

## **Automatisierte Methoden zur ATKIS-Fortführung auf der Basis von digitalen Orthophotos**

**BERTHOLD PLIETKER, Schwerin**

### **ZUSAMMENFASSUNG**

Mit der ersten Erfassungsstufe von ATKIS sind in Deutschland umfangreiche Geodatenbestände aufgebaut worden. Diese Daten müssen nun möglichst zeitnah fortgeführt werden. Im Rahmen der Laufendhaltung ist der alte Datenbestand zu überprüfen. Änderungen sind aufzudecken, neue Elemente zu erfassen. Am Beispiel von ATKIS-Straßendaten wird eine Unterstützung dieser Fortführungsaufgaben auf der Grundlage der wissensbasierten Bildverarbeitung entwickelt. Das System zeichnet sich dabei durch die umfassende Einbindung des alten Datenbestandes in diese Aufgabe aus. Dies bringt eine Reihe von Vorteilen mit sich. Der Suchraum des Erkennungsproblems wird drastisch reduziert. Wegen des umfangreichen Vorwissens können zunächst relativ einfache und damit schnelle Methoden für die Objekterkennung benutzt werden, die erst bei einem Versagen sukzessive durch komplexere und aufwendigere Ansätze ersetzt werden. Der umfangreiche Einsatz von Kontextwissen gewährleistet eine große Erfolgschance bei der Objekterkennung. Durch die Vorgabe von Hypothesen aus dem alten Datenbestand ist die Verwendung hierarchischer Strategien gut für die Ablaufsteuerung des Erkennungsprozesses geeignet. Damit ist das gesamte System in Hinblick auf die Wirksamkeit verschiedener Methoden einfach analysierbar. Außerdem wird durch eine Einbindung der Erkennungsprozesse in die vorhandenen Datenstrukturen eine einfache Rückeinspeisung der gefundenen Änderungen in das System gewährleistet.

### **1. EINLEITUNG**

Nach dem Aufbau umfangreicher topographischer vektorieller Grunddatenbestände für Geoinformationssysteme sind die Daten entsprechend den Veränderungen in der realen Welt fortzuführen. Dafür muß der bestehende Datenbestand mit den neuen Gegebenheiten verglichen werden. Die relevanten Veränderungen schon erfaßter Objekte müssen erkannt und eingearbeitet werden. Des weiteren sind aber auch neue Objekte zu erkennen und zu dokumentieren.

Klassischerweise wird in der Topographie für diese Aufgaben die Luftbildinterpretation mit Ergänzung durch andere Datenquellen eingesetzt. In den Luftbildern wird eine Vielzahl von topographischen Objekten zumindest in ihrer geometrischen Lage und Form dokumentiert.

Durch die Digitalisierung der Luftbilder werden diese aktuellen Datenbestände einer automatisierten Auswertung durch den Rechner zugänglich gemacht. Diese Verfahren können in der nächsten Zeit um so mehr an Bedeutung gewinnen, als neben den Luftbildern zunehmend weitere hochauflösende Sensoren entwickelt und eingesetzt werden. Diese Sensoren liefern von vornherein digitale Daten in kürzeren Zeiträumen, als es bisher die normalerweise zyklusgebundene Luftbildbefliegung getan hat. Als aktueller Datenbestand für die Fortführung werden wegen der Vereinfachung der geometrischen Transformationen in dem hier beschriebenen System bislang digitale Orthophotos im Maßstab 1 : 10 000 mit einer Bildauflösung von ca. 25 cm gewählt, die auf der Grundlage von panchromatischen Luftbildern erzeugt wurden.

Im vorliegenden Artikel wird ein System auf der Grundlage der wissensbasierten Bildinterpretation vorgestellt, das helfen soll, einen Teil der Fortführung topographischer Objekte zu automatisieren.

### **2. WISSENSBASIERTE BILDINTERPRETATION**

Die wissensbasierte Bildinterpretation zielt darauf ab, Objekte in einer gegebenen Abbildung zu erkennen. Dazu wird Wissen über die Abbildungseigenschaften des Sensors und das typische Erscheinungsbild von bestimmten Objektarten in einer solchen Abbildung eingesetzt. Außerdem existiert Wissen, wie die einzelnen Objekte im Bild erkannt werden können. Die wissensbasierte

Bildinterpretation hat die Aufgabe, eine Aussage darüber zu treffen, welche Objekte wo und in welcher Ausprägung vorkommen.

In der obigen Definition für die wissensbasierte Bildinterpretation können zwei Arten von Wissen unterschieden werden: Zum einen das deklarative Wissen, das die Eigenschaften der Objektarten und ihre möglichen Beziehungen untereinander beschreibt und zum anderen das prozedurale Wissen, das die Anwendbarkeit verschiedener Algorithmen, ihre Abfolge und die Einstellung ihrer Parameter beinhaltet (de Gunst, 1996).

Das Wissen kann auf verschiedene Art und Weise repräsentiert werden. Haralick und Shapiro (1993) unterscheiden 5 Hauptarten: Merkmalsvektoren, relationale Strukturen, hierarchische Strukturen, Regeln und *Frames*. Während Merkmale nur globale Eigenschaften von Objekten beschreiben können, können durch die Einführung von Relationen und Hierarchien die Objekte detaillierter über Objektteile und die Beziehungen zwischen diesen Objektteilen und den einzelnen Objekten erfaßt werden. Damit können auch komplexe Szenen beschrieben werden. Semantische Netze fallen unter diese Strukturen. Deklaratives Wissen kann auch durch Regeln in Form von Grammatiken beschrieben werden. Regeln können aber zusätzlich prozedurales Wissen darstellen. *Frames* sind eine Art Obermenge der vorhergehenden Repräsentationsarten. Sie sind als eine relationale Struktur zu verstehen, die auch hierarchisch angeordnet sein kann und deren einzelne Knoten nicht nur Werte für Merkmale enthalten können, sondern auch Verweise auf andere *Frames* oder Regeln, Ausdrücke oder Prozeduren zur Ermittlung der Merkmalswerte.

