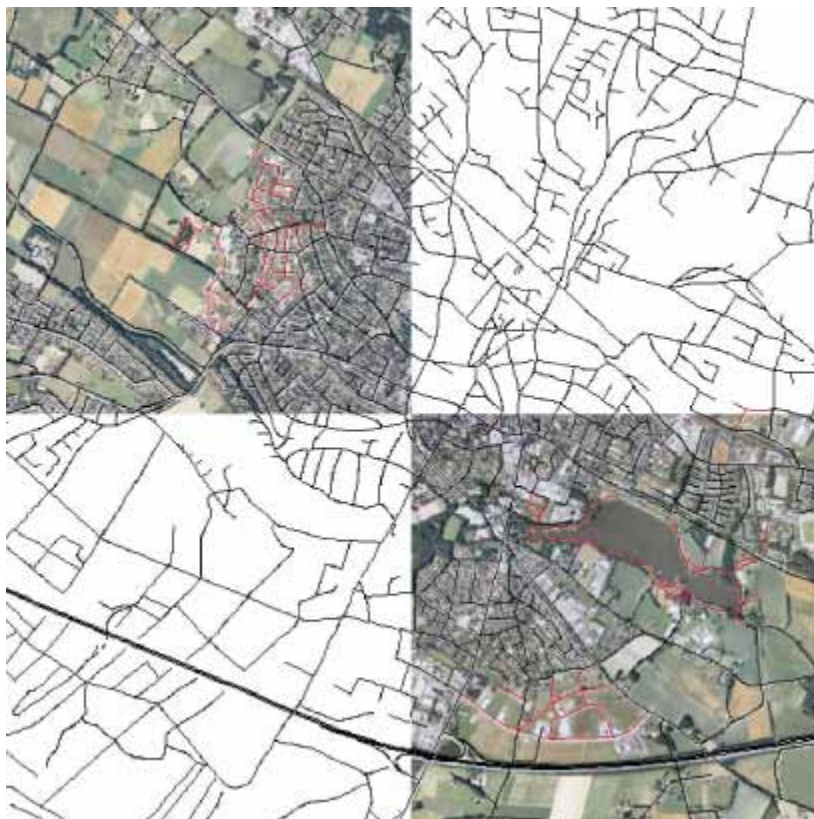




Diplomarbeit

**Automatische Verifikation und Fortführung von
ATKIS-Straßendaten mit Hilfe von Fernerkundungsdaten**



Marcel Ziems

Oktober 2003

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Diplomarbeit selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln angefertigt zu haben.

Marcel Ziems

Hannover, den 07.10.2003



Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Einführung in das Thema	1
1.2. Zielsetzung der Arbeit	2
2. Qualitätskontrolle von Geo-Daten	4
2.1. Definition von Qualität.....	4
2.2. Die Bewertung von Qualität	5
2.3. Die automatische Qualitätskontrolle digitaler Geo-Daten.....	6
2.4. Verifikation der Geo-Daten.....	6
2.5. Vervollständigung der Geo-Daten.....	7
3. Verschiedene Ansätze der automatischen Qualitätskontrolle	8
3.1. Die Strategie der Literaturrecherche	8
3.2. Ansatz zur automatischen Aktualisierung nach [SUI ET AL. 2002].....	10
3.2.1. Extraktion unter Verwendung eines bestehenden GIS.....	10
3.2.2. Ansatz zur Verifikation in niedrig auflösenden Orthofotos	10
3.2.3. Ansatz zur Verifikation für hochauflösende Orthofotos.....	11
3.2.4. Vervollständigung eines bereits bestehenden GIS.....	13
3.2.5. Fazit dieses Ansatzes	13
3.3. Der Ansatz zur automatischen Straßenextraktion nach [BORDES ET AL. 1997]	14
3.3.1. Die Ausgangsdaten des Systems zur Straßenextraktion	14
3.3.2. Der Grundgedanke des Ansatzes	14
3.3.3. Die Generierung der Straßenhypothesen.....	16
3.3.4. Die hypothesengesteuerte Straßenextraktion	18
3.3.5. Rekonstruktion des Straßennetzwerkes	20
3.3.6. Was bringt der Ansatz in der Praxis	20
3.3.7. Zusammenfassung der Strategien dieses Ansatzes	21
3.4. Aktualisierung des norwegischen Hauptkartenwerkes durch [SOLBERG 1992].....	21
3.4.1. Allgemeiner Systemüberblick	22
3.4.2. Verifikation des bestehenden Datensatzes	23
3.4.3. Detektieren neuer Straßen	24
3.4.4. Diskussion des Ansatzes und der Ergebnisse.....	25
3.5. Automatische Änderungsdetektion nach [WALTER 2000]	25
3.5.1. Die Klassifizierung mit Hilfe von ATKIS-Daten	26



3.5.2. Die Nutzung verschiedener Bilddaten	26
3.5.3. Aufdecken von Veränderungen mit Hilfe von ATKIS-Daten	27
3.5.4. Diskussion des Ansatzes.....	27
3.6. Die Verbesserung kartografischer Straßendatenbanken nach [ZHANG UND BALTSAVIAS 2002]	28
3.6.1. Die Strategie des entwickelten Ansatzes	28
3.6.2. Die verwendeten Module für die Extraktion der Straßen	29
3.6.3. Die Kombination verschiedener Extraktionsergebnisse	30
3.6.4. Resultate des Systems.....	31
3.7. Das System zur automatischen Qualitätskontrolle nach [WILLRICH 2002].....	32
3.7.1. Die einzelnen Systemkomponenten und ihre Funktion	33
3.7.2. Der Aufbau der Qualitätskontrolle für ATKIS-Daten	34
3.7.3. Der Prozess der automatischen Qualitätskontrolle.....	36
3.7.4. Die Bewertung der vorliegenden Straßen	40
3.7.5. Resultate und Diskussion des Ansatzes	40
3.8. Zusammenfassung der behandelten Ansätze und das Fazit für diese Arbeit.....	41
4. Zweistufige topologiegestützte Verifikation des ATKIS-Straßennetzes	45
4.1. Nachteile des bereits entwickelten Systems	45
4.2. Der zweistufige Untersuchungsansatz.....	46
4.3. Nutzung der Topologie aus dem globalen Kontext	47
4.4. Topologiegestützte Verifikation von Straßen.....	48
4.4.1. Definition der Extraktionsparameter für Phase 1 und Phase 2.....	50
4.4.2. Sensitivitätsanalyse der generierten Parametersätze	51
4.4.3. Auswahl der Objekte für die weitere Untersuchung.....	54
4.4.4. Zweite Untersuchung ausgewählter Objekte.....	56
4.5. Strategie zur Untersuchung der Ergebnisse des neuen Ansatzes	58
4.6. Untersuchung der Ergebnisse.....	59
4.6.1. Vergleich des topologiegestützten Systems mit dem bisherigen System.....	59
4.6.2. Analyse der False-Positives	61
4.6.3. Analyse der False-Negatives.....	71
4.6.4. Analyse der True-Positives.....	73
4.6.5. Analyse der True-Negatives	74
4.6.6. Diskussion der Ergebnisse	75
4.7. Zusammenfassung	77
5. Vervollständigung des ATKIS-Straßennetzes.....	79
5.1. Ansätze bereits entwickelter Systeme	79



5.2. Kategorisierung von fehlenden Straßen.....	80
5.2.1. Strategie zur Kategorisierung	81
5.2.2. Auswertung und Zuordnung	81
5.3. Lücken im bestehenden Netz infolge fehlerhafter Digitalisierung.....	82
5.3.1. Untersuchung fehlender Verknüpfungen	82
5.3.2. Lücken infolge fehlender Straßenabschnitte	85
5.4. Neubaugebiete als Lücken im Basis-DLM	89
5.4.1. Nutzen von Bauentwurfsdaten	91
5.4.2. Verifikation von Bauentwurfsdaten	92
5.4.3. Untersuchung des Verifikationsansatzes für Bauentwurfsdaten.....	93
5.5. Zusammenfassung	99
6. Zusammenfassung und Ausblick	101
6.1. Zusammenfassung	101
6.2. Ausblick.....	102
Literaturverzeichnis	104
Abbildungsverzeichnis	108
Tabellenverzeichnis	112
Anhang A	113
A.1. : Parametersätze zur Steuerung der Extraktionssoftware	113
A.1.1. Parametersätze des zweistufigen topologiegestützten Systems	113
A.1.2. Parametersätze für ein dicht bebautes Neubaugebiet	114
A.1.3. Parametersätze für ein offenes Neubaugebiet.....	115



1. Einleitung

1.1. Einführung in das Thema

Die Bedeutung von Geoinformationssystemen (GIS) steigt stetig. Für die Organisation komplexer Prozesse in unserer Gesellschaft werden hochwertige Produkte erwartet, die vielfach aus Geoinformationssystemen abgeleitet werden. Die daraus resultierende Notwendigkeit der Datenbeschaffung, sowie der Aktualisierung vorhandener GIS-Daten, treibt die Forschung auf diesem Gebiet ständig voran. Folglich wird vielfach daran gearbeitet, hoch entwickelte Infrastrukturen, die ständigen Veränderungen unterworfen sind, möglichst zeitnah in zugänglichen Geoinformationssystemen abzubilden. Die Qualität der Eingangsdaten hat dabei Einfluss auf die Qualität des Geoinformationssystems und letztendlich auch auf die daraus abgeleiteten Produkte.

Einer der wichtigsten Aspekte der Infrastruktur ist das Straßennetz. Es stellt die räumliche Verknüpfung aller Komponenten des öffentlichen Lebens dar. Die Art dieser Verknüpfungen hat direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Wirtschaft eines Landes. Dabei wird das Straßennetz ständig neu optimiert und an die aktuellen Bedürfnisse angepasst. Folglich ist es nicht nur der wichtigste Teil der Infrastruktur, sondern auch die veränderlichste Komponente. Vor allem die steigende Nachfrage nach Autonavigationssystemen erfordert eine immer aktuellere Verfügbarkeit der entsprechenden Datenbanken. Eine manuelle Aktualisierung ist sehr teuer und nicht in dem angestrebten Zeitrahmen realisierbar. Somit wird der Einsatz automatisierter beziehungsweise teilautomatisierter Verfahren wünschenswert.

Für die Aktualisierung und die Qualitätskontrolle, der den Geoinformationssystemen hinterlegten Geo-Datenbanken, eignen sich im Besonderen Fernerkundungsdaten. Diese können großflächig, zeitnah und kostengünstig bereitgestellt werden. Die digitale Photogrammetrie hält automatische Bildanalyseverfahren bereit, um digitale Luft- und Satellitenbilder als aktuelle Referenzdaten nutzen zu können. Zudem begünstigt der Einsatz digitaler Ausgangsdaten den automatischen Datenfluss und ermöglicht so die weitreichende Automatisierung des Aktualisierungsprozesses.



Thema der Arbeit ist die automatische Verifikation und Fortführung von ATKIS-Straßendaten mit Hilfe von Fernerkundungsdaten. Der automatische Verifikationsprozess wird durch einen Vergleich zwischen automatisch extrahierten Geometrien und bestehenden Vektordaten realisiert. Folglich ist die Steuerung des Extraktionsprozesses ein wichtiger Teil bei der Entwicklung leistungsfähiger automatischer Systeme. Der Einsatz von umfangreichen Vorwissen ermöglicht eine effiziente Steuerung. Brauchbares Vorwissen kann aus den Geo-Daten des zu bearbeitenden Geoinformationssystems abgeleitet werden, obwohl dieses als unsicher oder unvollständig angesehen werden muss. Zusätzlich kann Vorwissen aus allgemeinen Gesetzmäßigkeiten des Straßennetzes abgeleitet werden. Dabei wird die Tatsache betrachtet, dass die Geometrie einer Straße in einem globalen Zusammenhang zu anderen Objekten steht. So können Nachbarschaftsbeziehungen zu Straßen und anderen bekannten Objekten genutzt werden, um den Gesamtprozess der automatischen Qualitätskontrolle von Geo-Datenbanken zu steuern. Die Untersuchung der daraus entstehenden Vorteile für die automatische Qualitätskontrolle ist ein besonderer Schwerpunkt dieser Arbeit. Um dem Fortführungsbedarf eines Geoinformationssystems gerecht zu werden, sollen fehlende Objekte aus Bilddaten extrahiert werden. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Kategorisierung dieser fehlenden Objekte und die Entwicklung brauchbarer Ansätze zu deren Detektion. Deshalb sollen Möglichkeiten zur Nutzung von zusätzlichen Informationsquellen untersucht werden.

1.2. Zielsetzung der Arbeit

Ziel der Arbeit ist die Verbesserung des automatischen Bildanalyseprozesses für Verifikation und Fortführung. Dies soll durch den Einsatz von vielfältigem Vorwissen realisiert werden. Dazu sollen einzelne Wege durchleuchtet und andere neu erarbeitet werden. Die daraus entstehenden Möglichkeiten der Extraktion von Straßen in digitalen Orthofotos sollen aufgezeigt werden. Eingehende Untersuchungen sollen das Potential hervorheben, welches in der Verwendung zusätzlicher Informationsquellen liegt.

Im 2. Kapitel dieser Arbeit erfolgt eine allgemeine Beschreibung der Qualitätskontrolle von Geo-Daten. Zunächst wird der Qualitätsbegriff definiert und Qualitätsmerkmale abgegrenzt. Danach werden allgemeingültige Standards der Qualitätskontrolle aufgezeigt. Auf Grund unterschiedlicher



Möglichkeiten bei der Verwendung von Vorwissen werden die Begriffe Verifikation und Fortführung differenziert definiert.

Im 3. Kapitel werden verschiedene automatische oder teilautomatische Verfahren der Qualitätskontrolle vorgestellt. Alle vorgestellten Verfahren nutzen Vorwissen für die Steuerung der automatischen Komponenten. Dabei soll das verwendete Vorwissen genau betrachtet und die Art und Weise der Anwendung durchleuchtet werden. Ein direkter Vergleich der einzelnen Verfahren soll die jeweiligen Vorteile hervorheben.

Im 4. Kapitel wird die Weiterentwicklung eines der zuvor beleuchteten Systeme zur Verifikation von Straßendaten eingehend untersucht und mit dem Vorgängersystem verglichen. In diesem neuen Ansatz wird das Wissen über die Topologie des Straßennetzes zur Steuerung des automatischen Prozesses der Bildanalyse eingesetzt. Die Resultate des derart verbesserten Systems werden ausführlich untersucht. Abschließend werden an hand einer vergleichenden Fehleranalyse die neuen Stärken des Systems aber auch die Grenzen des neuen Ansatzes aufgezeigt.

Im 5. Kapitel werden theoretische Überlegungen präsentiert, wie ein System zur Vervollständigung des ATKIS Basis-DLM weiterentwickelt werden kann. Dabei werden Möglichkeiten für eine erweiterte Verwendung von Vorwissen aufgezeigt.

Im 6. Kapitel werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und ein Ausblick auf kommende Aufgaben gegeben. Aus der Literaturrecherche und den Ergebnissen dieser Arbeit wird aktuelle Stand bei der Übertragung menschlicher Bildbetrachtung auf automatische Bildanalyseverfahren beleuchtet.



2. Qualitätskontrolle von Geo-Daten

In dieser Arbeit werden Wege zur Verbesserung der Qualitätskontrolle von Geo-Daten vorgestellt. Es folgt ein allgemeiner Überblick über die Qualitätskontrolle, wobei erst im 3. Kapitel auf die möglichen Wege zu eben diesen Verbesserungen eingegangen wird. Dabei werden Verfahren vorgestellt, die sich zwar grundsätzlich unterscheiden aber einen einheitlichen Qualitätsbegriff erfordern. Zunächst soll der Qualitätsbegriff definiert werden. Im Anschluss wird auf die Unterschiede zwischen der Verifikation und der Vervollständigung von Geo-Daten eingegangen, welche im 4. und 5. Kapitel gesondert bearbeitet werden.

