel bebauter Flächen. Links: Orthophoto und ATKIS Basis-DLM (grün: Grünland, gelb: Ackerland, rot: Siedlung), rechts: automatische Fehlererkennung (rot: Widerspruch zu ATKIS Basis-DLM = verworfene ATKIS-Objekte).

Literatur

- BALTSAVIAS, E., GRÜN, A. & VAN GOOL, L. (eds.), 2001: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III). – A.A. Balkema Publishers, Lisse/Abingdon/Exton (PA)/Tokyo.
- BÜCKNER, J., PAHL, M., STAHLHUT, O. & LIEDTKE, C.-E., 2002: A knowledge-based system for context dependent evaluation of remote sensing data. – In: v. GOOL, L.J. (ed.), DAGM-Symposium, Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 2449, pp. 58–65, Springer, Zürich, Switzerland.
- BUSCH, A. & WILLRICH, F., 2002: System design for automated quality control of geodata by integration of GIS and imagery. – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV, Part 2, Commission II, pp. 53–58.
- GERKE, M., BUTENUTH, M., HEIPKE, C. & WILLRICH, F., 2004: Graph supported verification of road databases. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 58 (3–4): 152–165.
- GIMEL'FARB, G.L., 1997: Gibbs fields with multiple pairwise pixel interactions for texture simulation and segmentation. – Rapport de recherche RR-3202, INRIA, Sophia Antipolis, France.
- HEIPKE, C., PAKZAD, K., WILLRICH, F. & PELED, A., 2004: Integration of geodata and imagery for automated update of spatial databases. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 58 (3–4): 127–128.
- JOOS, G., 2000: Zur Qualität von objektstrukturierten Geodaten. – Schriftenreihe des Studienganges Geodäsie und Geoinformation der Universität der Bundeswehr München, Nr. 66.
- LIEDTKE, C.-E., BÜCKNER, J., PAHL, M. & STAHLHUT, O., 2001: Knowledge based system for the interpretation of complex scenes. – In: BALTSAVIAS, E., GRUEN, A. & VAN GOOL, L. (eds.), Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III). – A.A. Balkema Publishers, Lisse/Abingdon/Exton (PA)/Tokyo.
- REHRMANN, V. & PRIESE, L., 1998: Fast and robust segmentation of natural color scenes. – In: CHIN, R.T. & PONG, T.-C. (eds.), ACCV'98, Third Asian Conference on Computer Vision, Hong Kong, China, Proceedings, Volume I. – Lecture Notes in Computer Science 1351: 598–606, Springer.

- STEGER, C., 1998: An unbiased detector of curvilinear structures. – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **20**(2): 311–326.
- WALTER, V., 2004: Object-based classification of remote sensing data for change detection. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, **58** (3–4): 225–165.
- WIEDEMANN, C., 2002: Extraktion von Straßennetzen aus optischen Satellitenbildern. – Deutsche Geodätische Kommission. Reihe C, Dissertationen, Heft Nr. 551.

Anschriften der Autoren:

Dr.-Ing. ANDREAS BUSCH,
Prof. Dr. DIETMAR GRÜNREICH,
BKG – Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Richard-Strauss-Allee 11, D-60598 Frankfurt/M. –
(andreas.busch, dietmar.gruenreich)@bkg.bund.de

Dipl.-Ing. MARKUS GERKE,
Prof. Dr. CHRISTIAN HEIPKE,
IPI – Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Universität Hannover,
Nienburger Str. 1, D-30167 Hannover –
(gerke, heipke)@ipi.uni-hannover.de

Prof. Dr. CLAUS-EBERHARD LIEDTKE,
Dipl.-Ing. SÖNKE MÜLLER,
TNT – Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung, Universität Hannover, Appelstr. 9A, D-30167 Hannover –
(liedtke, mueller)@tnt.uni-hannover.de

Manuskript eingereicht: November 2004

Angenommen: Dezember 2004