Eine Interpretationsstrategie steuert die Umsetzung und Anwendung des Wissens. Es wird zwischen hierarchischer und heterarchischer Strategie unterschieden. Zwei Beispiele für hierarchische Strategien sind *top-down* und *bottom-up*. Bei der *top-down*-Strategie wird eine Hypothese aufgestellt, von der ausgehend Merkmale im Bild vorhergesagt werden. Je nachdem, ob sich diese Merkmale wirklich finden, wird die Hypothese angenommen oder verworfen. Bei der *bottom-up*-Strategie werden aufgrund allgemein extrahierter Merkmale, Attribute und Relationen Hypothesen über die Existenz von Objekten aufgestellt. In der Regel werden die beiden Extrema zu einer Hybrid-Strategie vereint. So werden aus einer anfänglichen Merkmalsextraktion Hinweise auf Objekte ermittelt, die dann über eine erneute objektspezifische Segmentierung verstärkt und bestätigt werden. Bei der heterarchischen Strategie wird das Wissen in Form von Prozeduren oder Prozedurfolgen abgelegt. Diese sogenannten Wissensquellen verschlüsseln in sich die Objekte bzw. deren Eigenschaften. Die Bildinterpretation wird dann durch die Daten bestimmt. Je nach Zustand der Daten werden einzelne Wissensquellen aktiviert, die den Zustand der Daten verändern und damit die Aktivierung anderer Wissensquellen verursachen.

Die verschiedenen Schritte der Bildinterpretation liefern Ergebnisse, die oft fehlerbehaftet bzw. unvollständig sind. Außerdem ist die Interpretation einer Bildregion von der Interpretation ihrer Umgebung abhängig. Damit wird die Integration und Abwägung der unterschiedlichen Informationen notwendig. Verschiedene Ansätze wie Markoff-Zufallsfelder, Bayes-Netze oder auch die Evidenztheorie nach Dempster-Shafer finden hier ihre Anwendung. Als Ergebnis wird eine Wahrscheinlichkeit oder ein anderer Gradmesser für die Richtigkeit einer Hypothese geliefert. Für die Entscheidung, ob die Hypothese angenommen oder abgelehnt werden soll, muß das Ergebnis mit einem Schwellwert verglichen werden. Dieser Schwellwert richtet sich danach, ob bevorzugt alle möglichen Instanzen einer bestimmten Objektart gefunden werden sollen, oder ob nur die Instanzen gefunden werden sollen, die ganz sicher einer bestimmten Objektart angehören.

Die wissensbasierte Bildinterpretation hat im industriellen Bereich mit seinen definierbaren Umgebungsvariablen große Erfolge bei der Automatisierung von Erkennungsprozessen aufzuweisen. Die Erkennungsrate auf der Grundlage von digitalisierten Luftbildern dagegen ist wegen der hohen Komplexität der zu erkennenden Objekte und den nicht hinreichend genau definierbaren Aufnahmeumständen bislang zu niedrig, um für einen ernsthaften Einsatz vorgesehen werden zu können.

Ein Hauptproblem bei der automatischen Erkennung von Objektarten in der Topographie ist die große Bandbreite der möglichen Erscheinungsformen der einzelnen Objekte. Diese ist zum einen in der individuellen Anpassung der Objekte an die jeweilige Umgebung begründet, wird bei gleicher Ausprägung der Objekte aber zudem durch die Abbildungseigenschaften des Sensors verursacht. Das führt dazu, daß die verschiedenen Objektarten flexibel beschrieben werden müssen, um auf möglichst viele Erscheinungsformen der einzelnen Objektarten zu reagieren. Diese generische Modellierung bewirkt für einen Erkennungsalgorithmus eine kombinatorische Explosion des Suchraums.

Durch die Einführung konkreter Vorinformation kann der Suchraum allerdings stark eingegrenzt werden. Der schon bestehende Datensatz wird als Anfangsnäherung eingeführt, die den Interpretationsprozeß steuert und den Suchraum sowohl thematisch als auch geometrisch stark einschränkt.

### 3. ATKIS ALS ZU ÜBERPRÜFENDE WISSENSBASIS

Im folgenden soll die erste Erfassungsstufe des Digitalen Landschaftsmodells DLM 25 des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS) als Beispiel eines fortzuführenen Geodatenbestandes betrachtet werden. Das ATKIS DLM 25/1 ähnelt in Bezug auf Inhalt und geometrischer Genauigkeit einer herkömmlichen topographischen Karte im Maßstab 1 : 25 000.

#### 3.1 Die ATKIS-Datenstruktur

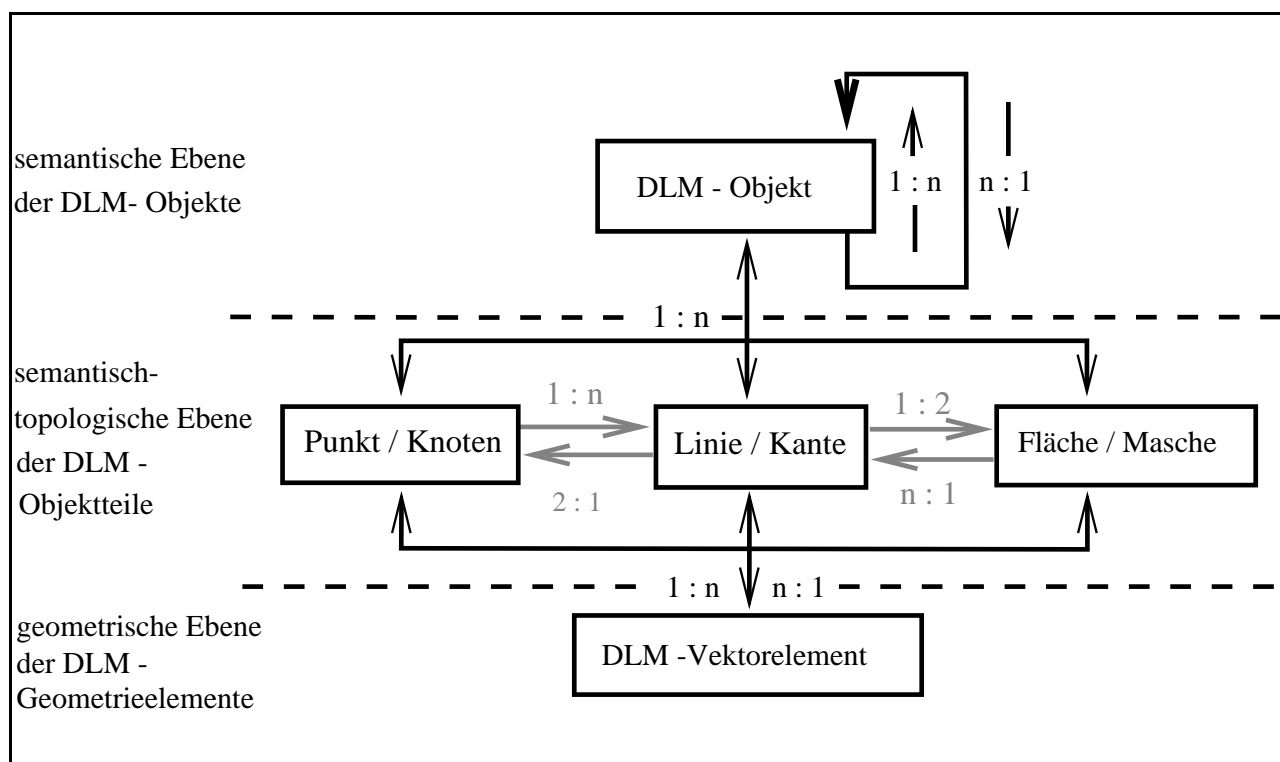


Abbildung 1: Struktur des ATKIS-Datenmodells ohne Rastermatrix (explizite topologische Beziehungen in grau).