2.1. Definition von Qualität

Für die Kombination verschiedener Datensätze unterschiedlicher Herkunft oder für die Vergleichbarkeit von Analysen aus verschiedenen Datensätzen ist die Frage nach der Qualität der Daten von entscheidender Bedeutung. Eine allgemeine Aussage über die Qualität digitaler Geo-Daten in einer Geo-Datenbank erfordert allgemeine Standards und somit eine genaue Definition der Qualität. Für solche und andere Standardisierungen wurde von der International Standardization Organisation ein Technisches Komitee (Technical Committee) ISO/TC 211 gegründet, welches sich mit geografischen Daten befasst. Dabei wurden in der **ISO-Norm 19113** Qualitätsmerkmale definiert, welche im Anschluss aufgezählt und genauer erläutert werden. Diese Qualitätsmerkmale bilden den Rahmen für ein allgemein gültiges Qualitätsmodell, auf welches sich zum Beispiel auch [CASPARY 1992], [ENGLISCH UND HEIPKE 1998] beziehen. Das **Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)** richtet sich ebenfalls nach der ISO-Norm 19113.

- Die **Vollständigkeit** der Geo-Daten unterteilt sich in die Vollständigkeit der Objekte, der Attribute und der Gebietsabdeckung. Die Vollständigkeit der Objekte beschreibt die fehlenden oder überschüssigen Objekte im Vergleich zur Realität. Die Vollständigkeit der Attribute gibt Auskunft über fehlende oder überschüssige Attribute im Vergleich zum



Objektkartenkatalog. Die Vollständigkeit der Gebietsabdeckung stellt Lücken oder Überschüsse in der flächenhaften Abdeckung des zu beschreibenden Gebietes dar.

- Die **logische Konsistenz** der Daten gegenüber dem Datenmodell beschreibt, in wie weit die logischen Regeln des Datenmodells eingehalten werden. Diese beinhaltet die konzeptionelle Konsistenz, welche die Befolgung der Regeln des konzeptionellen Schemas bewertet. Die Wertebereichs- und Formatkonsistenz bewertet, in wie weit die Werte den mathematischen und physikalischen Vorgaben entsprechen. Die topologische Konsistenz überwacht die Plausibilität der topologischen Zusammenhänge der Daten.
- Die **Lagegenauigkeit** der Geo-Objekte unterteilt sich erstens in die absolute oder äußere Genauigkeit der Geo-Objekte im Vergleich zu der geometrischen Lage der Objekte in der Realität, zweitens in die relative oder innere Genauigkeit der Geo-Objekte und drittens in die Genauigkeit des Netzes.
- Die **zeitliche Genauigkeit** bewertet die Genauigkeit von Zeitangaben, deren zeitliche Konsistenz und ihre zeitliche Gültigkeit.
- Die **thematische Genauigkeit** beschreibt die Genauigkeit quantitativer Attribute, die Richtigkeit von nicht quantitativen Attributen und die Richtigkeit der Zuordnung von Objekten und ihren Attributen in Klassen.

2.2. Die Bewertung von Qualität

Für die Standardisierung des Bewertungsprozesses nach den oben definierten Qualitätskriterien erarbeitete das technische Komitee ISO/TC 211 weitere Normen, die in [Joos 2003] beschrieben werden. In der **ISO 19114** wird der Qualitätsbewertungsprozess definiert. Darin wird ein allgemeines Vorgehen beschrieben, bei dem zunächst die Anforderungen an das Endprodukt zu Grunde gelegt werden. Dieses wird in der **ISO 19131** genauer definiert. Im zweiten Schritt werden die Qualitätsmerkmale, welche in der oben beschriebenen **ISO 19113** aufgeführt sind, identifiziert und verwendet. Ist dies geschehen, wird als dritter Schritt die Qualitätsmessung der Daten nach den Qualitätsmaßen, welche in der **ISO 19138** standardisiert sind, vorgeschrieben. Nachdem die Bewertungsmethode ausgewählt wurde, soll die Qualität bestimmt



werden. Das Resultat ist ein quantitatives Ergebnis oder, wenn die Übereinstimmung mit anderen Daten kontrolliert wurde, eine richtig / falsch Entscheidung. Dieses Resultat enthält Daten über die bewerteten Daten, sogenannte Metadaten. Die Metadaten werden im letzten Schritt des Qualitätsbewertungsprozesses erzeugt und sind in der **ISO 19115** definiert. Damit wird ein allgemeiner Rahmen für die Bewertung von Geo-Daten gegeben und somit eine Beurteilung bezüglich der Eignung dieser Daten ermöglicht.

2.3. Die automatische Qualitätskontrolle digitaler Geo-Daten

Da eine Qualitätskontrolle von Geo-Daten nach den unter Kapitel 2.1. beschriebenen Kriterien sehr aufwendig ist, sollte sie sinnvoller Weise automatisch durchgeführt werden. Dies ist nach dem heutigen Stand des Wissens jedoch nicht vollständig möglich. Deshalb sollten zumindest die zeitaufwändigsten Arbeitsschritte automatisiert werden. Die Vorverarbeitung der Geo-Daten, d.h. die Überprüfung des Qualitätsmerkmals *logische Konsistenz* mit Plausibilitätstests funktioniert in der Praxis bereits gut. Die Überprüfung der Qualitätsmerkmale *Lagegenauigkeit*, *Vollständigkeit*, *zeitliche Genauigkeit* und die Qualität der Attribute ist nur teilweise automatisch möglich und bedarf der Nachbearbeitung durch einen Operateur. Die verstärkte Automatisierung ist derzeit Gegenstand der Forschung und wird in dieser Arbeit weitergehend behandelt. Bei der automatischen Qualitätskontrolle werden als Referenz für die zu überprüfenden Geo-Daten Luft- und Satellitenbilder verwendet. Diese ermöglichen einen digitalen Datenfluss und sind zeitnah verfügbar. Letzteres ist ein wichtiger Punkt, da die automatische Qualitätskontrolle hauptsächlich für die Aktualisierung des sich schnell verändernden Straßennetzes eingesetzt werden soll.

Zusätzlich müssen für die Beschreibung der Qualität von Geo-Daten Informationen über die Herkunft, die bisherige Verwendung und über eventuelle Transformationen der Daten verwendet werden. Diese Metadaten sind entscheidende Eingangsdaten für jeden Qualitätsbewertungsprozess.

2.4. Verifikation der Geo-Daten

Die Qualitätskontrolle von bereits in einer Datenbank vorhandenen Geo-Daten nennt man Verifikation. Hierbei ist eine Bewertung von nicht erfassten Geo-Daten nicht möglich. Für linienhafte Geo-Daten kann die Verifikation durch



jedes System zur Extraktion von selbigen aus Luft- oder Satellitenbildern erfolgen. Das Ergebnis wird dann durch einen Vergleich zwischen dem Extraktionsergebnis und den Geo-Daten aus der Datenbank abgeleitet. Dies lässt eine Aussage über die Qualität der Geo-Daten in Bezug auf die Qualitätsmerkmale *Lagegenauigkeit* und *thematische Genauigkeit* zu. Des Weiteren können so mögliche Veränderungen in der Realität aufgedeckt werden. Ein Operateur kann, bei nicht verifizierten Objekten, mögliche Fehler identifizieren und somit entsprechende Korrekturen bezüglich der Geometrie oder der Attribute vornehmen. Die in dieser Arbeit behandelten Systeme befassen sich im Speziellen mit der Verifikation von Straßennetzen. Um dabei optimalere Ergebnisse zu erreichen, können die Parameter der Straßenextraktion objektbezogen angepasst oder sogar verschiedene Extraktionsalgorithmen verwendet werden. Dies kann durch Informationen aus den Attributen der Objekte geschehen, wie zum Beispiel die Unterscheidung nach Autobahn, Straße oder Weg. Zusätzlich kann man die Parameter der Straßenextraktion durch das Wissen über typische Eigenschaften des Straßennetzes steuern. Näheres zu den verschiedenen Möglichkeiten der Parametersteuerung folgt in den Kapiteln 3 und 4.

2.5. Vervollständigung der Geo-Daten

Um den Aspekt der Vollständigkeit zu bewerten, ist die Pflege beziehungsweise die Aktualisierung einer Geo-Datenbank ein zweiter wichtiger Punkt der automatischen Qualitätskontrolle. Hierzu wird eine Extraktion, weitestgehend unabhängig von bereits bestehenden Daten, im Luft- beziehungsweise Satellitenbild durchgeführt. Das Extraktionsergebnis wird nach zuvor definierten Qualitätsparametern, ähnlich wie bei der Verifikation, bewertet. Wenn das Ergebnis dieser Bewertung nach den gewählten Parametern positiv ist, wird das Objekt der Datenbank hinzugefügt. Für die richtige Wahl der Attribute ist wiederum ein Operateur nötig. Speziell für Straßen ist eine Stabilisierung des Prozesses durch Verwendung von Vorwissen denkbar. Um die Steuerung der Extraktionsparameter weiter zu verbessern, können zum einen die bereits positiv verifizierten Straßen oder Kreuzungen verwendet werden und zum anderen Informationen über Neubaugebiete und ähnliches genutzt werden. Hierauf soll im 5. Kapitel noch explizit eingegangen werden.



3. Verschiedene Ansätze der automatischen Qualitätskontrolle

In der ganzen Welt wird daran gearbeitet, neue und bessere Systeme zur automatischen Qualitätskontrolle von Geo-Datenbanken zu entwickeln. Die verschiedenen Systeme nähern sich diesem umfangreichen Problem mittels multipler Strategien. Ausgewählte Systeme sollen in diesem Kapitel genauer vorgestellt werden. Um die verschiedenen Ansätze der Systeme beurteilen zu können, soll zu Beginn eine allgemeine Fragestellung erarbeitet werden. Auf deren Grundlage werden die verschiedenen Ansätze dann einzeln vorgestellt und am Ende dieses Kapitels tabellarisch direkt miteinander verglichen.

3.1. Die Strategie der Literaturrecherche

Um die Qualität bestehender Geoinformationssysteme bewerten zu können, werden die GIS-Daten mit den Fernerkundungsdaten verglichen (vgl. 2. Kapitel). Dabei ist die automatische Identifizierung der Straßennetze in den Fernerkundungsdaten ein entscheidender Punkt. Bei tiefergehender Betrachtung der Erscheinung von Straßennetzen wird deutlich, dass in Luft-Satellitenbildern mit geringer Auflösung, Straßen meist als Linien erscheinen, während in Bildern mit höherer Auflösung, die Straßenseiten einzeln detektiert werden können. Hierzu wurden semiautomatische Extraktionsalgorithmen entwickelt, wie z.B. [MCKEOWN UND DENLINGER 1988], [VOSSELMANN UND DE KNECHT 1995], [GRÜN UND LI 1996], [MERLET UND ZERUBIA 1996], [COULOIGNER UND RANCHIN 2000] und viele mehr.

Diese Extraktionsansätze werden jedoch dem beabsichtigten Automatisierungsgrad und der angestrebten Zuverlässigkeit nicht gerecht. Deshalb wird an der Entwicklung von neuen Systemen gearbeitet. Dabei ist die Zuverlässigkeit eines Operateurs das Ziel der Entwickler. Ein Mensch setzt dafür seine Erfahrungen und damit sehr viel Vorwissen ein. Demzufolge versuchen die Entwickler neben der Betrachtung der einzelnen Pixel und deren Grauwerten auch zusätzliches Wissen zu verwenden. In diesem Kapitel sollen ausgewählte Ansätze, die Vorwissen aus vorhandenen GIS-Daten verwenden,



einzelnen vorgestellt werden. Dabei sollen die folgenden Fragen näher beleuchtet werden:

1. Wird die vorhandene à-priori GIS-Datenqualität berücksichtigt?
2. Wird zwischen Verifikation und Änderungsdetektion unterschieden?
3. Werden Änderungen nur detektiert oder werden auch extrahierte Geometrien in das GIS übernommen?
4. Geht die Qualität der extrahierten / klassifizierten Daten in die Datenbank ein?
5. Wird die Topologie des Straßennetzes berücksichtigt?
6. Wird bei der Änderungsdetektion zwischen neu gebauten und in der Datenbank fehlenden (alten) Straßen unterschieden?

Mit der **ersten Frage** soll geklärt werden, in wie weit die Qualität der Datenbankobjekte für die Steuerung der Extraktion / Klassifikation verwendet wird. Dabei wird es sich meist um das Qualitätskriterium *Lagegenauigkeit* handeln.

Die **zweite Frage** behandelt den Aufbau der entwickelten Systeme. Da im Gegensatz zur Änderungsdetektion das Wissen aus den GIS-Daten für die Verifikation umfangreich eingesetzt werden kann (vgl. 2.Kapitel), ist eine Zweiteilung des Systems eventuell sinnvoll.

Die **dritte Frage** betrifft den Automatisierungsgrad der einzelnen Systeme und soll klären, ob extrahierte / klassifizierte Objekte in die Datenbank übernommen werden. Ist dies der Fall, erfordern diese eine Genauigkeitsangabe bezüglich der Lage. Mit der **vierten Frage** soll geklärt werden, welches System dies leistet.

Neben den Informationen aus dem bestehenden GIS, ist die Nutzung zusätzlicher Informationen für diese Arbeit besonders interessant. Im Hinblick auf das *4. Kapitel* soll mit der **fünften Frage** beleuchtet werden, inwiefern die Entwickler die typischen topologischen Eigenschaften des Straßennetzes zur Stabilisierung ihrer Systeme verwenden.



Die **sechste Frage** ist im Hinblick auf das *5. Kapitel* von besonderem Interesse. Detektierte Änderungen in Straßennetzen können verschiedene Gründe haben. Zum einen kann der Grund für vorhandene Lücken im Straßennetz eine fehlerhafte Digitalisierung sein. Damit befänden sich diese Straßen im gleichen Kontext wie die positiv verifizierten Straßen. Zum anderen kann eine Veränderung in der Realität die Ursache für vorhandene Lücken im Straßennetz sein. Damit befänden sich diese Straßen in einem Neubaugebiet und somit in einem anderen Kontext.

3.2. Ansatz zur automatischen Aktualisierung nach [SUI ET AL. 2002]

Das Ziel der Entwickler ist es, ein leistungsfähiges System zur automatischen Aktualisierung von Geo-Datenbanken zu erstellen. Besonderes Gewicht legt man hier auf den Einsatz der vorhandenen Geo-Daten und die Betrachtung multipler Objekte im Orthofoto. Im Folgenden wird ein Ansatz zur Verifikation aus niedrig auflösenden Luft- und Satellitenbildern vorgestellt. Darauf aufbauend wird ein Weg zur Nutzung von Bildern höherer Auflösung erläutert. Am Ende dieses Abschnittes wird der Ansatz zur Extraktion von neuen Straßen vorgestellt.

3.2.1. Extraktion unter Verwendung eines bestehenden GIS

Einen entscheidenden Schritt sieht man in der Verwendung von vorhandenen Informationen, z.B. aus einer bereits bestehenden Geo-Datenbank. Dies kann die Extraktion entscheidend vereinfachen und gegen mögliche Fehlextraktionen absichern. Diese Informationen können neben der Geometrie der Objekte auch aus deren Attributen abgeleitet werden. Eine Verwendung von Informationen, neben den Datenbankinformationen kann ebenso sinnvoll sein.

3.2.2. Ansatz zur Verifikation in niedrig auflösenden Orthofotos

Für die Verifikation von Straßen in niedrig auflösenden Orthofotos verwenden die Entwickler bestehende Algorithmen zur Extraktion von linienhaften Objekten. Dennoch gestaltet sich die Extraktion von Straßen durch Schatteneffekte und schwachen Kontrast zwischen Straße und Umgebung oft



schwierig. Zur Unterstützung der Extraktion können Informationen aus dem bestehenden GIS verwendet werden. Hierfür wird die Geometrie der Straße genutzt, um die Kreuzungsbereiche als Startpunkte für die Straßenextraktion zu verwenden. Zusätzlich schränkt man den Raum, in dem der Extraktionsalgorithmus ausgeführt wird, mit der Definition eines relevanten Bereiches ein. Dazu wird um die Straße, deren Lage man aus den GIS-Informationen kennt, ein Buffer mit einer gegebenen Bufferbreite erzeugt. Für die Festlegung der Breite werden die Lagegenauigkeit der Objekte der Geo-Datenbank sowie die geometrische Genauigkeit der Objekte im Orthofoto in Bezug auf die Objekte der Geo-Datenbank verwendet. Die Suche in einem Buffer erhöht die Extraktionsgeschwindigkeit und dient der Bewertung der Lagegenauigkeit des Objektes.