Die Datenstruktur des ATKIS DLM 25/1 ist in Abbildung 1 zu finden. Die einzelnen Objekte sind hierarchisch aufgebaut. In der obersten Ebene ist die Bedeutung des Objekts abgelegt. Eine nähere Beschreibung wird durch global gültige Attribute gegeben. Ein Objekt kann sich aus mehreren Objektteilen zusammensetzen, die ebenfalls durch Attribute näher spezifiziert werden können. Außerdem tragen die Objektteile explizite topologische Informationen in Form von Über- und

Unterführungsreferenzen. Die Objektteile enthalten Vektorelemente, die die Träger der geometrischen Information sind. Durch die mehrfache Verwendung eines Vektorelementes für verschiedene Objektteile wird eine redundanzfreie Speicherung der Geometrie erreicht. Die einzelnen Hierarchieebenen sind über Referenzen miteinander verbunden. Damit liegt eine ungeordnete Anhäufung verschiedener Objekte vor, die in ihrer Gesamtheit die Landschaft beschreiben.

Zwischen den verschiedenen benachbarten Objekten und Objektteilen sind zwar explizite Referenzen vorgesehen (in Abbildung 1 grau dargestellt), diese werden aber nicht erfaßt. Die Referenzen können nur über den Bezug auf die gleichen oder benachbarten Vektorelemente hergestellt werden. Ebenso sind keine Referenzen zwischen den einzelnen Vektorelementen vorgegeben. Hier können die Referenzen aber über gleiche Anfangs- bzw. Endpunkte in der Geometrie hergestellt werden.

### 3.2 Ausbau der ATKIS-Datenstruktur zu einer Wissensbasis für die Erkennung von Straßen

Im weiteren wird insbesondere das Straßenverkehrsnetz im Vordergrund stehen. Das Straßenverkehrsnetz bildet ein Netzwerk, das die gesamte Szene in Maschen gliedert. Die übrigen Verkehrswege ergänzen dieses Netz, werden aber hier der Übersichtlichkeit wegen vernachlässigt. Die Maschen des Netzes fallen mit den Straßenblöcken zusammen. Sie können erst einmal für sich als abgeschlossene Einheiten betrachtet werden, auch wenn zwischen ihnen gewisse Wahrscheinlichkeiten in Bezug auf die jeweilige Nachbarschaft gegeben sind. So ist z. B. das Auftreten eines Waldes im Stadtkern relativ unwahrscheinlich.

Sobald im Bild das Straßennetz rekonstruiert ist, kann man sich das Bild längs der Straßen zerschnitten denken. Damit zerfällt das Bild der gesamten Szene in viele kleine Szenen, die wesentlich einfacher untersucht werden können als das Gesamtbild. Außerdem sollte das Straßennetz zuerst untersucht werden, weil durch die Wiederherstellung der Straßen auch der Rand der Straßenblöcke bestimmt ist. Straßen werden im ATKIS DLM 25/1 nämlich in der Regel über die Linie ihrer Mittelachse und eine Straßenbreite definiert. Gleichzeitig bildet diese Straßenmittelachse aber auch die Randbeschreibung der an die Straßen angrenzenden Objekte. Sollen die an die Straße grenzenden Objekten in ihrer tatsächlichen Ausdehnung beschrieben werden, müssen die Straßenflächen vorher abgezogen werden. Um die Straßen im Bild wiederherstellen zu können, werden die Vektorelemente, die zum Straßenverkehrsnetz gehören, neu organisiert. Benachbarte Vektorelemente werden über ihre Geometrie ermittelt und durch Referenzen verbunden. Anschließend werden Kreuzungen und Sackgassen ermittelt. Sackgassen sind Anfangs-/Endpunkte von Vektorelementen, von denen keine weitere Vektorelemente abgehen. Als Kreuzungen werden Anfangs-/Endpunkte von Vektorelementen definiert, die zu mehr als 2 Vektorelementen gehören. Alle Vektorelemente zwischen zwei Kreuzungen werden zu Polygonzügen, den Maschenseiten, zusammengefaßt. Die Maschenseiten werden dann zu Maschen zusammengesetzt. Jede Maschenseite ist Bestandteil von zwei Maschen.

In Abbildung 2 findet sich ein Beispiel für die Umstrukturierung. Links ist der Grundriß einiger Straßen zu sehen, die ihrer Gruppierung nach dargestellt werden. Rechts sind die zugehörigen Strukturen abgebildet. Oben (in grau) sind die Strukturen aus dem ATKIS DLM zu finden. Es existieren keinerlei topologische Referenzen. Jedes Objekt steht für sich. Unten (in schwarz) ist der neu geordnete Datenbestand dargestellt. Die topologischen Beziehungen (gestrichelt) sind hier hergestellt. Die verschiedenen Maschenseiten werden durch die Kreuzungen (als graue Punkte dargestellt) in ihrer Ausdehnung definiert und gleichzeitig verbunden.

Damit sind die den Straßen zugeordneten Vektorelementen nach topologischen Kriterien organisiert. Dieser Organisation liegt die Beobachtung zugrunde, daß sich das Aussehen eines Straßenzuges zwischen zwei Kreuzungen nur sehr selten ändert. Dies ist darauf zurückzuführen, daß sich innerhalb dieses Bereiches die Funktionalität kaum ändert. Ausnahmen bilden normalerweise nur Nutzungswechsel an den Rändern der Straße, wie z. B. beim Übergang vom Land in die Stadt.

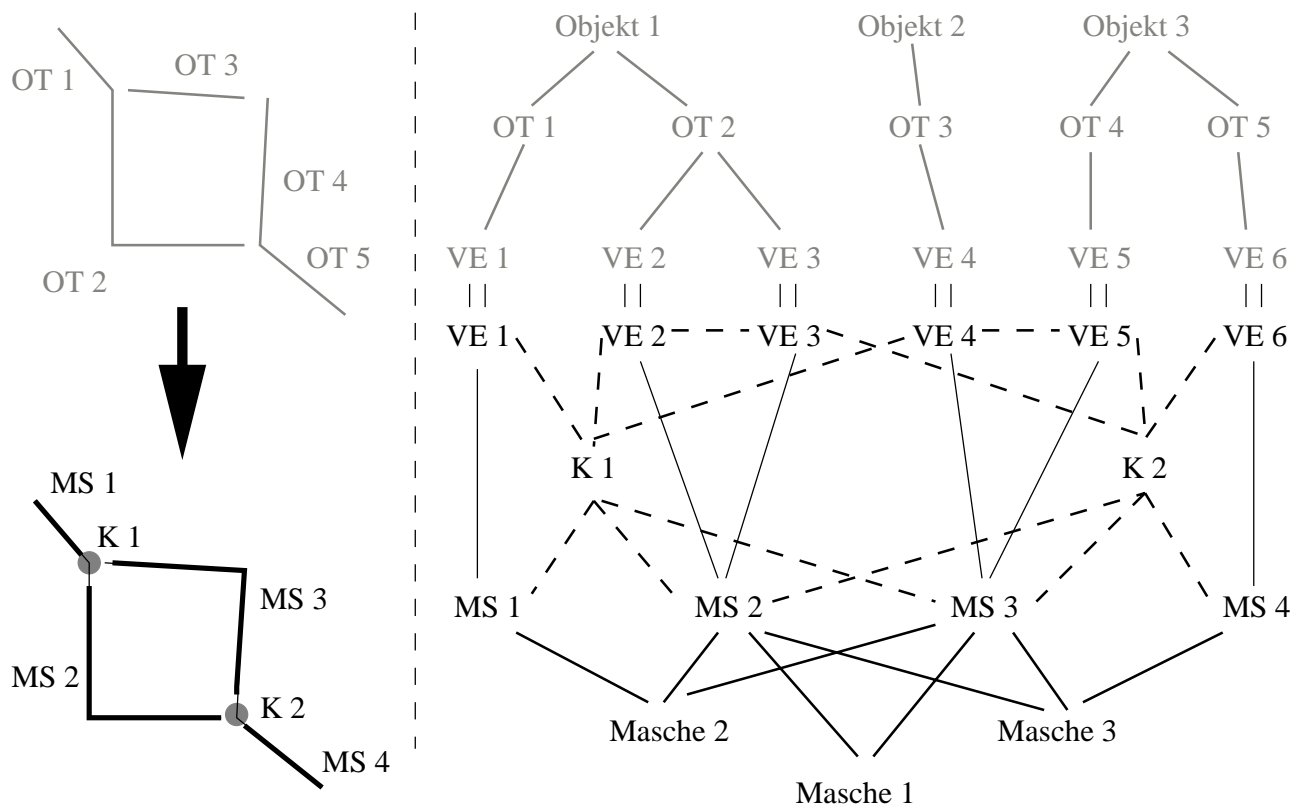


Abbildung 2: Neustrukturierung des DLM

grau: alter DLM-Datenbestand, schwarz: neue topologische Referenzen (gestrichelt) und Strukturen  
 OT: Objektteil, VE: Vektorelement, K: Kreuzung, MS: Maschenseite.

Über die Vektorelemente werden die den Straßen benachbarten Objekte ermittelt. Die Art der Nachbarschaft wirkt sich unmittelbar auf das Aussehen des Straßenrandes und damit der Straße aus. So wird ein direkt an der Straße beginnender Wald auf der dem Nadirpunkt zugewandten Straßenseite Verdeckungen hervorrufen. Das gleiche kann für ein Wohngebiet gelten, nur werden hier Bäume und Häuser vereinzelt in die Straße hineinragen. Die Südseiten der Straßen werden u. U. durch Schattenwurf gestört.

Durch die Ermittlung der verschiedenen Nachbarschaftsbeziehungen und ihrer Auswirkungen wird der Kontext für die Straße hergestellt. Dieser Kontext ermöglicht es, Abweichungen von einfachen Straßenmodellen zu erklären und ggf. komplexere Modelle vorzusehen.

Eine weitere Informationsquelle ergibt sich aus den Attributen, die den Objektteilen bzw. den Objekten angelagert sind. Im derzeitigen Datenbestand sind allerdings nur die Widmung und die Breite interessant. Aus dem Attribut Widmung kann eine Bedeutungsrangfolge abgeleitet werden, die sich im Aussehen der Straßen widerspiegelt. In Kreuzungen wird normalerweise die höher klassifizierte Straße ungestört weiterverlaufen, während die niedriger eingestufte Straße unterbrochen sein wird. Sie wird deshalb im Bild nicht ganz an ihren im DLM definierten End-/Anfangspunkt heranreichen. Die Bedeutung der Breite ergibt sich unmittelbar aus der geometrischen Beschreibung des Objekts.

Für jedes Straßenvektorelement werden verschiedene Methoden definiert, mit denen versucht wird, die Existenz der Straße im Bild nachzuweisen. Begonnen wird dabei mit sehr einfachen Modellen, die eine schnelle Entscheidung ermöglichen, und die bei einem Scheitern graduell verfeinert und komplexer werden, bis die Hypothese der Straßenexistenz angenommen oder abgelehnt werden kann.

Insgesamt wird die ATKIS-Datenstruktur durch diese Anreicherung mit Referenzen, Allgemeinwissen in Form von Modellen für Objekte bzw. Störungen und Methoden zu einer Wissensbasis für die Erkennung von Straßennetzen auf der Grundlage von *Frames* ausgebaut.

Entscheidend ist hier, daß nicht nur generisches Wissen verwendet wird, sondern mit den ATKIS DLM 25/1-Daten ein konkreter Datenbestand vorliegt, der eine hohe Gültigkeitswahrscheinlichkeit hat. Für jeden Bildausschnitt liegt a priori eine Hypothese vor, die gezielt mit speziellen Parametern untersucht werden kann. Langwierige Voruntersuchungen zu einer ersten Aufstellung von ungenauen Hypothesen entfallen. Aus diesem Grunde kann auch auf einen *scale space*-Ansatz verzichtet werden und direkt mit den hochauflösenden Daten gearbeitet werden.