3.2.3. Ansatz zur Verifikation für hochauflösende Orthofotos

Da sich Straßen in höher auflösenden Orthofotos nicht als linienhafte Objekte darstellen, hat man für diese Bilddaten neue Ansätze entwickelt. In solchen Bildern, mit einer Auflösung von weniger als 0,5 m Pixelgröße, stellen sich Straßen als homogene Flächen mit mehr oder weniger parallelen Grenzen dar. Auf Grund der komplexen Zusammenhänge zwischen Straßen und anderen Objekten, wie Autos, Gebäuden und Bäumen, ist ein Nachweis beziehungsweise eine Extraktion oft schwierig. Weitere Merkmale von Straßen, wie Zebrastreifen, durchgezogene und unterbrochene Linien, sowie andere Straßenmarkierungen haben einen starken Einfluss auf das Bild einer Straße. Um ein gutes Extraktionsergebnis zu erhalten, nutzt man vor allem die linienhaften Straßenmarkierungen und die parallelen Kanten.

Dafür werden zunächst alle linienhaften Objekte mit den zur Verfügung stehenden Algorithmen extrahiert. Die extrahierten Linien unterscheiden sich in Länge und Breite weisen aber alle annähernd die gleiche Orientierung auf. Im weiteren Verlauf wird zunächst den längsten Objekten die höchste Zuverlässigkeit zugeschrieben. Senkrecht zu diesen Linien werden Profillinien gebildet, um mit den scheidenden linienhaften Objekten eine neue Linie mit höchster Zuverlässigkeit zu berechnen. Die neu gebildete Linie wird verlängert und an den Endpunkten werden wiederum Profillinien gebildet. Diese weisen nun Schnittpunkte mit anderen linienhaften Objekten auf, die wiederum für die Berechnung einer neuen Basislinie verwendet werden. Zusammengefasst ist dies ein rekursiver Prozess bei dem Basislinien mit differierender Gewichtung entstehen, die entsprechend verknüpft werden.



Um die so extrahierte Straße mit dem im GIS enthaltenden Straßenobjekt zu vergleichen, wird der „*Buffer Detection Algorithmus*“ verwendet. Damit soll eine Aussage bezüglich der Lagegenauigkeit und des Vorhandenseins ermöglicht werden. Zunächst wird um die Straße, deren Lageinformation man aus dem bestehenden GIS entnimmt, der oben beschriebene Buffer erzeugt. Anschließend wird der Längenanteil der neu extrahierten Straße, welcher sich in diesem Buffer befindet zu dem außerhalb liegenden Teil ins Verhältnis gesetzt. Fällt nur ein Teil der Länge der extrahierten Straße in den Buffer, ist das Berechnungsergebnis kleiner Eins. Hierfür wird in Abbildung 1 ein Beispiel schematisch dargestellt.

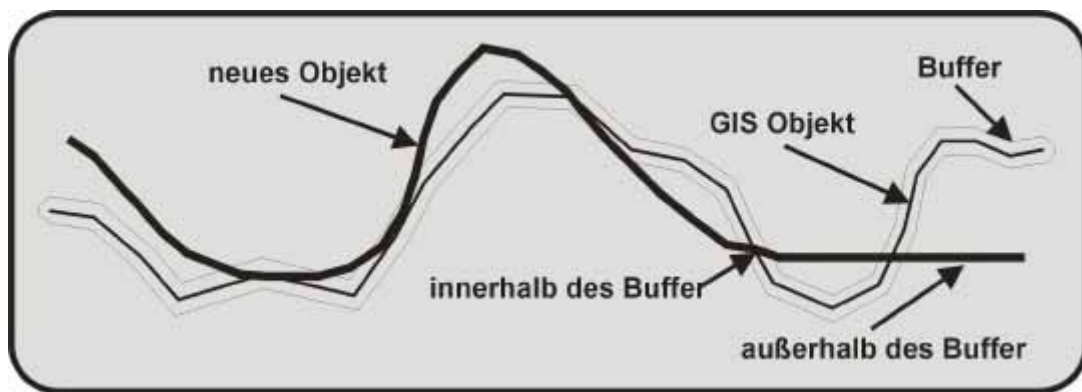


Abbildung 1 : Vergleich des Datenbank-Objektes mit dem Extraktionsergebnis nach [SUI ET AL. 2002]

$$P_{Line} = \frac{L_{outer}}{L_{Total}} \quad (3.2.)^1$$

Die Berechnung erfolgt gemäß Formel 3.2.. Dabei ist P_{Line} der Veränderungsparameter, L_{outer} die Länge im Buffer und L_{Total} die komplette Länge der extrahierten Straße. Für unterschiedliche Situationen kann man den Parameter P_{Line} justieren. Standardmäßig wird er jedoch auf 0.85 eingestellt. Ist das Ergebnis des Veränderungsparameters kleiner als justiert, geht man davon aus, dass die Straße irgendwelchen Veränderungen unterworfen war und neu digitalisiert werden sollte. Es wird empfohlen, diesen Schritt durch einen Operateur überwachen zu lassen. Mit diesem Verfahren kann man nur bestehende GIS-Informationen überprüfen, aber keine Vervollständigung der Datenbank vornehmen.

¹ aus [Sui et al. 2002]



3.2.4. Vervollständigung eines bereits bestehenden GIS

Den nächsten wichtigen Schritt sehen die Entwickler in der Vervollständigung einer Geo-Datenbank. Dabei nutzt man die Tatsache, dass neu erstellte oder veränderte Straßen weniger durch Vegetation verdeckt sind. Somit entsprechen diese Straßen dem Straßenmodell, für das die leistungsfähigsten Extraktionsalgorithmen entwickelt wurden. Dennoch ist eine Extraktion oft schwierig, da nur die Bildinformationen zur Verfügung stehen. Als Unterstützung des Extraktionsalgorithmus möchte man die typischen Netzwerkeigenschaften von Straßen und die bereits erfolgreich überprüften Straßen nutzen. Den ersten Schritt dafür sieht man in der Extraktion von Kreuzungen. Hierzu ist das Grundprinzip, wiederum einen Buffer für die extrahierten Straßenseiten zu erzeugen. Anschließend werden diejenigen Kandidaten für die Kreuzung entfernt, deren Längen über einem Grenzwert liegen, deren Winkel zu groß sind oder deren radiometrische Werte außerhalb des Toleranzbereiches liegen. Die restlichen Straßenelemente werden als Kreuzungen bewertet. An jeder dieser Kreuzungen wird nun eine Straßenextraktion gestartet, deren Parameter verschärft werden. Für Verbesserungen der Ergebnisse möchte man in Zukunft noch weitere Informationen nutzen, wie z.B. Spektralinformationen und zusätzliche Attribute der bestehenden GIS-Daten. Die neu extrahierten Straßen werden in die Datenbank übernommen.

3.2.5. Fazit dieses Ansatzes

Bezug nehmend auf die in der Einleitung dieses Kapitels gestellten Fragen ist festzustellen, dass in [SUI ET AL. 2002] ein Ansatz präsentiert wird, der sich in Verifikation und Änderungsdetektion gliedert. Bei diesem Ansatz fließt die à-priori GIS-Datenqualität durch die Definition des Buffers mit ein. Extrahierte Geometrien der Änderungsdetektion sollen übernommen werden, während bei der Verifikation nur eine Bewertung erfolgt. Bei der Vervollständigung des bereits bestehenden GIS versucht man topologische Eigenschaften des Straßennetzes zur Unterstützung der Extraktion einzusetzen. Hierfür sind jedoch nur theoretische Überlegungen präsentiert worden. Für den gesamten Ansatz wurden keinerlei Tests vorgestellt, was die Einordnung des Leistungspotentials schwierig macht.



3.3. Der Ansatz zur automatischen Straßenextraktion nach [BORDES ET AL. 1997]

In [BORDES ET AL. 1997] wird ein System zur automatischen Extraktion von Straßen aus Luft- und Satellitenbildern beschrieben. Das IGN (Institut Géographique National) beabsichtigt eine topografische Datenbank für Straßenobjekte mit einer Auflösung von 1:25000 und einer geometrischen Genauigkeit von einem Meter bereitzustellen. Für die gesamte Fläche Frankreichs bedeutet dies einen hohen zeitlichen Aufwand. Deshalb sollten möglichst viele Schritte automatisiert werden.

3.3.1. Die Ausgangsdaten des Systems zur Straßenextraktion

Als Ausgangsdaten stehen gescannte Luftbilder mit einem Maßstab von 1:30000 zur Verfügung. Auf Grund von unbeständigen Aufnahmebedingungen, veränderlichen Straßencharakteristika und wechselndem geografischen Kontext, sieht man Schwierigkeiten, ein einheitliches Straßenmodell anzuwenden. Dies führte zu fehlerhaften Extraktionen. Aus diesem Grund wurden zwei Ansätze studiert. Beim ersten Ansatz wurde ein Operateur eingesetzt, welcher dem Extraktionsalgorithmus nur die Startpunkte vorgibt. Dies ist ein semiautomatisches Verfahren. Der zweite vollautomatische Ansatz wird durch die Verwendung externer Daten aus einer Datenbank oder einer gescannten Karte unterstützt. Dieser soll im Folgenden genauer beleuchtet werden.

Die Datenbank **Cartographic DataBase** (CDB) steht dem IGN flächendeckend für ganz Frankreich zur Verfügung. In dieser sind das Hauptstraßennetz, verschiedene Schienennetze sowie Nutzungsflächeninformationen in einem Maßstab von 1:100000 enthalten. Die geometrische Genauigkeit der Objekte in der Datenbank wird mit 20 m angegeben. Um Objekte mit der angestrebten geometrischen Genauigkeit von einem Meter zu digitalisieren, werden Bilder mit einer Auflösung von 0,5 m benötigt.

3.3.2. Der Grundgedanke des Ansatzes

Für die intelligente Steuerung der Straßenextraktion ist eine effiziente Nutzung der Informationen aus der CDB notwendig. Dazu verwendet man Daten über die annähernde Lage des Objektes sowie semantische Informationen wie



Straßenbreite, den geografischen Kontext und die Verbindungen zu anderen geografischen Objekten. Dieses geografische und semantische Wissen hat zwei Funktionen für die Straßenextraktion. Allem voran kann die Straßenextraktion auf das Gebiet beschränkt werden, in dem sich die Straße ungefähr befindet. Des Weiteren kann die Extraktion für jede Straße durch Verwendung ihrer semantischen Attribute und ihrer Verbindungen zu anderen Objekten individuell angepasst werden. Im Gegensatz zum allgemeinen Modell, welches für eine gesamte Objektklasse definiert wird, entwickelt man am IGN für jede Straße ein *spezifisches Modell*.

Daraus leitet sich eine Hypothese für jede Straße ab. Jede Straßenhypothese ist charakterisiert durch eine geometrische Beschreibung, eine Polylinie, welche die ungefähre Position der Straße und Informationen aus deren Attributen, wie Anzahl der Fahrstreifen und Kontext wiedergibt.

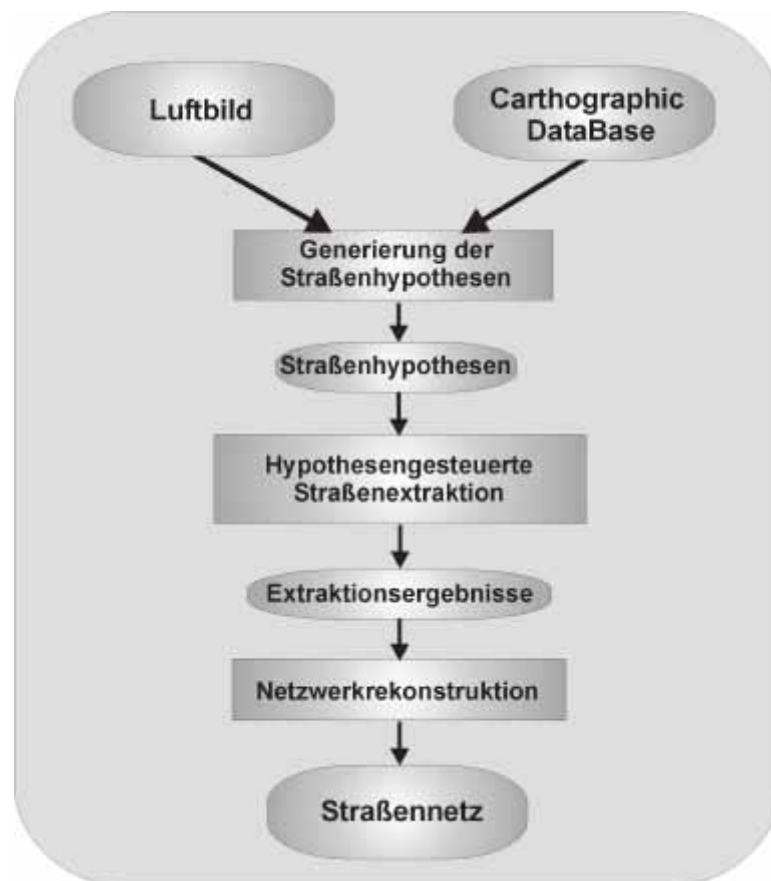


Abbildung 2 : Verlaufsdiagramm des Ansatzes nach [BORDES ET AL. 1997]

Der erste Schritt des Systems ist die Generierung dieser Hypothese (siehe Abbildung 2). Danach wird eine Straßenextraktion lokal für jede Hypothese durchgeführt. Da für verschiedene Straßenmodelle unterschiedliche



Extraktionsalgorithmen optimal sind, wird dieser entsprechend dem *spezifischen Modell* der Straße ausgewählt. Zusätzlich werden die Parameter der Extraktion an die Hypothese angepasst und es wird somit das bestmögliche Ergebnis unter Ausnutzung des Vorwissens erreicht. Die geometrische Beschreibung der Straßenhypothese wird zur Einengung des Suchraums genutzt. Das Extraktionsergebnis entspricht nun den Mittelachsen der Straßen im Bild.

Die Straßenhypothesen werden sequentiell berechnet, da bei einer nachfolgend erfolgreichen Extraktion die Informationen aus der Straßenhypothese an den nächsten Nachbarn weitergegeben werden und diese Straße dann mit den entsprechend angepassten Hypothesenparametern bearbeitet wird. Dabei sieht der Autor jedoch das Problem, dass falsche Extraktionsergebnisse sich fortpflanzen. Um dem entgegen zu wirken, wird die Reihenfolge, in der die Straßenextraktionen durchgeführt werden, nach der zu erwartenden Schwierigkeit aufsteigend angeordnet. Im Folgenden wird dies als *Top-Down* Strategie bezeichnet. Die Schwierigkeit legt man an hand der semantischen Informationen aus den Attributen fest. Dabei gilt, je mehr eine Straße einem Straßenmodell entspricht, für das ein Extraktionsalgorithmus ideal erscheint, desto geringer ist die Schwierigkeit. Dadurch wird die am leichtesten zu extrahierende Straße als erstes bearbeitet. Deren Extraktionsergebnis unterstützt dann die Extraktion der nächsten Straße. Auf diesem Wege werden typische topologische Eigenschaften von Straßennetzen genutzt.

Teile des Straßennetzes, für die nachfolgend dennoch keine Extraktionsergebnisse vorliegen, werden durch einen Interpolationsansatz rekonstruiert.

3.3.3. Die Generierung der Straßenhypothesen

Für die Generierung der Straßenhypothese werden die drei Objektarten *Straßenabschnitte*, *Straßensegmente* und *Kreuzungen* unterschieden. Diese sind mit den zugehörigen Parametern in Abbildung 3 dargestellt. Der *Straßenabschnitt* wird geometrisch durch eine Polylinie beschrieben und erhält seine Lage und die semantischen Attribute aus der CDB (siehe Abbildung 3). Die Endpunkte der Polylinie werden als *Kreuzungen* behandelt. Diese weisen nur leichte Modellunterschiede zu den Straßenmodellen bezüglich der Charakteristik und des Kontextes auf. Die Polylinie des Straßenabschnittes aus der CDB wird in einzelne Linien unterteilt. Den Linien wird im Bild ein



entsprechendes *Straßensegment* zugeordnet. Dieses kennzeichnet den Bereich, in dem sich die Linie befindet und gibt damit den lokalen Kontext wieder. In dem Straßensegment werden die Messungen für die Entwicklung der Straßenhypothese und die Extraktion selbst durchgeführt.