### 3.3 Strategie der Bildinterpretation in Konsequenz der erweiterten ATKIS-Datenstruktur

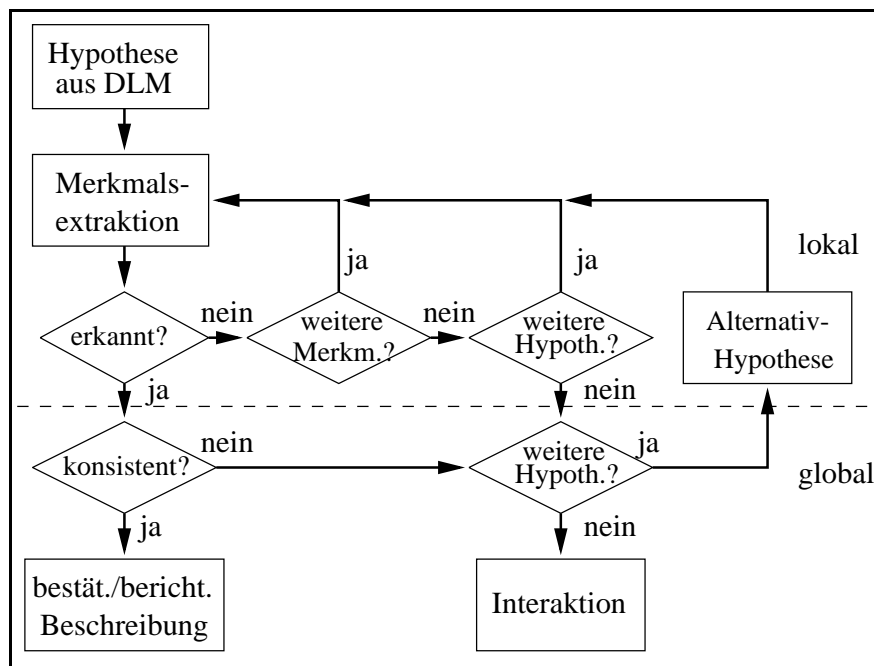


Abbildung 3: Fortführungsstrategie für die Bildinterpretation.

Der erste Schritt der Bildinterpretation besteht im Überprüfen des bestehenden Datenbestandes. Hier wird vorerst nur das Straßennetz untersucht. Da mit dem existierenden Datenbestand schon Hypothesen vorhanden sind, wird zuerst ein *top down*-Ansatz gewählt. Es wird versucht, aus dem vorliegenden Bildmaterial bestätigende Merkmale für die Vektorelemente des alten Datenbestandes abzuleiten. Die Merkmalsextraktion wird dabei von den Hypothesen geleitet. Wenn ein Merkmalsextraktor keine geeignete Bestätigung erbringt, wird der Ansatz mit einem anderen Extraktor wiederholt. Das Ergebnis ist ein Bestätigungsgrad für die Hypothese, daß durch die einzelnen Vektorelemente Straßenelemente dargestellt werden.

Sobald alle Vektorelemente, die zu einer Maschenseite gehören, dementsprechend untersucht sind, wird im Rahmen der Maschenseite das Ergebnis auf seine Konsistenz untersucht. Mit diesem Schritt werden die Ergebnisse der lokalen Merkmalsextraktion in einen globalen Kontext eingebunden. Neben der Überprüfung der Ergebnisse der Merkmalsextraktion können auf diese Art und Weise auch eventuell vorhandene Mehrdeutigkeiten aufgelöst werden.

Sind die Erkenntnisse aus den einzelnen Vektorelementen inkonsistent, wird *bottom up* eine neue, für den gesamten Bereich der Maschenseite konsistente Alternativhypothese erstellt. Dies geschieht auf der Grundlage der im vorherigen Schritt extrahierten Merkmale. Für diese Hypothese wird dann wieder *top-down* die Bestätigung wie oben beschrieben gesucht. Dieses Verfahren kann bei Bedarf so lange iteriert werden, bis eine Hypothese bestätigt wird oder keine weiteren Alternativhypothesen mehr zur Verfügung stehen. In diesem Fall ist eine Interaktion durch einen menschlichen Operator

unumgänglich. Diese Interaktion kann allerdings in eine Liste geschrieben werden und braucht dann erst nach der Beendigung der gesamten automatischen Interpretation durchgeführt werden.

Das Vorgehen in den Maschenseiten wiederholt sich nochmals bei den Kreuzungen, in denen die Konsistenz der einmündenden Maschenseiten überprüft wird.

Sind sämtliche Maschenseiten und Kreuzungen einer Masche auf diese Weise überprüft bzw. berichtigt worden, steht der Rand des Mascheninneren fest. Die im Inneren vorliegenden Objektarten können nun bestimmt werden. Dabei ist sowohl auf eine Änderung der Objektarten, als auch auf eine Änderung ihrer Ausdehnung und auf das Hinzukommen neuer Objektarten zu achten.

Durch die enge Bindung der Untersuchung an die erweiterte ATKIS-Datenstruktur reicht der hybride hierarchische Ansatz aus. Dies erweist sich vor allem bei einer benötigten Modellerweiterung als vorteilhaft, da die Auswirkungen der einzelnen Schritte klar von einander abgegrenzt werden können. Damit ist das System einer Analyse von Schwachstellen besser zugänglich als bei der Verwendung eines heterarchischen Ansatzes.

Die Integration der Interpretation innerhalb der Datenbasis hat den zusätzlichen Vorteil, daß das Ergebnis der Analyse gleich in die Strukturen eingebettet ist, in denen auch die Datenhaltung vorgenommen wird.

Eine Übersicht über die eingesetzten Hypothesen und Modelle ist der folgenden Tabelle zu entnehmen.