DB Straßenabschnitt	DB Kreuzungen	DB Straßensegment
<ul style="list-style-type: none">- geometrische Beschreibung (Polylinie)- Startkreuzung der Polylinie- Endkreuzung der Polylinie- Anzahl der Fahrstreifen- Anzahl der unabhängigen Fahrstreifen- Straßentyp (Autobahn, Hauptstraße, Nebenstraße, Weg, Fußweg)- Position im Gelände- Kontext (Urban, Wald, andere)- benachbarte lineare Objekte (Schiene, Flüsse)- à-priori Zuverlässigkeit	<ul style="list-style-type: none">- geometrische Beschreibung (Punkt)- Typ (einfach, Kreisverkehr, komplexe Struktur)- Anzahl der verbundenen Straßenabschnitte- verbundene Straßenabschnitte	<ul style="list-style-type: none">- zugehöriger Straßenabschnitt- Startpunkt (x,y)- Endpunkt (x,y)- lokale Kontextregion- à-priori Schwierigkeit

Abbildung 3 : Datenbank Straßenmodell nach [BORDES ET AL. 1997]

3.3.3.1. Bestimmen der à-priori GIS-Datenqualität

Da die CDB aus den unterschiedlichsten Datenquellen digitalisiert wurde, steht die geometrische Genauigkeit eines Straßenabschnittes im direkten Zusammenhang mit der Herkunft seiner Geometrie. Dabei sind die Genauigkeit der gescannten Karte und die Generalisierung der selbigen entscheidend. Als Folge der Generalisierung gilt, je wichtiger die Straße, desto zuverlässiger ist ihre Geometrie in der bestehenden Datenbank enthalten. Straßen in direkter Nachbarschaft zu einem Fluss oder einer Schiene sind in der Datenbank eventuell verschoben. Damit ist ihre Geometrie weniger zuverlässig. An hand dieser Metadaten aus der CDB wird die à-priori GIS-Datenqualität der Straßenabschnitte bestimmt.

3.3.3.2. Die Betrachtung des lokalen Kontext

Anschließend wird der lokale Kontext für die Mittel- und Endpunkte des oben definierten Straßensegmentes berechnet. Dazu wurden zwei Methoden entwickelt.



1. *Die Untersuchung der Homogenität des lokalen Kontextes.* Es wird die radiometrische Varianz der Straßenhypothese entlang ihrer Linie analysiert. Die Untersuchung basiert auf der Straßenverfolgung mittels Homogenitätsansatz.
2. *Die Untersuchung des Profils im lokalen Kontext.* Das charakteristische Straßenprofil wird detektiert. Diese Untersuchung basiert auf der Straßenverfolgung mit Hilfe eines Profilabstimmungsansatzes.

Für jedes Straßensegment der Datenbank wird der lokale Kontext berechnet und geht in die Straßenhypothese mit ein. Das Ergebnis hat entscheidenden Einfluss auf die Wahl des Extraktionsalgorithmus. Aus der à-priori GIS-Datenqualität des Straßenabschnittes in Verbindung mit den Untersuchungen bezüglich des lokalen Kontextes wird die à-priori *Schwierigkeit* für die Straßenhypothese abgeleitet.

3.3.4. Die hypothesengesteuerte Straßenextraktion

Nach der Hypothesengenerierung wird eine Liste der noch nicht behandelten Straßenhypothesen erstellt. Diese Liste wird für die Kontrolle des gesamten Prozesses eingesetzt. Der Straßenextraktionsprozess wird sequentiell durchlaufen, eine Hypothese nach der anderen wird abgearbeitet. In der Liste werden die Straßenhypothesen gemäß der Top-Down-Strategie, ihrer *Schwierigkeit* nach, aufsteigend angeordnet. Die zu erwartende Schwierigkeit bezieht sich dabei auf die nachfolgende Extraktion. Die Wahl der Straßenhypothese mit der geringsten Schwierigkeit wird nach den vier folgenden Kriterien berechnet :

1. *Der geografische Kontext der Straße.* Da es schwieriger ist, Straßen in den Kontextregionen „Urban“ und „Wald“ zu extrahieren, werden diese zuletzt betrachtet.
2. *Die à-priori Schwierigkeit der Straßenhypothese.* Hypothesen, die mit geringer à-priori-Schwierigkeit eingestuft wurden, werden bevorzugt bearbeitet.



3. Die Möglichkeit eine *Straßenhypothese mit einer erfolgreich betrachteten Hypothese zu verknüpfen*. Straßenhypothesen, die sich an erfolgreich extrahierte Straßen anschließen lassen, werden bevorzugt betrachtet. Damit wird den topologischen Eigenschaften des Straßennetzwerks Rechnung getragen.
4. *Die Länge der Straßenhypothese*. Zuerst werden längere Straßen bearbeitet, da üblicherweise deren Lage und Form zuverlässiger in der Datenbank enthalten sind.

Die Reihenfolge der Hypothesen bezüglich ihrer Schwierigkeit ist variabel, da jede erfolgreich angewendete Hypothese einen Einfluss auf die Schwierigkeit der anderen Straßenhypothesen hat. Die Straßenextraktion wird an hand dieser dynamischen Liste durchgeführt.

Zur Auswahl des optimalen Extraktionsalgorithmus werden wiederum die Straßenhypothesen betrachtet. Bisher stehen nur zwei Straßenverfolgungsansätze zur Verfügung. Dies ist zum einen, der auf das Homogenitätskriterium basierende Extraktionsalgorithmus, und zum anderen, ein auf die Profilverfolgung basierender Algorithmus. Eine Entscheidung zwischen diesen beiden Extraktionsansätzen wird an hand der nachfolgenden Kriterien getroffen.

- Für Straßenhypothesen in urbanen Gebieten wird der Extraktionsalgorithmus mit dem Homogenitätsansatz gewählt.
- Wurde eine benachbarte Straßenhypothese erfolgreich bearbeitet, wird der gleiche Extraktionsalgorithmus verwendet.
- Wurde bei der Untersuchung des lokalen Kontextes, Homogenität positiv und das Profil negativ getestet, wird der Extraktionsalgorithmus mit dem Homogenitätsansatz gewählt. Bei gegenteiligem Ergebnis fällt die Auswahl auf den Profilverfolgungsansatz.
- Der Extraktionsalgorithmus mit dem Homogenitätsansatz wird für breitere Straßen verwendet. Für schmalere Straßen wird der Extraktionsalgorithmus mit dem Profilverfolgungsansatz genutzt.

Die Parameter für den Extraktionsalgorithmus werden durch die Charakteristik der Straßenhypothese festgelegt. Ist eine benachbarte Straßenhypothese erfolgreich bearbeitet, werden die Parameter für die Extraktion übernommen.



Die Positionen der Startpunkte für die Extraktion leiten sich aus den in der Hypothese enthaltenen Mittel- und Endpunkten der Straßensegmente ab. Die Umgebung der Punkte wird nach streng parallelen Kanten abgesucht. Sind diese Kanten klar genug erkannt, wird der Startpunkt für die Extraktion auf den Mittelpunkt der beiden Kanten gesetzt. Für den Fall, dass die Straßenhypothese mit einer erfolgreich bearbeiteten Hypothese verbunden wurde, ist der Endpunkt des entsprechenden Extraktionsergebnisses der neue Startpunkt.

Eine Hauptrichtung, ausgehend von den Startpunkten für die Extraktion, wird durch die Richtung des Straßensegmentes vorgegeben. Ist eine benachbarte Straßenhypothese erfolgreich bearbeitet, wird die Richtung dieses Straßensegmentes als Hauptrichtung übernommen. Die Straßenextraktion wird automatisch beendet, wenn sie das Ende der Hypothese erreicht. Nach erfolgreicher Extraktion wird das Ergebnis abgespeichert. Die Informationen über den verwendeten Extraktionsalgorithmus, deren Steuerparameter und die Startpunkte stehen der nächsten Hypothese zur Verfügung. Bevor jedoch diese Daten weiter verwendet werden, findet eine automatische Qualitätskontrolle der extrahierten Straße statt. Hier wird getestet, in wie weit die Straße dem allgemeinen Straßenmodell entspricht. Die Qualität wird durch einen Integer-Wert zwischen 0 (schlechte Qualität) und 4 (gute Qualität) wiedergegeben. Ist der Wert zu gering, werden die Daten aus dem Extraktionsergebnis nicht an andere Hypothesen weitergegeben.

3.3.5. Rekonstruktion des Straßennetzwerkes

Sind alle Hypothesen bearbeitet, muss das Straßennetzwerk rekonstruiert werden. Dazu werden zunächst die Lücken zwischen den Extraktionsergebnissen des selben Straßenabschnittes geschlossen. Anschließend werden die Kreuzungen rekonstruiert. Die so rekonstruierten Teile des Straßennetzes werden als Interpolationsergebnis vermerkt, um sie von den anderen Extraktionsergebnissen zu unterscheiden.

3.3.6. Was bringt der Ansatz in der Praxis

Dieses vollautomatische Straßenextraktionssystem wurde für einige Bilder von den Entwicklern (IGN) getestet. Dabei wurden für 19,5 km Straße, die in der CDB verzeichnet waren, 13 km mit einer Standardabweichung der



geometrischen Lage von durchschnittlich 1,6 m extrahiert. Die interpolierten Straßen in einer Länge von 4,4 km hatten eine durchschnittliche Standardabweichung von 5,6 m. Für die restlichen 2,1 km konnten keine Straßen gebildet werden. Straßen mit einer Abweichung von mehr als 4 m wurden als falsch eingestuft. Die Zuverlässigkeit des Ansatzes wird mit 90 % angegeben. Das Problem von Falschdetektionen wurde durch die Anwendung der Top-Down-Strategie gemindert.

Verbesserungsmöglichkeiten sieht man in einer Weiterentwicklung des Interpolationsansatzes und der Nutzung höherentwickelter Kreuzungsmodelle. Zusätzliche Extraktionsalgorithmen, vor allem für urbane Gebiete, können leicht in das System integriert werden und zu entscheidenden Verbesserungen der Ergebnisse beitragen.

3.3.7. Zusammenfassung der Strategien dieses Ansatzes

Mit der ständigen Weitergabe von Informationen für folgende Extraktionen, kommt der Topologie des Straßennetzwerkes in diesem Ansatz eine besondere Bedeutung bei. Die à-priori GIS-Datenqualität, der für diesen Ansatz genutzten CDB, wird aus semantischen Attributen und aus zur Verfügung stehenden Metadaten abgeleitet und trägt zur Steuerung des gesamten Prozesses entscheidend bei. Die Qualität der extrahierten Daten wird in Form des Qualitätselementes *Lagegenauigkeit* für jede Straße explizit angegeben. Des Weiteren wird getestet, in wie weit eine Straße dem allgemeinen Straßenmodell entspricht. Sind die Abweichungen zu groß, wird das Ergebnis nicht angenommen. Das Endresultat ist eine Datenbank, deren Objekte bezüglich der Lagegenauigkeit entscheidend verbessert wurden. Es werden der Datenbank jedoch keine neuen Objekte hinzugefügt. Dieses System dient nicht dem Aufdecken von Fehlern in der Datenbank oder Veränderungen in der Realität, sondern der Verbesserung der Genauigkeit einer bestehenden Datenbank.

3.4. Aktualisierung des norwegischen Hauptkartenwerkes durch [SOLBERG 1992]

In Norwegen strebt man eine Überarbeitung des Hauptkartenwerks in einem Zyklus von zehn bis zwanzig Jahren an. In diesem Zeitrahmen treten Veränderungen besonders im Straßennetz und in der Form der Siedlungsgebiete auf. Für eine schnelle Bearbeitung, hat das NR (Norwegian



Computing Center) in Zusammenarbeit mit der NMA (**N**orwegian **M**apping **A**uthority) ein semiautomatisches System zur Aktualisierung von topografischen Karten im Maßstab 1:50000, unter Verwendung von SPOT-Satellitenbildern, entwickelt.

3.4.1. Allgemeiner Systemüberblick

Die Interpretation der Satellitenbilder wird in zwei Hauptfunktionen unterteilt. Dies ist zum einen die Verifikation alter Objekte unter Verwendung der bestehenden topologischen Karte und zum anderen das Detektieren neuer Objekte. Für die Ausführung der zweiten Funktion werden zuvor alle positiv verifizierten Objekte der ersten Funktion entfernt. So werden die bisher noch nicht in der Datenbank enthaltenen Objekte bestimmt. Vor allem die zweite Funktion sollte durch einen Operateur kontrolliert werden, bevor die Objekte in Vektordaten umgewandelt und in die Datenbank implementiert werden.

Unter der Annahme, dass die Satellitenbilder radiometrisch und geometrisch korrekt sind, beginnt das System mit der *Vorverarbeitung*. Diese enthält Segmentierungsmethoden für die Extraktion von Objekten bestimmter Struktur, wie Straßensegmente und Neubaugebiete. Zur Unterstützung der Segmentierung aus dem Satellitenbild werden digitale Kartendaten, welche aus der kartografischen Datenbank extrahiert wurden, verwendet.

Den Kern des Systems stellt das *Bildinterpretationsmodul* dar. Ausgangsdaten sind die Ergebnisse der Segmentierung, das originale Satellitenbild und die Karte im Rasterformat. Aufgabe dieses Moduls ist es, die Ausgangsdaten für die Identifizierung neuer und veränderter Objekte zu verwenden und Vorschläge zur Aktualisierung der topologischen Karte zu liefern. Das System visualisiert das Satellitenbild mit den bearbeiteten Objekten. Diese werden farblich in „unverändert“, „verändert“, „verschwunden“ und „neu“ getrennt. Auf Grund der Komplexität von Satellitenbildern sehen die Entwickler die Notwendigkeit, ein Maß für die Sicherheit anzugeben mit der ein Objekt erkannt wurde. So ist es dem Operateur möglich, Objekte mit hoher Unsicherheit im Visualisierungsmodul explizit zu untersuchen.

Das *Kartenmodul* ist mit der kartografischen Datenbank und dem Bildinterpretationsmodul verbunden und konvertiert die entsprechenden Daten zwischen Vektor- und Rasterformat. Die Ergebnisse des Bildinterpretationsmoduls werden vom Operateur kontrolliert und editiert. Die



endgültig überarbeitete Karte wird zur Aktualisierung der topografischen Karte verwendet.

3.4.2. Verifikation des bestehenden Datensatzes

Die unveränderte „alte“ Karte wird zur Unterstützung der Interpretation des Satellitenbildes benötigt. Die relevanten Objekte werden in ein Rasterformat transformiert, da Rasterdaten für diesen Ansatz besser geeignet sind als Vektordaten. So können die im Rasterformat vorliegenden Satellitenbilder in eine direkte räumliche Beziehung zur Karte gestellt werden.

Vorwiegendes Augenmerk wird im Folgenden auf die Verifizierung von Straßen gelegt. Die hier betrachteten Straßen erscheinen als linienhafte Strukturen mit einer meist stärkeren Reflektion als die Umgebung. Dies gilt für den Bereich der sichtbaren elektromagnetischen Strahlung und somit für die zur Verfügung stehenden SPOT-Bilddaten. Für helle Straßen in einer dunkleren Umgebung erschien den Entwicklern die Verwendung von zwei Extraktionsalgorithmen als sinnvoll. Dies sind der Original Minus Meridian Algorithmus [GRACA 1987] und der Template Matching Algorithmus [WANG UND HOWART 1987].

Die Interpretation des segmentierten Bildes erfolgt durch einen Straßenverfolgungsalgorithmus. Jede Straße wird in der binären Rasterkarte durch eine Scansuche lokalisiert und Pixel für Pixel verfolgt. Um sicher zu stellen, dass jedes Segment mit einer Kreuzung verbunden ist, wird eine dynamische Liste der Kreuzungen erstellt. Die topologische Eigenschaft, dass jede Straße durch eine Kreuzung mit dem gesamten Netz verbunden ist, wird hierfür genutzt. Die Straßenverfolgung unterstützt die Extraktion der entsprechenden Straße im Satellitenbild durch Positions- und Richtungsangaben. Das Satellitenbild wird dazu geometrisch in das Koordinatensystem der Karte transformiert. Dabei treten geometrische Abweichungen zwischen korrespondierenden Objekten aus Karte und Bild auf. Diese sind z.B. auf die Generalisierung der Karte zurückzuführen. Das System wurde so entwickelt, dass Positionsfehler mit einem, vom Nutzer zu definierenden, Grenzwert akzeptiert werden. Die topologischen Zusammenhänge in der Karte und im Bild müssen jedoch äquivalent sein.

Das System testet, ob jeder Linienpunkt im Satellitenbild vorhanden ist, dessen Daten es aus der Rasterkarte kennt. Wenn ein Linienpunkt nicht gefunden werden kann, setzt das System einen Profilverfolgungsalgorithmus an.



Intensitätsprofile werden in einer möglichen Richtung der Straße extrahiert. Werden genug Intensitätsmaxima in der möglichen Straßenrichtung gefunden, wird die Straße rekonstruiert. Die neue Karte wird fortlaufend erstellt. Jeder Kartenpunkt, der im Bild nachgewiesen werden konnte geht in die neue Karte ein. Größere zusammenhängende Lücken im Straßennetz deuten auf veränderte und verschwundene Straßen hin. Eine Überprüfung der Ergebnisse durch einen Operateur ist notwendig.

Da die Betrachtung anderer Objekte, die mit Straßen in Zusammenhang stehen, eine Straßenextraktion vereinfachen kann, werden bei diesem System Wasserobjekte und die Kontextregion „Siedlung“ ebenfalls verifiziert. Da Wasserobjekte in ihrer Umgebung als dunkle linienhafte Strukturen erscheinen, werden diese mittels Satellitenbild-Negativ, aber sonst entsprechend dem Ansatz für Straßen, bearbeitet. Siedlungsgebiete werden an hand der Straßendichte verifiziert. Genauer soll darauf in dieser Arbeit jedoch nicht eingegangen werden.

3.4.3. Detektieren neuer Straßen

Die zweite wichtige Funktion für die Interpretation der Satellitenbilder sieht man in der Vervollständigung des bekannten Straßennetzes. Dafür wird zunächst aus dem Satellitenbild ein *Objektbild* mittels des zuvor schon verwendeten Template Matching generiert. Das Objektbild wird durch einen manuell gewählten Schwellwert in ein *Binärbild* umgerechnet. Um die Auswirkungen des Rauschens im Binärbild zu minimieren, sollte der Schwellwert relativ hoch gewählt werden. Für das Detektieren der neuen Straßen wird sowohl das Objektbild als auch das Binärbild verwendet. Neben den Straßen enthält das Binärbild noch viele andere linienhafte Segmente. Die dazu gehörigen, zuvor verifizierten Wasserobjekte werden nun gelöscht. Des Weiteren werden linienhafte Segmente, die in den zuvor als größere Siedlungsgebiete erkannten Bereichen liegen, ebenfalls gelöscht. Dies erscheint den Entwicklern notwendig, da das Straßennetz in Siedlungsgebieten zu komplex und detailliert für eine Betrachtung mittels eines Satellitenbildes mit einer Auflösung von 20 und 10 m ist. Kleinere Siedlungsgebiete werden nicht beachtet, da sonst die Anzahl der Lücken im Straßennetz zu groß wäre.

Das resultierende Bild enthält noch Rauscheffekte, welche sich meist als kurze Linien in zufälliger Anordnung darstellen. Folglich geht man davon aus, dass Linien ohne entsprechend häufig vorkommende Orientierung nicht zum



Straßennetz gehören und löscht diese ebenfalls. Im Weiteren versucht das System an hand von Hypothesen, verschiedene Linien zu einer Straße zu verbinden. Die überzähligen Linien werden als Rauschen eingestuft. Die im ersten Schritt positiv verifizierten Straßen werden ebenfalls gelöscht. Das Ergebnis sollte ein Operateur unter Verwendung der alten Karte und dem Satellitenbild als Hintergrund überprüfen. Die so als neue Straßen akzeptierten Strukturen werden dem positiv verifizierten Netzwerk hinzugefügt.

3.4.4. Diskussion des Ansatzes und der Ergebnisse

Das System wurde für ein SPOT-Satellitenbild in der Nähe Trondheims vom NR (Norwegian Computing Center) selbst getestet. Dabei konnten 76 % der Straßen erkannt werden, 16 % wurden wegen geringem Kontrast und zu grober Generalisierung nicht erkannt und 8 % sollten von einem Operateur nachbearbeitet werden. Die neuen Straßen wurden vollständig erkannt, aber es kam zu einigen Fehlextraktionen, die gleichfalls durch einen Operateur nachbearbeitet werden sollten.

Im Hinblick auf die in der Einleitung dieses Kapitels beschriebene Motivation der Betrachtung dieses Ansatzes ist festzustellen, dass die Topologie des Straßennetzes nur in der zwingenden Verbindung zwischen Straße und Kreuzung Beachtung findet. Die à-priori Datenqualität geht als Lagegenauigkeit der Kartenobjekte durch einen manuell einzustellenden Toleranzwert ein. Des Weiteren stellt das System ein Maß für die Sicherheit der extrahierten Straßen bereit. Dies ist ein zweistufiger Ansatz, da zwischen Verifikation und Änderungsdetektion unterschieden wird. Darüber hinaus wird die Geometrie veränderter oder neuer Straßen in die Karte übernommen.

3.5. Automatische Änderungsdetektion nach [WALTER 2000]

Der im Folgenden beschriebene Ansatz [WALTER 2000] vom Institut für Photogrammetrie der Universität in Stuttgart hat die gleiche Motivation wie das im weiteren Verlauf dieser Arbeit vorgestellte System. Es beschäftigt sich ebenfalls mit der automatischen Aktualisierung der ATKIS (**A**mtliches **T**opografisches **K**artografisches **I**nformations**S**ystem) Datenbank unter Anwendung von Luft- und Satellitenbildern. ATKIS enthält mehr als sechzig Objektklassen und ist in Deutschland flächendeckend mit einer Auflösung von



1:25000 vorhanden. Da für Straßen ein Aktualisierungszyklus von unter einem Jahr angestrebt wird [ADV 2003], werden automatisierte Verfahren notwendig.

3.5.1. Die Klassifizierung mit Hilfe von ATKIS-Daten

Der Ansatz für die Änderungsdetektion aus verschiedensten Bilddaten ist vollautomatisch und wird in zwei Schritte unterteilt. Im ersten Schritt werden sicher bekannte Geo-Daten und die entsprechenden Bilddaten zur Klassifizierung der verschiedenen Nutzflächen benötigt. In diesem sogenannten Trainingsgebiet wird eine Maximum-Likelihood-Klassifikation durchgeführt. Auf Grund von atmosphärischen Effekten, unterschiedlicher Sonneneinstrahlung und verschiedenen spektralen Eigenschaften der Vegetation durch unterschiedliche Jahreszeiten oder Bodenbeschaffenheiten muss für jeden Datensatz ein neues Trainingsgebiet digitalisiert werden. Da dies ein zeitintensiver Faktor ist, sollten Trainingsgebiete automatisch aus vorhandenen Informationen abgeleitet werden. Betrachtet man, dass der Anteil falscher Objekte in der Datenbank sehr klein ist und die Änderungen in der realen Welt gering sind, kann man die Trainingsgebiete automatisch aus den vorhandenen GIS-Daten ableiten. Es gilt, je besser die Qualität der Trainingsgebiete, desto besser das Ergebnis der Klassifikation.

3.5.2. Die Nutzung verschiedener Bilddaten

Dieser Ansatz wurde bereits in ein voll funktionierendes System implementiert. Das System wurde so programmiert, dass die Parameter des Ansatzes interaktiv verändert und projektbezogen abgespeichert werden können. Dazu ist eine Möglichkeit zur Visualisierung vorhanden. Dieses System hat keine Beschränkungen in Bezug auf die geometrische Auflösung, die Größe oder die Art des Spektralbandes der Ausgangsbilder. Das ermöglicht die Verwendung von Daten verschiedenster Quellen. Getestet wurde dies mit Bilddaten des Satelliten IRS-1C, des MOMPS-2P Kamera Systems, des DPA-Kamera-Systems und gescannten analogen Orthofotos. Dabei stellte sich heraus, dass eine geometrische Auflösung von bis zu 2 Metern für ATKIS-Daten ausreichend ist. Bei sehr geringen Auflösungen der Eingangsbilder kam es zu Problemen, da der Operateur die von der Software negativ verifizierten Objekte nicht mehr erkennen oder nachdigitalisieren konnte. Darüber hinaus kam man zu der Erkenntnis, dass sich Bilder mit hoher Auflösung besonders für urbane Gebiete eignen. Des Weiteren fand man



heraus, dass in urbanen Gebieten mit vielen Schatteneffekten der Einsatz von Bildinformationen im nahen Infrarot von Vorteil ist.

Durch die Möglichkeiten der Software, viele verschiedene Datenquellen zu nutzen, können diese kombiniert eingesetzt werden und damit kann das Ergebnis verbessert werden. Als Beispiel nennt der Autor die Kombination von Multispektraldaten und Laserdaten. Durch die Höheninformationen aus den Laserdaten können die Klassen „Grünland“ und „Straße“ gut von den Klassen „Wald“ und „Urban“ getrennt werden. Dagegen können in Multispektraldaten durch den Chlorophyllgehalt die Klassen „Wald“ und „Grünland“ von den Klassen „Straße“ und „Urban“ unterschieden werden.

3.5.3. Aufdecken von Veränderungen mit Hilfe von ATKIS-Daten

Nach der Klassifikation muss entschieden werden, welche klassifizierten Objekte nicht den gespeicherten ATKIS-Objekten entsprechen. Dies können zum einen Objekte sein, bei denen Veränderungen in der Landschaft auftraten oder zum anderen Objekte, die falsch in der Datenbank enthalten sind. Alle ATKIS-Objekte werden in drei Klassen unterteilt. Die erste Klasse beinhaltet alle Objekte, die mit hoher Sicherheit den Ausgangsdaten entsprechen, die zweite Klasse beinhaltet alle Objekte, die nur teilweise den ATKIS-Daten entsprechen und die dritte Klasse enthält keinerlei übereinstimmende Objekte. Die Entscheidung zu welcher Klasse die Zuordnung erfolgen soll wird durch den prozentualen Anteil der klassifizierten Pixel, die der Klasse des ATKIS-Objektes entsprechen, an der Gesamtzahl der Pixel entschieden. Des Weiteren fließt auch eine Entscheidung nach der Form und Homogenität der korrekt klassifizierten Pixel in die Zuordnung mit ein. Dabei werden sehr kleine und schmale Objekte nicht so strikt bewertet, wie normal große Objekte. Die Software macht somit auf mögliche Veränderungen in der Landschaft oder Fehler in der Datenbank aufmerksam. Diese sollen dann jedoch von einem Operateur nachdigitalisiert werden und so in die Datenbank übernommen werden.

3.5.4. Diskussion des Ansatzes

Dies ist der einzige in diesem Kapitel vorgestellte Ansatz, der ausschließlich mit Klassifizierungsverfahren arbeitet. Das beschriebene System bezieht die à-priori GIS-Datenqualität nicht mit ein. Es unterscheidet zwischen Verifikation



und Änderungsdetektion. Dies ist ein semiautomatisches System zur Aktualisierung von ATKIS und ist durch seine hohe Akzeptanz gegenüber multiplen Datenquellen sehr leistungsfähig. Besonders in Hinblick auf das, im weiteren Verlauf dieser Arbeit, vorgestellte System zur Aktualisierung der ATKIS DLM-Basis ist dieser Ansatz interessant.

3.6. Die Verbesserung kartografischer Straßendatenbanken nach [ZHANG UND BALTSAVIAS 2002]

Der Ansatz von [ZHANG UND BALTSAVIAS 2002] befasst sich mit der automatischen Aktualisierung von GIS-Datenbanken. Dazu stellen sie ihr System zur dreidimensionalen Straßennetz-Rekonstruktion aus Luftbildern mit Hilfe wissensbasierter Bildanalyse vor. Das neu entwickelte System integriert multispektrale Bilddaten und nutzt Informationen aus räumlichen Datenbanken. Darüber hinaus werden Kontextinformationen beachtet, verschiedenste Modelle genutzt und damit jedes Straßenobjekt spezifisch betrachtet. Den Entwicklern ist eine Steigerung von Effizienz und Zuverlässigkeit, durch die Betrachtung zweidimensionaler Bilder in einem dreidimensionalen Objektraum, wichtig. Mit diesem Ansatz sollen auch problematische Gebiete, die durch Schatten und verdeckte Abschnitte entstehen, erfolgreich bearbeitet werden. Die praktische Anwendung dieses Systems bezieht sich auf die Degeneralisierung des Schweizer Kartenwerks im Vektorformat mit einem Maßstab von 1:25000. Degeneralisierung meint dabei die geometrische Korrektur von Fehlern die ursächlich durch die vormalige Generalisierung entstanden sind.

3.6.1. Die Strategie des entwickelten Ansatzes

Das System für die Straßennetz-Rekonstruktion nutzt alle verfügbaren Informationen und beinhaltet eine Reihe von Werkzeugen zur Bildanalyse. Der entsprechende Einsatz der verschiedensten Informationen und die Auswahl der geeigneten Bildanalysewerkzeuge wird durch ein wissensbasiertes System gesteuert.

Das wissensbasierte System wird zunächst durch Informationen aus den vorhandenen räumlichen Daten und den bekannten Straßenmodellen entwickelt. Diese Informationen werden in objektorientierten Ebenen abgelegt. Dabei werden Straßen in verschiedene Unterklassen nach Typ, Umgebung und Relief des Geländes unterteilt. Damit wird eine globale Beschreibung der



Netzwerktopologie und die lokale Geometrie der Straßenunterklasse zur Verfügung gestellt. Für gute Ergebnisse ist es außerdem wichtig, zu jedem Straßensegment ein spezifisches Straßenmodell zu definieren. In diesem Modell sind die zweidimensionale geometrische Lage im Bild und die Attribute des Straßensegmentes enthalten. Als Attribute gehen Informationen wie Straßenklasse, eventuelle Straßenmarkierungen, die mögliche Geometrie mit Länge und Breite, das horizontale und vertikale Kurvenverhalten und das umgebende Gelände in das spezifische Modell mit ein. Damit erfolgt die Berechnung eines Straßensegmentes mit der passenden Methode, die dem spezifischen Modell entspricht, den richtigen Merkmalen und den Ergebnissen aus den verschiedenen Extraktionsansätzen. Dann wird das wissensbasierte System mit den Informationen aus der Extraktion automatisch aktualisiert und verfeinert. Die Berechnung vollzieht sich von der als einfachste Unterklasse eingestuften Straße bis zur Schwierigsten. Dies entspricht der von [BORDES ET AL. 1997] verwendeten Top-Down Strategie.

Weder zweidimensionale noch dreidimensionale Prozeduren allein liefern in den Augen der Entwickler adäquate Ergebnisse und so scheint eine Kombination sinnvoll. Somit wird die Transformation der Objekte von zweidimensionalen Bildern in den dreidimensionalen Objektraum möglichst früh durchgeführt. Die Extraktion des Straßennetzes wird in beiden Räumen durchgeführt und gegenseitig gesteuert.

3.6.2. Die verwendeten Module für die Extraktion der Straßen

Ist ein Straßensegment aus der Datenbank selektiert, fokussiert das System auf die Bildregion der Straße. Die Regionen werden mittels der Position des Straßensegmentes aus der Datenbank und dem maximalen Lagefehler in der Vektorkarte definiert. Entsprechend den Attributen der Straßen wird eine Reihe von Bildbearbeitungsprozessen zur Extraktion gestartet. Dabei ist die Generierung gerader Kanten im dreidimensionalen Objektraum die entscheidende Komponente dieses Ansatzes. Die geraden Kanten im dreidimensionalen Objektraum werden durch korrespondierende Kanten zwischen den Stereobildern bestimmt.