<b>Struktur</b>	<b>Anfangshypothese</b>	<b>Bildmodelle</b>	<b>Alternativhypothese</b>
<b>VE</b>	-Nutzung als Straße -Verlauf bekannt -Breite bekannt -Priorität bekannt -linke und rechte Nachbarschaft wie im DLM angegeben	-Polygonzug gerader Parallelen -homogene Fläche mit glattem Rand - "interne" Störungen (Auto, Markierung, Verkehrsinsel) -"externe" Störungen (Baum, Wald, Haus, Schatten, Einfahrt, Straße, Überführung)	-anderer Verlauf -andere Breite -Unterbrechung / Teilexistenz
<b>MS</b>	-Verlauf über aneinandergefügte Vektorelemente -glatte Übergänge -linke und rechte Nachbarschaft wie im DLM angegeben	-Verlauf über aneinandergefügte Polygonzüge -glatte Übergänge -"interne" Störungen (s. o.) an den Nahtstellen -"externe" Störungen an den Nahtstellen	-anderer Verlauf -Unterbrechung / Teilexistenz
<b>K</b>	-Schnittpunkt der vorgegebenen Maschenseiten -glatte Übergänge zwischen sich gegenüberliegenden Maschenseiten	-Schnittpunkt der vorgegebenen Polygonzüge -glatte Übergänge zwischen sich gegenüberliegenden Maschenseiten -ausgerundete Kurven -Verbreiterungen durch Abbiegespuren oder Verkehrsinseln	-andere Lage -Versetzungen -fehlende Äste -zusätzliche Äste
<b>M</b>	-Straßenzüge ermittelt -Randverlauf bestimmt -Nutzung wie im DLM angeben	-Flächentexturmodelle -Grenzen als Grauwertkanten	-andere Objektart -anderer Grenzverlauf -neue Grenzen / neue Objekte

Eine ausführlichere Erläuterung folgt im nächsten Kapitel.

## 4. ÜBERPRÜFEN UND BERICHTIGUNG DER BESTEHENDEN WISSENSBASIS

### 4.1 Objektmodelle für Straßen

Wie oben schon erläutert, wird das Straßennetz über seine Maschen modelliert. Die Maschenseiten zwischen den Kreuzungen bestehen aus Vektorelementen. Für diese Vektorelemente oder Straßenstücke sind zwei Modelle vorgesehen.

Das erste Modell sieht ein Straßenstück als Fläche, die von zwei parallelen Rändern begrenzt wird vor. Diese Ränder zeichnen sich im Bild als Grauwertsprünge ab. Für die Ränder sind bestimmte Unterbrechungen bzw. Umkehrungen der Gradientrichtungen im Grauwertbild zugelassen, wie sie sich im Orthophoto z. B. durch parkende Autos, Einfahrten oder Bäume ergeben können. Außerdem wird davon ausgegangen, daß die Straße die Funktion hat, zwei Orte miteinander zu verbinden. Dieses Modell ist eine einfache Erweiterung des ATKIS-Modells, das Straße als rechteckige Form über eine Mittelachse und eine Straßenbreite modelliert. Das Attribut Oberflächenmaterial, das eine Modellierung der Grauwerte des Rechtecks erlauben würde, ist zur Zeit noch nicht belegt.

Das zweite Modell betont weniger die Form als das im Luftbild normalerweise homogene Erscheinungsbild von Straßenstücken und ihre Verbindungsfunktion. Die Randform bleibt vorerst unberücksichtigt. Bei einer Bestätigung der Fläche als Straßenstück muß der Rand allerdings wieder durch geometrische Kurven approximiert werden, um im ATKIS-Datenbestand gespeichert werden zu können.

Die generischen Beschreibungen werden konkretisiert durch die im DLM zu den Vektorelementen vorliegenden Daten. Dies sind im einzelnen die Lage im Bild, ausgedrückt durch einen Anfangs-, Endpunkt und gegebenenfalls auch Zwischenpunkte, die zugehörige Breite, die Widmung und der Kontext in Form der semantischen Beschreibung der Nachbarflächen.

### 4.2 Merkmalsextraktion

Ein Versuch zur Bestätigung der vorhandenen Daten läuft zur Zeit in maximal drei Schritten ab.

Zuerst wird über die Lage ein Teilbild aus dem Orthophoto ausgeschnitten. Hier ist die erste Reduzierung des Suchraums zu sehen. Statt das gesamte Bild nach Merkmalen abzusuchen, erfolgt die Beschränkung auf ein kleines Gebiet, für das es eine hohe Trefferwahrscheinlichkeit gibt.

Mit einem speziellen Linienfinder, der auf dem Burns-Operator (Burns, 1986) basiert und die Verwertung der Vorinformation erlaubt, werden gerade Linien extrahiert, die grob in Richtung der hypothetischen Straßenachse verlaufen. Anschließend wird versucht, über eine Gruppierung möglichst lange Geraden zu erzeugen. Dazu werden Linien, die gegenseitig in ihrer Flucht liegen und bestimmte Abstandskriterien erfüllen, zusammengefaßt. Aus den vorliegenden Geraden werden bei der Einhaltung gewisser Seitenabstände und seitlicher Überlappung Rechtecke gebildet. Aus der Gesamtheit der Rechtecke und Geraden werden diejenigen ausgewählt, die bis in die Nähe der Anfangs- und Endpunkte des Vektorelementes reichen. Wenn das Vektorelement Zwischenpunkte enthält, werden die angeführten Schritte für jeden Abschnitt einzeln durchgeführt. Über die Rechtecke und Geraden werden Polygonzüge gebildet. Dabei wird bei der Existenz von Zwischenpunkten die Verbindbarkeit über Konsistenzkriterien wie Abstand und Breitenunterschiede geprüft. Die Gesamtheit der entstehenden Polygone wird als Menge der möglichen Straßenzüge im Teilbild betrachtet, die nun mit den vorliegenden Daten des Vektorelementes verglichen wird. In diesem Vergleich wird die Übereinstimmung von Verlauf und Breite geprüft und daraus ein Bestätigungsgrad abgeleitet.

Bei einem unzureichenden Bestätigungsgrad wird eine zweite Merkmalsextraktion auf der Grundlage des zweiten Modells aktiviert. Dazu werden im Bildausschnitt mit dem Burns-Operator Linien extrahiert. Zwischen diesen Linien werden jeweils die kürzesten Verbindungen bestimmt, die weder sich untereinander noch irgendwelche Linien schneiden. Die kürzesten Verbindungen und die Gesamtheit der Linien unterteilen das Bild in Segmente, für die Merkmale wie mittlerer Grauwert,



Varianz und Nachbarschaft berechnet werden. Bei hinreichend kleinen Grauwertdifferenzen können benachbarte Segmente zu größeren Segmenten zusammengefaßt werden. Dieser Vorgang wird iteriert, wobei Verschmelzungen in Richtung der Vektorelementachse bevorzugt werden. Nach Abschluß der Verschmelzung werden über die Segmente nach einem Beste-Wege-Algorithmus sich gegenseitig nicht überschneidende Wege mit minimalen Kosten ermittelt. Die Grauwertdifferenz zwischen den Segmenten ist dabei der kostenbestimmende Faktor. Die so ausgewählten besten Wege werden dann durch Polygonzüge approximiert, die als mögliche Straßenzüge im Bild angesehen werden. Auch hier wird wieder ein Bestätigungsgrad durch den Vergleich mit dem Vektorelement aus dem DLM ermittelt.