Zusätzlich wird eine Klassifikation in den vorliegenden multispektralen Bilddaten durchgeführt. Dazu wurde der von [JAIN UND DUBES 1988] entwickelte Ansatz in das System implementiert. Die verschiedenen Spektralkanäle werden jeweils so kombiniert, dass man die fünf Klassen: „*Straßenregion*“, „*grüne Objekte*“,



„Schattenregionen“, „dunkle Dächer“ und „rote Dächer“ optimal von einander abgrenzen kann. Dabei ist die Klassifikation von Schattenregionen in Kombination mit Straßenregionen von besonderem Interesse.

Zur Stabilisierung des Systems werden digitale Höhendaten verwendet. Diese dienen insbesondere zur Einengung des Suchraumes und damit der Beschleunigung des Verfahrens. In Verbindung mit den Ergebnissen der Klassifikation kann die Existenz von Straßen nachgewiesen und die Extraktionsergebnisse können zusätzlich gestützt werden.

Da Straßenmarkierungen und Zebrastreifen gute Hinweise auf die Existenz einer Straße geben, werden diese extrahiert. Hauptsächlich sind Straßenmarkierungen auf Hauptstraßen und in urbanen Gebieten vorhanden. Daraus lassen sich Informationen über die Richtung der Straße ableiten. Zebrastreifen ermöglichen Aussagen über die Breite der Straße. Da vor allem in Städten die Straßenränder oft verdeckt sind, kann eine extrahierte Mittellinie das Auffinden einer Straße ermöglichen. Straßenmarkierungen sind im allgemeinen weiß und werden durch Schwellwertbildung im R-, G- und B-Band segmentiert.

3.6.3. Die Kombination verschiedener Extraktionsergebnisse

Mit den Informationen aus den räumlichen Daten und dem Bildbearbeitungsprozess wird das wissensbasierte System entsprechend der generellen Strategie etabliert. Die im dreidimensionalen Objektraum gefundenen parallelen Kanten werden zu Straßen zusammengefügt.

Das System überprüft zunächst die extrahierten linienhaften Objekte, um parallele Kanten im dreidimensionalen Objektraum zu finden. Es werden nur Kanten in dem durch die Vektorkarte definierten Buffer lokalisiert. Des Weiteren wird die Orientierung und das Gefälle mit dem entsprechenden Straßensegment in der Datenbank verglichen. Da sich Straßen grundsätzlich auf der Oberfläche des Geländes befinden, werden die extrahierten Kanten mit einem digitalen Geländemodell überprüft. Neben der Kontrolle der Orientierung zweier Kanten, bezüglich der Parallelität, wird mittels des Attributes Straßenbreite der Abstand der Kantenpaare überprüft. Die so kontrollierten Kanten werden in das Bild projiziert und mittels verschiedenster Informationen bewertet. Dazu gehört die Bewertung, in wie weit die Region zwischen den projizierten Kanten und das Klassifikationsergebnis übereinstimmen. Durch extrahierte Straßenmarkierungen innerhalb der Kantenpaare wird die



Bewertung ebenfalls verbessert. Weisen die Ergebnisse der Klassifikation auf Schatten und Verdeckungen durch Bäume oder Häuser hin, wird zur Straßenrekonstruktion in diesem Bereich ein Logikprozess aktiviert. Dieser wird im Weiteren noch erläutert.

Wird eine gerade Kante gefunden und existiert dazu kein entsprechender Partner, wird mittels der bekannten Straßenbreite eine Hypothese dieser Kante generiert. Die damit gebildete Straße wird jedoch mit einer geringen Zuverlässigkeit eingestuft. Das System versucht an hand der Bewertung die gefundenen parallelen Kanten zu verlängern und zu verknüpfen. Für jede Verknüpfung wird jedoch der im Folgenden beschriebene Logikprozess aktiviert.

Der Einsatz des Logikprozesses soll garantieren, dass rekonstruierte Kanten oder Straßen tatsächlich existieren. Im Logikprozess werden vorhandene Lücken betrachtet. Dabei werden zunächst die verbindenden Winkel zwischen den möglichen Straßenseiten und der Lücke überprüft. Wenn dieser Winkel den in der Datenbank vorhandenen Informationen entspricht, wird die Region der Lücke weitergehend bewertet und damit die Zugehörigkeit zur Straße überprüft. Dafür werden folgende Parameter mittels logischer *und* / *oder* Verknüpfung betrachtet.

- Die Lücke darf nicht zu lang sein, *und*
- innerhalb der Lücke wurden Schatten oder Schatten in Verbindung mit einer Straßenregion klassifiziert, *oder*
- die Lücke wurde nachweislich (digitales Geländemodell, Klassifikation) durch Verdeckungen von Bäumen verursacht, *oder*
- Straßenmarkierungen wurden innerhalb der Lücke extrahiert.

Gilt dies, werden diese Lücken zur vollständigen Rekonstruktion der Straßen herangezogen.

3.6.4. Resultate des Systems

Das System wurde in einem Höhenbereich von 550 m bis 2200 m ausschließlich für offene Landschaften getestet. Dabei konnte eine Vollständigkeit von ca. 95 % und eine Richtigkeit von ca. 97 % festgestellt werden.



Es wurde ein wissensbasiertes Bildanalyzesystem für die Extraktion von Straßen aus Stereoluftbildern vorgestellt. Das System verwendet bestehendes Wissen, Kontext, Regeln und Modelle, um den Suchraum einzuschränken. Es behandelt jede Straßenunterklasse separat und überprüft die Plausibilität der möglichen Hypothesen. Dabei werden typische topologische Eigenschaften des Straßennetzes nicht explizit verwendet. Die vorhandene à-priori GIS-Datenqualität geht in Form des generierten Buffers für die Extraktion mit ein. Dabei werden nur Straßen betrachtet, die bereits in der Datenbank enthalten sind. Die extrahierten Geometrien werden übernommen und dienen der Steigerung der Genauigkeit gegenüber den vorliegenden generalisierten Straßendaten. Dieser Ansatz wird mit seiner dreidimensionalen Betrachtung des Objektraumes den Reliefbedingungen der Schweiz gerecht.

3.7. Das System zur automatischen Qualitätskontrolle nach [WILLRICH 2002]

Das deutsche Hauptkartenwerk setzt sich aus den von den Ländern erzeugten Geo-Daten zusammen. Für die Zusammenführung der Daten und deren Verbreitung ist das BKG (**B**undesamt für **K**artographie und **G**eodäsie) verantwortlich. Folglich ist das BKG an einer einheitlich hohen Qualität der ATKIS-Datenbank interessiert. Aus diesem Grund wird in Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie und Geoinformation der Universität Hannover an einem System zur automatischen Qualitätskontrolle und Aktualisierung des deutschen Straßennetzes gearbeitet. Da Orthofotos mit einer Auflösung von 0,5 m die Forderung nach Aktualität und Verfügbarkeit gleichermaßen erfüllen, dienen diese als Grundlage für den Vergleich mit den ATKIS-Objektdaten. Für eine Untersuchung der Datenbank, bezüglich der Qualitätskriterien *Vollständigkeit* und *Lagegenauigkeit*, werden die in ATKIS enthaltenden Vektordaten des Basis-DLM verwendet. Diese sind flächendeckend in Deutschland verfügbar und entsprechen einer topografischen Karte im Maßstab 1:25000. Die automatische Komponente der Qualitätskontrolle ist inhaltlich in zwei Schritte unterteilt. Das ist zum einen die Extraktion der Straßen und zum anderen der Vergleich der extrahierten Straßen mit den in ATKIS vorliegenden Daten. Das System ist so gestaltet, dass es die Effizienz der Qualitätskontrolle durch eine Kombination aus vollautomatischen Prozessen und interaktiven Eingriffen eines Operateurs erhöht wird. Das System soll in Zukunft vom BKG operationell eingesetzt werden. Eine angemessene Zuverlässigkeit ist im Moment nur mit dem erheblichen Einsatz eines Operateurs zu gewährleisten. Damit werden die verbliebenen Schwächen der automatischen Komponenten



kompensiert. Dieses System bildet die Grundlage für die im weiteren Verlauf dieser Arbeit vorgestellten Verbesserungsmöglichkeiten. Demzufolge wird dieser Ansatz detaillierter betrachtet.

3.7.1. Die einzelnen Systemkomponenten und ihre Funktion

Das Konzept ist eine Kombination aus einer vollautomatischen Analyse und einer interaktiven Nachbearbeitung durch einen Operateur. Dabei ist das Ziel, eine Verringerung des interaktiven Anteils durch eine Fokussierung auf schwierige Aufgaben. Dies sind Ergebnisse des automatischen Prozesses, die nur mit einer hohen Unsicherheit bestimmt werden konnten und durch einen Operateur kontrolliert werden sollten.

Das System unterteilt sich in die *GIS-Komponente*, die *Prozesskontrollkomponente* und die *Bildanalysekomponente*. Die genaue Zuordnung wird in Abbildung 4 deutlich.

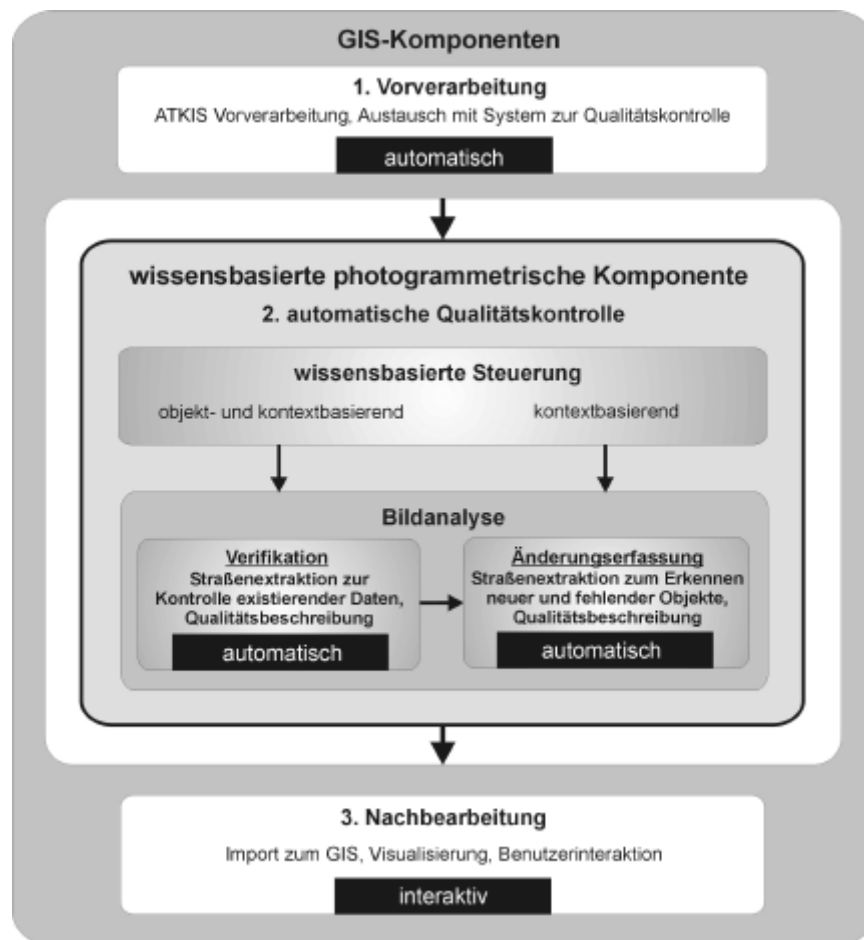


Abbildung 4 : Komponenten des Systems zur Aktualisierung nach [WILLRICH 2002]



- Die **GIS-Komponente** ist die Arbeitsfläche für den Operateur. Die Aufgabe der GIS-Komponente ist die automatische Vorverarbeitung der ATKIS-Daten und die interaktive Nachbearbeitung der automatisch gewonnenen Ergebnisse. Sie ist die Schnittstelle zwischen der Datenbank und dem Bildverarbeitungssystem.
- Die **Bildanalysekomponente** umfasst das automatische kartografische Objektextraktionsmodul, den Vergleich zwischen dem Extraktionsergebnis und den originalen Vektordaten und die Bewertung der Unterschiede zwischen den originalen und extrahierten Straßen. Dabei wird zusätzliches Wissen aus der GIS-Datenbank genutzt. Die Bildanalysekomponente liefert eine vorläufige Qualitätsbeschreibung der Daten.
- Die **Prozesskontrollkomponente** ist die Verbindung zwischen der GIS-Komponente und der Bildanalysekomponente. Hier wird das Vorwissen aus dem GIS für die einzelnen Schritte der Bildanalysekomponente bereitgestellt. Die Prozesskontrollkomponente ist für die Steuerung des gesamten automatischen Arbeitsablaufes hilfreich. Auf Grund der Nähe zur Bildanalysekomponente werden die Daten direkt mit der Prozesskontrollkomponente ausgetauscht.

3.7.2. Der Aufbau der Qualitätskontrolle für ATKIS-Daten

Das Verfahren der automatischen Qualitätskontrolle gliedert sich in drei Schritte. Der erste Teil ist die *automatische Vorverarbeitung*, dann folgt als Hauptteil die *automatische Qualitätskontrolle* und im dritten Schritt schließt sich die *interaktive Nachbearbeitung* an.

3.7.2.1. Die automatische Vorverarbeitung

Hier werden die GIS-Daten für den automatischen Prozess vorbereitet. Dies geschieht in ähnlicher Weise, wie die Vorbereitung der Daten für eine interaktive Analyse durch einen Operateur. Die automatische Vorverarbeitung erfolgt innerhalb der GIS-Komponente. Hier findet die Auswahl des Testgebietes für die Qualitätskontrolle statt und es wird die Verknüpfung zwischen der Objektgeometrie und den thematischen Attributen hergestellt. Außerdem wird ein passendes Interface für die automatische Qualitätskontrolle



bereitgestellt. Aus praktischen Gründen, wie Rechenzeit und Darstellbarkeit auf dem Monitor, wird das Testgebiet in Bildkacheln einer bestimmten Größe eingeteilt. Die Standardgröße der Kacheln beträgt 2 km x 2 km. Für jede Kachel werden alle Typen der ATKIS-Objekte und ihre Attribute, die relevant für die Qualitätskontrolle sind, aus der Datenbank geladen und an die Bildanalysekomponente weitergeben. Objekte, die über den Bereich der Kachel hinaus gehen, werden entsprechend aufgetrennt und separat bearbeitet. Derzeit werden diese Daten in einem Austauschformat exportiert, welches in der Prozesskontrollkomponente gelesen werden kann. In Zukunft soll der Transfer durch eine Datenbankabfrage realisiert werden. Der Operateur muss nur den Prozess der automatische Vorverarbeitung starten. Dieser wird dann mittels eines Batches durchlaufen.

3.7.2.2. Die automatische Qualitätskontrolle

Der Kern des Systems ist die automatische Qualitätskontrolle. Diese erfolgt innerhalb der Prozesskontroll- und Bildanalysekomponente. Zunächst wird für die Steuerung der einzelnen Schritte der Bildanalyse abgeleitetes Wissen aus dem GIS verwendet. Dies dient zur Auswahl der Algorithmen für die Bildanalyse, deren Reihenfolge und deren Definition der Steuerparameter. Hierauf soll im Detail im weiteren Verlauf dieses Abschnittes eingegangen werden.

Zum jetzigen Zeitpunkt wird das Vorwissen, mit dem die Prozesskontrolle gesteuert wird, durch direkt von Geo-Daten ausgelöste Regeln realisiert. In den Regeln ist das Wissen in Form des anzuwendenden Extraktionsalgorithmus und den straßenspezifischen Parametern enthalten. Generell können die Regeln um weitere Objektklassen und zusätzliche Algorithmen erweitert werden. In Zukunft soll das Wissen in einem allgemeineren Weg implementiert werden. Dies soll nach dem wissensbasierten System von [LIEDTKE ET AL. 2001] verwirklicht werden. Es ist für die automatische Qualitätskontrolle in Kooperation des mit dem TNT (Institut für Theoretische Nachrichten-Technik und Informationsverarbeitung Hannover) weiterentwickelt worden.

Die automatische Qualitätskontrolle wird ebenfalls durch einen Batch innerhalb der GIS-Komponente gestartet. Das Ergebnis der Extraktionsschritte mit den Qualitätsbeschreibungen der ATKIS-Objekte wird in Austauschdateien abgelegt und an die GIS-Komponente weitergegeben. Hier bearbeitet der Operateur die



Teile des Gebietes, die innerhalb des automatischen Prozesses nicht zuverlässig analysiert werden konnten.