Ist der Bestätigungsgrad immer noch unzureichend, wird die Umgebung des hypothetischen Straßenstücks mit in die Analyse einbezogen. Dazu werden die möglichen Abweichungen vom einfachen Modell in Betracht gezogen. So bewirkt z. B. ein Wald, der wegen der Reliefversetzung eine Straßenseite verdeckt, einen gezackten Übergang zwischen Waldstück und Straße. Damit wird das Auffinden einer Randgeraden verhindert und der erste Extraktionsansatz scheitert. Das zweite Modell würde ebenfalls keine Bestätigung liefern, weil die Gesamtstraßenbreite im Teilbild zu gering erschiene. Durch die Umgebungsanalyse können solche Effekte umgangen werden, indem die Hypothese angepaßt und mit der angepaßten Hypothese die Bestätigungsschritte wiederholt werden. Dabei wird davon ausgegangen, daß die Angaben zu den benachbarten Objektarten im DLM korrekt sind.

### 4.3 Konsistenzanalyse

Bei der Betrachtung eines lokalen Gebietes, wie es bei der Ausdehnung eines Vektorelementes normalerweise vorliegt, können zwei Arten von Problemen auftreten. Das erste Problem besteht darin, daß in dem lokalen Gebiet mit den zur Verfügung stehenden Operatoren nicht genügend Merkmale gefunden werden können. Eine Teillösung besteht in der Verwendung verschiedener Extraktoren. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Analyse des Kontexts. So können z. B. kurze Vektorelemente auch bei einem schlechten Bestätigungsgrad aus sich heraus trotzdem als bestätigt angesehen werden, wenn die beiden benachbarten Vektorelemente zueinander und mit den Merkmalen des Zwischenvektorelements konsistent sind.

Das zweite Problem besteht darin, daß die Merkmalsextraktion u. U. mehrdeutige Ergebnisse liefert. Auch hier ermöglicht wiederum die Konsistenzbetrachtung zwischen den Vektorelementen die Auswahl der erfolgsversprechenderen hypothetischen Straßenstücke.

#### 4.3.1 Maschenseiten

Sind für die Vektorelemente innerhalb einer Maschenseite die Bestätigungsgrade ermittelt worden, werden zwischen den bestätigten Vektorelementen die Übergänge auf Konsistenz überprüft. Dazu wird untersucht, ob die Übergänge zwischen den Straßenbeschreibungen hinreichend glatt verlaufen. Ist das nicht der Fall, wird zuerst untersucht, ob diese Nichtkonsistenz auf erklärbare Störungen zurückzuführen ist. So kann bei dem einen Straßenstück die Hälfte der Fahrbahn durch einen angrenzenden Wald verdeckt sein, während beim Nachbarlement die gesamte Fahrbahnfläche sichtbar ist, weil kein Wald angrenzt.

Kann keine Erklärung für die Inkonsistenz gefunden werden, so wird versucht, aus den vorliegenden Merkmalen eine neue Hypothese abzuleiten. Das gleiche wird auch versucht, falls die Maschenseite nichtbestätigte Vektorelemente enthält. Liegen solche Vektorelemente zwischen zwei bestätigten Vektorelementen, werden aus den bestätigten Vektorelementen Konsistenzbedingungen formuliert, die den Suchraum für Alternativhypothesen im unbestätigten Vektorelement einschränken. Das gleiche geschieht auch für Vektorelemente, die an einen bestätigten Nachbarn angrenzen. Nichtbestätigte

Vektorelemente ohne bestätigten Nachbarn werden erst dann bearbeitet, wenn es für das Nachbarelement eine Alternativhypothese gibt.

So werden für sämtliche inkonsistente oder nichtbestätigte Vektorelemente nach und nach Alternativhypothesen auf der Grundlage der bisher bestimmten Merkmale aufgestellt, die konsistent in ihre Umgebung eingebettet sind. Mögliche Alternativhypothesen bestehen in einer Veränderung der Lage oder in der Veränderung von Attributen.

Aufgrund dieser Alternativhypothesen wird noch einmal mit entsprechend angepaßten Prozeduren die Merkmalsextraktion, Gruppierung und Bewertung wiederholt. U. U. wird der gesamte Prozeß mehrfach mit verschiedenen Alternativhypothesen durchlaufen.

Das Ergebnis ist eine bestätigte Alternativhypothese oder die Aussage, daß auf dem vorliegenden Bildmaterial weder der vorhandene Datensatz bestätigt noch eine bestätigbare Alternativhypothese aufgezeigt werden kann.

### 4.3.2 Kreuzungen

Sobald alle Maschenseiten untersucht worden sind, die eine Kreuzung bilden, wird für die Kreuzung ebenfalls eine Konsistenzüberprüfung durchgeführt. Auch hier müssen bei den sich einander gegenüberliegenden Maschenseiten gewisse Glattheitskriterien eingehalten werden. Außerdem sollte der Schnittpunkt der Straßen sich am vorgegebenen Ort befinden. Anderenfalls sind verschiedene Alternativhypothesen vorgesehen, die dann im einzelnen untersucht werden. Dazu gehören vor allem das Abrunden der Kurven und die Existenz von Abbiegespuren und Verkehrsinseln.

### 4.3.3 Maschen

Nach der Bearbeitung sämtlicher zu einer Masche gehörenden Kreuzungen und Maschenseiten muß die Masche selbst untersucht werden. Weisen sämtliche Kreuzungen und Maschenseiten einen ausreichenden Bestätigungsgrad auf, ist der Rand des Straßenblocks bekannt. Anderenfalls muß geprüft werden, ob sich der Kontext bei nicht bestätigten Straßenabschnitten in Form der angrenzenden Objektart im Laufe der weiteren Interpretationsschritte verändert. Dann kann u. U. eine neue Alternativhypothese für den Straßenverlauf aufgestellt werden.

Die bisherigen Objekte innerhalb der Maschen können ebenfalls dem Datensatz entnommen werden. Für diese Objekte, die vor allem flächenförmig sind, sind Bestätigungen durchzuführen. Dafür kann über Kantenextraktoren untersucht werden, ob sich der Grenzverlauf zwischen den verschiedenen Objekten geändert hat. Außerdem wird über die Textur versucht, die Objektart der einzelnen Objekte zu bestätigen oder zu berichtigen. Dabei werden möglicherweise auch neue Straßen gefunden, die in das bisherige Netz zu integrieren sind.