3.7.2.3. Die interaktive Nachbearbeitung

In der letzten interaktiven Kontrolle konzentriert sich der Operateur auf die von der automatische Qualitätskontrolle als unzuverlässig eingestuften Straßen. Wenn nötig, korrigiert der Operateur die automatisch gewonnene Qualitätsbeschreibung. Um die Betrachtung aller als unzuverlässig eingestuften Objekte sicherzustellen, werden diese dem Operateur Objekt für Objekt präsentiert.

Als Unterstützung für die interaktive Nachbearbeitung des Operateurs, werden die automatisch gewonnenen Qualitätsbeschreibungen und die Extraktionsergebnisse mit dem hinterlegten Orthofoto sinnvoll visualisiert. Dieses grafische Nutzerinterface enthält die im folgenden aufgelisteten Funktionen.

- Zugriff auf die ATKIS-Objekte
- Zugriff auf die Ergebnisse der automatischen Qualitätskontrolle
- Werkzeuge für die Bearbeitung durch den Operateur
- Werkzeuge für die Dokumentation der Ergebnisse

Diese Funktionen ermöglichen dem Operateur die Korrektur und Vervollständigung der automatisch gewonnenen Ergebnisse. Des Weiteren können hier Fehler klassifiziert und in Fehlerklassen, wie fehlende Objekte, ungenaue Objektgeometrien und falsche Attribute eingeteilt werden.

3.7.3. Der Prozess der automatischen Qualitätskontrolle

Die Qualitätskontrolle umfasst die entsprechend angepasste Straßenextraktion, den Vergleich der Extraktionsergebnisse mit den originalen Vektordaten und die Bewertung der Unterschiede zwischen den originalen und extrahierten Straßen.



3.7.3.1. Algorithmen für die Straßenextraktion

Es wurden viele verschiedene Algorithmen für die Extraktion von Straßen entwickelt. Jeder erscheint brauchbar für spezielle Extraktionsaufgaben. Das Konzept dieses Ansatzes ist es, verschiedene Algorithmen für die Qualitätskontrolle zu verwenden. Die Auswahl des geeigneten Algorithmus für jeden einzelnen Fall wird durch die Prozesskontrollkomponente realisiert. Gegenwärtig wird dafür die in [WIEDEMANN UND EBNER 2000] und [WIEDEMANN 2002] beschriebene Software verwendet. Diese wurde an die speziellen Aufgaben angepasst und zur Qualitätsberechnung in die wissensbasierte Komponente integriert. Das zu Grunde liegende Straßenmodell wird durch vordefinierte Parameter oder durch, an das spezielle Bild angepasste, Parameter innerhalb der Prozesskontrollkomponente modifiziert.

3.7.3.2. Steuerung der Extraktion durch Vorwissen

Das für die Straßenextraktion und für die Qualitätskontrolle genutzte Wissen wird durch objekt- und kontextspezifische Eigenschaften erlangt. Der Kontext wird in globalen und lokalen Kontext unterschieden [BAUMGARTNER ET. AL 1997].

Die Nutzung der *objektspezifischen Eigenschaften* bedeutet in diesem Zusammenhang, dass bei der wissensbasierten Steuerung zur Extraktion von Straßen, Informationen aus den Attributen der entsprechenden Objekte verwendet werden. Dazu gehören Attributinformationen wie Straßenbreite und Art der Straße (Autobahn, Landstraße, Weg). Das Wissen über diese Eigenschaften beeinflusst das Straßenmodell, welches für die Steuerung des Extraktionsalgorithmus unterlegt ist. Dabei wird z.B. das ATKIS-Attribut Straßenbreite direkt in die Parametersteuerung des Extraktionsalgorithmus implementiert. So kann eine individuelle Anpassung des Straßenmodells an die spezifischen Eigenschaften des Objektes ein optimaleres Ergebnis liefern. Zusätzlich wird die Geometrie existierender Straßen zur Definition von Regionen, in denen die Extraktionen durchgeführt werden, verwendet.

Der *globale Kontext* enthält Informationen über die Umgebung des zu extrahierenden Objektes, die ebenfalls in den Extraktionsprozess mit einfließen. Die Umgebung hat durch Störungen, z.B. als Folge von Schattenwurf, einen entscheidenden Einfluss auf das Aussehen der Straße. Zusätzlich können Aussagen über den globalen Kontext, Abschätzungen des zu erwartenden Kontrastes der Umgebung zur Straße ermöglichen. Das Wissen über diese



Eigenschaften des globalen Kontextes beeinflusst das Straßenmodell, welches für die Steuerung des Extraktionsalgorithmus unterlegt ist. Für die Extraktion und Bewertung werden aus diesem Grunde drei Typen von Kontextregionen unterschieden. Daraus folgend werden den Typen „offene Landschaft“, „Urban“ und „Wald“ entsprechende Parametersätze für die Extraktion zugeordnet, welche durch empirische Studien gewonnen wurden. Diese werden z.B. in [BUTENUTH 2002] beschrieben.

Die komplexe Modellierung des *lokalen Kontextes*, also die lokalen Beziehungen zwischen Straßen und Bäumen, Gebäuden und Schatten stellen erhebliche Schwierigkeiten dar. Aus diesem Grund findet der Einfluss des lokalen Kontextes auf das Straßenmodell derzeit keinerlei Berücksichtigung.

3.7.3.3. Verifikation und die Erfassung von Veränderungen der ATKIS-Daten

Das Hauptprinzip dieses Verfahrens zur Qualitätskontrolle ist die Ausnutzung der in ATKIS bereits vorhandenen Daten. Zur Unterstützung der unterlegten Straßenextraktion und dem Vergleich mit den vorliegenden Vektordaten wird das Vorwissen für folgende Punkte genutzt.

- Definition einer Region für die Straßenextraktion
- Auswahl eines geeigneten Algorithmus
- Parameterauswahl für die Straßenextraktion
- Parameterauswahl für die Bewertung der Ergebnisse

Auf Grund der Divergenz der zu prüfenden Qualitätsaspekte, mit den Kriterien geometrische oder thematische Genauigkeit auf der einen Seite und dem Kriterium Vollständigkeit auf der anderen Seite, wird Qualitätskontrolle in einem zweistufigen Ansatz realisiert. Zum einen ist dies die Verifikation der bereits in ATKIS enthaltenden Straßen und zum anderen die Erfassung von Veränderungen der Straßendaten. Die Zweiteilung hielt man hauptsächlich deshalb für sinnvoll, weil Vorwissen in unterschiedlichem Umfang genutzt werden kann. Beiden Schritten gemein ist aber, dass zunächst eine Straßenextraktion durchgeführt wird und anschließend deren Ergebnisse mit den in ATKIS gegebenen Straßendaten verglichen werden.



3.7.3.3.1. Verifikation der ATKIS-Daten

Um die Qualitätsmerkmale Lagegenauigkeit und thematische Genauigkeit zu überprüfen (vgl. Kapitel 2.4.) und überschüssige Straßen zu erkennen, werden bei der Verifikation von Straßen ausschließlich die Straßen kontrolliert, die in ATKIS bereits erfasst sind. So liegt für jedes Objekt eine Beschreibung der Geometrie und der Attribute vor, die als Verifikationshypothese betrachtet wird. Mit der Lagegenauigkeit der ATKIS-Datenbankobjekte von 3 m und in Abhängigkeit von der Geometrie und der Straßenbreite der zu verifizierenden Straße wird eine Region im Bild definiert, in der ausschließlich der Extraktionsalgorithmus durchgeführt wird. Neben allgemeinen Informationen über alle Straßen, wird darüber hinaus für jeden Abschnitt des ATKIS-Objektes spezifisches Wissen für die Modifikation der Steuerparameter verwendet. Die Verifikation wird sequentiell für jedes Objekt durchgeführt.

Der verwendete Extraktionsansatz von [WIEDEMANN UND EBENER 2000] modelliert Straßen als lineare Objekte in Luft oder Satellitenbildern mit einer Lagegenauigkeit von 1 bis 2 m. Der in diesem Ansatz genutzte Linienextraktor wurde in [Steger 1998] beschrieben. Den so extrahierten Linienelementen wird ein interner Fuzzy-Wert zugeordnet, welcher an hand von Attributen wie Länge, Geradheit, Konstanz in Breite und Grauwerten ermittelt wird. Dieser Wert kennzeichnet die Kongruenz der Liniensegmente gegenüber dem definierten Straßenmodell. Dieser Fuzzy-Bewertung folgend werden die Linienelemente zu einer geometrisch optimalen Verbindung zwischen den beiden Startpunkten gruppiert. Die Entscheidung, ob eine vollständige Linie gruppiert und somit das ATKIS-Objekt positiv verifiziert werden kann, hängt dann von den vordefinierten Extraktionsparametern ab. Diese Parameter definieren unter anderem die maximal zu überbrückenden Lücken und die höchsten zulässigen Richtungsunterschiede zwischen den extrahierten Linienelementen. Zur Unterstützung dieser Gruppierung werden zwei kleine Vektoren (Seed-Vektoren) an den Startpunkten des ATKIS-Objektes beigefügt. Diese erhalten die gleiche Orientierung wie das entsprechende ATKIS-Objekt und mit einem maximalen Fuzzy-Wert die bestmögliche Bewertung.

3.7.3.3.2. Erfassung von Veränderungen der ATKIS-Daten

Um eine Qualitätsaussage hinsichtlich der Vollständigkeit treffen zu können, liegt das Interesse bei der Erfassung von Veränderungen der ATKIS-Daten auf den Straßen, die noch nicht in der Datenbank enthalten sind. Folglich kann hier



weder eine Beschreibung der Geometrie, noch spezifisches Wissen genutzt werden. Es kann nur eine allgemeine Modellierung hinsichtlich der zu erwartenden Straßen erfolgen. Der Extraktionsalgorithmus ist jedoch, wie bei der Verifikation, von Kontextregionen abhängig, die aus den ATKIS-Daten abgeleitet werden. Damit werden die Extraktionsparameter und die Wahl des geeigneten Algorithmus durch den globalen Kontext beeinflusst. Um positiv verifizierte ATKIS-Objekte als zuverlässige Teile des Straßennetzes nutzen zu können, wird die Erfassung von Veränderungen nach der Verifikation durchgeführt. Dadurch können diese Straßen als Startpunkte für die Netzwerkgenerierung genutzt werden und somit den Extraktionsprozess stabilisieren [WIEDEMANN 2001].

3.7.4. Die Bewertung der vorliegenden Straßen

Der erste Schritt in beiden Aufgaben, der Verifikation und der Erfassung von Veränderungen, ist die Extraktion von Straßen. Die extrahierten Straßen werden dann mit den ATKIS-Daten verglichen. Daraus wird eine Qualitätsbeschreibung jeder einzelnen Straße abgeleitet. Dabei konzentriert man sich auf die Qualitätsbegriffe Lagegenauigkeit, thematische Genauigkeit und Vollständigkeit (vgl. 2. Kapitel) der Objekte. Die logische Konsistenz wird nicht beachtet, da eine Korrektur von ATKIS diesbezüglich im Geo-Datenzentrum in Leipzig durch Plausibilitätstests erfolgt. Für die Qualitätsbewertung der anderen Kriterien wird das Extraktionsergebnis untersucht. Dabei werden die Linien betrachtet, deren Position und Richtung der ATKIS-Straße entspricht. Eine Analyse von Grauwertprofilen erfolgt durch Kontrastuntersuchungen. Damit wird die Qualität der extrahierten Straße abgeleitet. Neu gefundene Straßen werden untersucht, ob diese eine Verbindung zum bestehenden Netz aufweisen und somit topologisch sinnvoll sind.

3.7.5. Resultate und Diskussion des Ansatzes

Das System wurde hinsichtlich der Verifikation für 30 Orthofotos in der Nähe Frankfurts, für ein Gebiet von 10 x 12 km, getestet. Die Orthofotos hatten ursprünglich eine Auflösung von 0,42 m. Eine Umrechnung auf eine Auflösung von 1,70 m erfolgte gemäß dem verwendeten Extraktionsansatz. Die Aktualität des verwendeten ATKIS Basis-DLM wurde als sehr gut eingeschätzt (95 %) und bietet somit einen guten Referenzdatensatz. Eine Unterteilung der 10368



Straßenabschnitte erfolgte in die Kontextregionen offene Landschaft (43 %), Urban (42 %) und Wald (13 %). In der Kontextregion offene Landschaft wurden 79 % der Straßen verifiziert. Die Anzahl der verifizierten Objekte in den Kontextregionen Urban (57 %) und Wald (60 %) ist derart gering, da derzeit noch keine entsprechend leistungsfähigen Extraktionsalgorithmen für diese Kontextregionen zur Verfügung stehen. In einer Sensitivitätsanalyse wurde das Auftreten von *Fehlextraktionen* untersucht. Hierfür ist der ATKIS-Datensatz gegenüber dem Orthofoto verschoben worden. Dabei wurden 33 % der Straßen verifiziert. Ein großer Teil der Fehlextraktionen konnte auf den parallelen Verlauf vieler Straßen zurückgeführt werden.

Bezugnehmend auf die Einleitung dieses Kapitels ist festzustellen, dass bislang in diesem System zur automatischen Qualitätskontrolle und Aktualisierung einer Geo-Datenbank keine topologischen Netzwerkeigenschaften von Straßen weitergehend Berücksichtigung finden. Die Breite des Buffers für den Extraktionsalgorithmus definiert sich aus dem Attribut Straßenbreite und der à-priori Datenqualität des ATKIS-Objektes. Die Lagegenauigkeit der ATKIS-Objekte wird mit 3 m angegeben. Der Ansatz des Institutes für Photogrammetrie und Geoinformation der Universität Hannover ist in die Verifikation von ATKIS-Daten und die Erfassung von Veränderungen der ATKIS-Daten gegliedert und somit zweistufig. Der zweite Teil ist jedoch noch nicht einsetzbar. Das Ziel ist es aber, die Geometrien neu extrahierter Straßen in die ATKIS-Datenbank zu übernehmen. Das vorgestellte System, wie es vom BKG eingesetzt werden soll, detektiert Veränderungen und ermöglicht so eine gezielte und damit zeitsparende Nachbearbeitung durch einen Operateur.

3.8. Zusammenfassung der behandelten Ansätze und das Fazit für diese Arbeit

In diesem Kapitel wurden verschiedene Systeme zur automatischen Qualitätskontrolle von Geoinformationssystemen vorgestellt. Die Ansätze differieren nicht zuletzt wegen unterschiedlicher lokaler und nationaler Voraussetzungen. Dies zeigt sich vor allem in den verwendeten Fernerkundungsdaten. In der Schweiz [ZHANG UND BALTSAVIAS 2002] stehen hochauflösende Luftbilder mit verschiedenen Farbkanälen zur Verfügung und somit werden hier die Straßenseiten einzeln extrahiert und Straßenmarkierungen aller Art berücksichtigt. In Systemen, denen nur niedrigauflösende Luft- und Satellitenbilder zur Verfügung stehen, werden Straßen als Linien extrahiert. Damit sind diese Systeme eventuell weniger



leistungsfähig. Ein weiterer Unterschied besteht in den zu Grunde liegenden Geoinformationssystemen. Neben der geometrischen Genauigkeit, die von 3 m in ATKIS (**A**mtliches **T**opografisches – **K**artografisches **I**nformations**S**ystem) bis zu 20 m in der CDB (**C**artographic **D**ata**B**ase) reicht, ist der Inhalt der Geoinformationssysteme sehr unterschiedlich. Das betrifft zum einen die verschiedenen enthaltenen Objektklassen, die bei ATKIS Wege und Straßen aller Art umfassen, während in der CDB nur wichtige Straßen enthalten sind. Zum anderen ist die Anzahl der, den Straßenobjekten zugeordneten, Attribute verschieden und somit auch der Umfang des verfügbaren Vorwissens. Unterschiedliche topografische Eigenschaften der Oberfläche bedingen gleichfalls differierende Ansätze. So ist in der Schweiz [ZHANG UND BALTSAVIAS 2002] infolge der Oberflächenform eine dreidimensionale Betrachtung notwendig und in Norwegen [SOLBERG 1992] bedingt die Nähe der Straßen zu den reichhaltig vorhandenen Wasserobjekten eine gesonderte Betrachtung von Flüssen und Küsten.