## 4.4 Interaktiver Eingriff

Bislang ist davon ausgegangen worden, daß durch die vielfältigen Modelle und Alternativhypothesen eine automatische Erkennung der Objekte möglich ist. Es wird allerdings immer Fälle geben, in denen das System versagt, weil keine angemessene Alternativhypothese vorgesehen ist. Für diesen Fall muß ein menschlicher Operateur eine interaktive Eingreifmöglichkeit haben, mit der er nacheinander alle in Frage kommenden Vektorelemente abarbeiten kann.

Die Notwendigkeit dieses Eingriffs schmälert allerdings nicht den Wert einer Automatisierung. Es ist nämlich nicht erforderlich, die Interaktion direkt auszuführen, nachdem das System ein Objekt nicht erkannt hat bzw. eine Berichtigung nicht durchführen konnte. Vielmehr können diese Objekte vorläufig in eine Liste gespeichert werden. Nach Abschluß der automatischen Erkennung liegen als Endergebnis dieses iterativ und hierarchisch arbeitenden Verfahrens für alle Elemente des DLM Bestätigungsgrade vor. Diese erlauben eine Aussage darüber, wo der bisherige Datenbestand durch das

Bildmaterial bestätigt wird und wo nicht. Für die nichtbestätigten Objekte wurden unter der Annahme, daß sich hier Veränderungen in der Örtlichkeit gegenüber dem alten Datenbestand ergeben haben, Alternativhypothesen entwickelt.

Ein Operateur muß nun nicht mehr den gesamten Datenbestand durchgehen, sondern er kann sich auf die Problemfälle konzentrieren. Je nach Ausgereiftheit des Systems kann er sich dabei nur die Elemente anzeigen lassen, für die das System keine Aussage treffen konnte, oder er läßt sich auch die geänderten Objekte anzeigen. Er kann sich aber auch einen willkürlichen Bestätigungsgrad eingeben, und alle Elemente untersuchen, die einen schlechteren Wert haben. Dabei können dem Operateur zielgerichtet die Gesamtheit der benötigten Informationen zu diesen Objekten am Bildschirm angezeigt werden.

In diesem Zusammenhang ist zu bedenken, daß eine vollständige Automatisierung der Fortführung aufgrund von Orthophotos ohnehin nicht möglich ist, weil ein großer Teil der im DLM gespeicherten Information im Orthophoto nicht abgebildet wird und damit auch nicht erkennbar ist. Dazu gehören z. B. die Grenzverläufe, Straßenbezeichnungen oder Festpunkte.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die Vorteile des vorgestellten wissenbasierten Systems zur automatischen Fortführung eines Geodatenbestandes, namentlich ATKIS DLM 25/1, beruhen auf seiner engen Anlehnung an diesen umfangreichen Datenbestand, der die reale Welt modelliert.

Die damit vorhandene konkrete Information über die Objekte der realen Welt, die eine hohe Gültigkeitswahrscheinlichkeit hat, ermöglicht eine wesentliche Einschränkung des Suchraums für die Objekterkennung sowohl in semantischer als auch in geometrischer Hinsicht.

Damit wird gewährleistet, daß durch das Teile-und-Herrsche-Prinzip auch hochaufgelöste Luftbilder untersucht werden können, deren Bearbeitung sonst aus Zeit und Speicherplatzgründen kaum durchführbar wäre. Das vorliegende System wählt Bildausschnitte in Übereinstimmung mit dem alten Datenbestand und ermöglicht dadurch eine optimale Aufteilung des Gesamtbildes. Ein Zerschneiden von Objekten, das die Erkennung erschwert, weil wesentliche Teile des Objektes fehlen, wird dadurch weitestgehend verhindert. Ausgedehnte Objekte werden zunächst lokal untersucht, um dann die Teile im ihrem Kontext weiter zu verarbeiten. Dabei ist hier unter Kontext sowohl der Objektzusammenhang in sich als auch die Einwirkung anderer Objekte auf das untersuchte Objekt zu verstehen.

Durch die Vorgabe der hierarchischen Struktur sind die einzelnen Interpretationsschritte in ihrer Ursache und Wirkung deutlich voneinander trennbar. Diese Überschaubarkeit des Interpretationsprozesses erlaubt eine gezielte Verbesserung und Erweiterung der eingesetzten Methoden und Modelle.

Durch die enge Anlehnung an den bestehenden Datenbestand und seinen Strukturen wird nicht nur die Interpretation erleichtert. Darüber hinaus liegen die gefundenen Ergebnisse in einer Form vor, die eine Integration in den alten Datenbestand erleichtert. Die Rückspeicherung der neu gefundenen Erkenntnisse ist eine wesentliche Voraussetzung dafür, daß das System überhaupt für die Fortführung eingesetzt werden kann.

Das beschriebene System ist in seinen Grundzügen implementiert. Dazu gehören eine Schnittstelle zur Einheitlichen Datenbankschnittstelle (EDBS), die Umstrukturierung der DLM-Daten nach topologischen Gesichtspunkten, die Steuerstruktur, verschiedene Methoden zur Merkmalsextraktion und Überprüfung der Konsistenzbedingungen, sowie die Aufstellung von Alternativhypothesen. Außerdem existiert ein Modul, mit dem die Daten der verschiedenen DLM-Objekte angezeigt werden und sowohl einer gescannten Karte als auch einem Orthophoto überlagert werden können. Die bisher implementierten Methoden beziehen sich ausschließlich auf das Straßennetz. Derzeit wird daran gearbeitet, weitere Alternativhypothesen in das System einzubinden. Dabei soll zunehmend auch mehr Allgemeinwissen in Form der Planungsunterlagen für Straßen einfließen. De Gunst (1996) hat durch

die Verwendung dieses Wissens erhebliche Vorteile erzielt. Mit dieser verfeinerten Modellierung soll der Erkennungsgrad der Straßen sukzessiv verbessert werden.

## 6. LITERATUR

- Burns, J. B., A. R. Hanson und E. M. Riseman (1986): Extracting Straight Lines. T-PAMI, Bd. 8., Nr. 4, pp. 425-455.
- Gunst, M. de (1996): Knowledge-based Interpretation of Aerial Images for Updating of Road Maps. Dissertation, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, New Series, Nr. 44, Delft.
- Haralick, R. M. und L. G. Shapiro (1993): Computer and Robot Vision. Bd. 2, Addison-Wesley, Reading.