Neben den unterschiedlichen Voraussetzungen der Ansätze, werden auch unterschiedliche Anforderungen an die Systeme gestellt. So wird in Norwegen [SOLBERG 1992] ein Aktualisierungszyklus von zehn bis zwanzig Jahren angestrebt, während man in Deutschland [WALTER 2000], [WILLRICH 2002] eine jährliche Aktualisierung zum Ziel hat. Das in Frankreich entwickelte System nach [BORDES ET AL. 1997] dient hauptsächlich der Steigerung der geometrischen Genauigkeit des Geoinformationssystems, während die anderen vorgestellten Systeme primär zur Aktualisierung der Datenbanken entwickelt wurden. Diese Punkte wirken sich auch auf den angestrebten Automatisierungsgrad aus.

Die von den Entwicklern beschriebenen *Tests* sind meist nicht sehr umfangreich und beschränken sich auf spezielle Ausschnitte. Damit ist klar, dass die verschiedenen Ansätze jeweils in unterschiedlichen Bereichen ihre Stärken haben. Allen gemein ist jedoch, dass die Systeme eine unzureichende Funktionalität in Siedlungsgebieten und im Wald aufweisen. Folglich wurden auch die meisten Tests für die Kontextregion offene Landschaft präsentiert.

In allen vorgestellten Ansätzen wird die Extraktion mittels spezieller Straßenmodelle leistungsfähiger gestaltet. Dabei wird deutlich, dass die Verwendung immer komplexerer Straßenmodelle sinnvoll ist. Hierzu wird Wissen über Geometrie, Radiometrie, Topologie und Kontext verwendet. Im Ansatz von [BORDES ET AL. 1997] wurde bei der Entwicklung spezieller Straßenmodelle besonderes Gewicht auf die Topologie gelegt.



Einige Entwickler, wie [WILLRICH 2002] und [ZHANG UND BALTSAVIAS 2002] verbessern ihre Ergebnisse durch die Kombination verschiedener Extraktionsalgorithmen. Dabei werden die Extraktionsalgorithmen entweder nacheinander ausgeführt [WILLRICH 2002] oder steuern sich gegenseitig [ZHANG UND BALTSAVIAS 2002]. Bei [BORDES ET AL. 1997] wird an hand der Attribute und der Topologie der passende Extraktionsalgorithmus für jedes Straßenobjekt individuell ausgewählt.

Die aus den Geoinformationssystemen abgeleiteten geometrischen Informationen werden auf unterschiedliche Weise genutzt. So nutzen [WILLRICH 2002], [ZHANG UND BALTSAVIAS 2002] und [SUI ET AL. 2002] Vektordaten zur Definition eines Buffers, um den Suchraum einzuschränken. Dagegen verwendet [SOLBERG 1992] eine gescannte Karte im Rasterformat zum Auffinden neuer Straßen und für einen Vergleich mit den Extraktionsergebnissen. Bei [BORDES ET AL. 1997] werden Vektordaten genutzt, um Startpunkte für die Extraktion zu finden. Der Ansatz von [WALTER 2000] verwendet digitale Vektordaten als Referenz für sein Trainingsgebiet zur Klassifizierung.

Neben den GIS- und Fernerkundungsdaten werden in einigen Ansätzen auch andere Datenquellen verwendet. So benutzen [WALTER 2000] und [ZHANG UND BALTSAVIAS 2002] ein digitales Geländemodell, um das System robuster zu gestalten. Außerdem verwenden sie Multispektraldaten für einen Klassifizierungssatz.

In Abbildung 5 werden alle Ansätze tabellarisch direkt miteinander verglichen. Es ist zu erkennen, dass fast alle Ansätze in unterschiedlicher Weise die à-priori Datenqualität des hinterlegten GIS verwenden. Auf Grund unterschiedlicher Zielsetzungen bewerten einige der vorgestellten Systeme die vorhandenen GIS-Daten nur nach den Qualitätskriterien *Lagegenauigkeit* und *thematische Genauigkeit*. Andere detektieren auch Veränderungen und bewerten so auch die Vollständigkeit der Datenbank. Diese Systeme weisen den neu detektierten Objekten Qualität bezüglich ihrer Lagegenauigkeit zu. Nach Betrachtung dieser Ansätze bleibt festzustellen, dass diese als semiautomatische Systeme eingesetzt, sehr interessant für die Bereitstellung aktueller Kartenwerke sind. Als vollautomatische Systeme bieten sie bis heute noch keine ausreichende Zuverlässigkeit. Es wird jedoch deutlich, dass der verstärkte Einsatz von immer vielschichtigeren Informationsquellen zu besseren Ergebnissen führt.



	Wird Topologie berücksichtigt?	Wird die vorhandene a-priori GIS-Datenqualität verwendet ?	Geht die Qualität der extrahierten / klassifizierten Daten in die Datenbank ein ?	Wird zwischen Verifikation und Änderungsdetektion unterschieden ?	Werden extrahierte Geometrien in die Datenbank übernommen?
Kapitel 3.1. [Sui et al. 2002]					
Kapitel 3.2. [Bordes et al. 1997]					
Kapitel 3.3. [Solberg 1992]					
Kapitel 3.4. [Walter 2000]					
Kapitel 3.5. [Zhang 2002]					
Kapitel 3.6. [Willrich 2002]					

Abbildung 5 : Vergleich der im 3. Kapitel vorgestellten Ansätze mittels der zu Beginn gestellten Fragen

Wie ebenfalls aus der vorliegenden Tabelle hervorgeht, nutzen drei der vorgestellten Systeme bereits die topologischen Eigenschaften. Der Aufbau eines Straßennetzes folgt bestimmten Richtlinien und enthält damit zusätzliche Informationen, welche die Qualitätskontrolle entscheidend verbessern können. Insbesondere [BORDES ET AL. 1997] verwendet die typischen topologischen Eigenschaften des Straßennetzes zur Verbesserung seiner Ergebnisse. Weitere Wege zur Nutzung der *Informationsquelle Topologie* sollten entwickelt werden. Eine Möglichkeit dafür wird im 4. Kapitel genauer untersucht.

Bei der Vervollständigung der Datenbanken unterscheidet keiner der untersuchten Ansätze zwischen neu gebauten Straßen und Digitalisierungslücken. Da bei der Änderungsdetektion Informationen aus dem GIS nur in geringem Maße verwendet werden können, stellt diese zusätzliche Informationsquelle jedoch eine entscheidende Verbesserung dar. Dieser Sachverhalt soll im 5. Kapitel näher beleuchtet werden.



4. Zweistufige topologiegestützte Verifikation des ATKIS-Straßennetzes

In diesem Kapitel soll beschrieben werden, wie das Wissen über die Topologie des Straßennetzes zur Verbesserung des in Kapitel 3.7. beschriebenen Systems eingesetzt werden kann. Zunächst wird geklärt, welche Anforderungen an ein neues System gestellt werden. Anschließend soll die Definition der Topologie des Straßennetzes erfolgen sowie die Strategie des neuen topologiegestützten Systems erklärt werden. Abschließend werden die erreichten Resultate untersucht und mit dem Vorgängersystem verglichen.

4.1. Nachteile des bereits entwickelten Systems

Das im Vorfeld beschriebene System (vgl. Kapitel 3.7.) soll einen Operateur des BKG bei der Bewertung, der im ATKIS Basis-DLM enthaltenden Straßenobjekte, unterstützen. Ziel einer Weiterentwicklung des Systems sollte es sein, den zeitlichen Aufwand des Operateurs immer weiter zu minimieren. Ein wichtiger Punkt dafür ist, sicherzustellen, dass die im Verifikationsprozess akzeptierten Straßen auch richtig im Bild enthalten sind. Kann dies garantiert werden, muss der Operateur nur die verworfenen Straßen kontrollieren. Dementsprechend muss ein operationell einsetzbares System die Anzahl der auftretenden Fehlerverifikationen minimieren. Diese sollen im Weiteren als *False-Positives* bezeichnet werden (siehe Tabelle 1). Um dies zu erreichen, müssen die Parameter für den Extraktionsprozess sehr streng gesetzt werden. Die Konsequenz daraus ist jedoch eine verhältnismäßig hohe Anzahl von verworfenen Straßenobjekten, obwohl diese tatsächlich vorhanden sind. Diese sollen im Weiteren als *False-Negatives* bezeichnet werden. Da der Operateur alle verworfenen Straßen kontrollieren muss, steht die zeitliche Ersparnis und damit die Leistungsfähigkeit des Systems in direktem Zusammenhang mit der Anzahl der False-Negatives.

	richtige ATKIS-Daten	fehlerhafte ATKIS-Daten
akzeptiert	TRUE-POSITIVES	FALSE-POSITIVES / Fehlschluss 2. Art
verworfen	FALSE-NEGATIVES / Fehlschluss 1. Art	TRUE-NEGATIVES

Tabelle 1 : Einordnung der Fehler erster und zweiter Ordnung



Dieses Problem der Fehlerbetrachtung ist aus der Ausgleichsrechnung bekannt und wird in [PELZER 1979] beschrieben. Darin wird neben einer Unterteilung in Sicherheitswahrscheinlichkeit und Testgüte auch eine Unterscheidung in Fehlschluss 1. Art und Fehlschluss 2. Art getroffen. In Tabelle 1 werden zusätzlich noch *True-Positives* und *True-Negatives* zugeordnet.

Der bisher entwickelte Ansatz kann diesen Konflikt zwischen der Zuverlässigkeit auf der einen Seite und einer hohen Effizienz auf der anderen Seite nicht lösen. Mit der folgenden Betrachtung nach [GERKE ET AL. 2003], der Topologie des Straßennetzes und der Entwicklung eines zweistufigen Ansatzes soll dies jedoch gelingen.

4.2. Der zweistufige Untersuchungsansatz

Die Zuverlässigkeit des Verifikationsprozesses ist der wichtigste Punkt, auf dessen Grundlage der Anteil der korrekt verifizierten Straßen erhöht werden soll.

Zur Lösung des zuvor beschriebenen Konfliktes wird der Gedanke des in [FISCHLER ET AL. 1981] vorgestellten Ansatzes aufgegriffen. Darin wurden zwei verschiedene Ansätze zur Extraktion von Straßen in Luft- und Satellitenbildern verwendet. Der erste Ansatz (Typ 1) wurde entwickelt, um Straßen mit einer hohen Zuverlässigkeit zu bestimmen. Die Minimierung der False-Positives geht mit einer geringen Anzahl an extrahierten Straßen einher. Der zweite Ansatz (Typ 2) extrahiert hingegen nahezu alle vorhandenen Straßen findet aber auch andere Objekte. Das Ziel ist es nun, die Ergebnisse der beiden Extraktionsansätze sinnvoll zu kombinieren. Dafür wurde ein auf der Graphentheorie basierender Ansatz entwickelt. Dabei bilden die Ergebnisse des Typ 1 Ansatzes die zuverlässige Basis des Straßennetzes mit einem sehr geringen Anteil an False-Positives und einer großen Anzahl an Lücken. Die fehlenden Teile im Basis-Netzwerk werden mit den Resultaten aus dem Typ 2 Ansatz vervollständigt. Diese Überlegungen sollen zur Lösung des zu Beginn beschriebenen Konfliktes genutzt werden.



4.3. Nutzung der Topologie aus dem globalen Kontext

Eine Möglichkeit die Typ 1 und Typ 2 Ergebnisse sinnvoll zu kombinieren, liegt in der Betrachtung zusätzlicher Informationsquellen, wie z.B. der Topologie.

Ein Operateur erkennt Straßen in Luftbildern scheinbar mühelos. Ein Grund dafür liegt in der Erfahrung des Operateurs mit topologischen Aspekten des Straßennetzes. Da sich ein Mensch täglich im Straßennetz bewegt, kennt er die typischen topologischen Eigenschaften sehr genau, ohne den Begriff Topologie definieren zu können. Um dies in einem automatischen System zu erreichen, ist die Abgrenzung des Topologiebegriffes zunächst notwendig.

Die Topologie betrifft solche Eigenschaften von Straßen, die unabhängig von ihrer Größe und Gestalt, also ihrer Metrik sind [HAKE ET AL. 2002]. Der Metrik von Straßen wird mit zahlreichen Straßenmodellen, in den bisher entwickelten Extraktionsalgorithmen, Rechnung getragen. Die Topologie beschreibt Beziehungen der Nachbarschaft, des Enthaltenseins und der Überschneidung. Die topologische Beschreibung raumbezogener Objekte und ihrer gegenseitigen Beziehungen verwendet die Elemente Knoten, Kante und Masche [BARTELME 2000]. Dabei entsprechen Knoten im Straßennetz den Kreuzungen und werden in der Datenbank als Punkte behandelt. Kanten stellen die eigentlichen Straßen dar und Maschen stimmen mit den flächenhaften Datenbankobjekten überein. Dabei sind die topologischen Relationen so festgeschrieben, dass benachbarte Knoten durch eine Kante verbunden werden und ein Knoten am Anfang und am Ende einer Kante liegt. Alle Verbindungskurven zwischen zwei Knoten sind topologisch gesehen äquivalent. Folglich bewirkt eine Veränderung des Straßenverlaufes zwischen zwei Kreuzungen keinerlei Veränderungen bezüglich der Topologie. Bei einer topologischen Struktur, wie dem Straßennetz, mit n Knoten, m Kanten und r Maschen gilt die Eulersche Formel ($n - m + r = 2$). Damit lassen sich Aussagen zur logischen Konsistenz einer Geo-Datenbank machen.

Um das Erscheinungsbild und weitere topologische Eigenschaften des Straßennetzes genauer beschreiben zu können, ist eine Betrachtung der ursächlichen Gründe für die Gestaltung von Straßen sinnvoll. Das Straßennetz dient allen Transportaufgaben, die durch Wechselbeziehungen zwischen den verschiedenen Lebensbereichen (Wohnen, Arbeiten, Versorgung, Erholung usw.) entstehen [PIETSCH 1998]. Dazu kommt der Straße neben dem Linienverkehr die Aufgabe der flächenhaften Verkehrserschließung zu. Die Straßennetzgestaltung ist eine wichtige Fachplanung für jeden Raum, die sich nach den geografischen Begebenheiten richtet. Neben geografischen



Aspekten, die hauptsächlich Einfluss auf die Metrik der Straße nehmen, ist die Funktion der Straßen für das Erscheinungsbild des Netzes entscheidend. Als wichtigste Funktionen sieht man in Deutschland die Verbindungs- und Erschließungsfunktion an. In der *Verbindungsfunktion* findet sich die Forderung wieder, dass die moderne Wirtschaft Verkehrssysteme benötigt, die bei geringstem Zeit- und Kostenaufwand leistungsfähige und sichere Transporte ermöglichen. Die gleichen Eigenschaften werden von Menschen für ihre täglichen Fahrten zur Arbeit, zum Einkauf und zu Freizeiteinrichtungen erwartet. Als Resultat steht die Forderung, dass zwei Punkte mit einem möglichst kurzen Weg verbunden werden. Dies hat entscheidenden Einfluss auf das Erscheinungsbild des Straßennetzes. *Erschließungsfunktionen* erfüllen Straßen, indem sie als Zufahrten zu Ortschaften, Gebäuden, Grundstücken oder Feldern dienen. Dies hat ebenfalls einen Einfluss auf den Aufbau des Straßennetzes.

So nutzt ein Operateur bei der Verifikation, kraft seiner Erfahrung, topologische Eigenschaften des Straßennetzes. Wie dies in einem automatischen System realisiert werden kann, soll im Folgenden beschrieben werden.

4.4. Topologiegestützte Verifikation von Straßen

Mit Hilfe der im Vorfeld beschriebenen Überlegungen wurde ein lauffähiges System entwickelt. Dabei bildet das in Kapitel 3.7. geschilderte System die Grundlage für die im Folgenden beschriebenen Veränderungen.

Zunächst werden die vorliegenden Daten des ATKIS Basis-DLM durch das bekannte Verifikationsmodul (vgl. Kapitel 3.7.) bewertet. In dieser ersten Bewertungsphase (Phase 1) wird der Extraktionsansatz mit dem strengen Parametersatz ausgeführt. Die damit erzeugten Ergebnisse enthalten ein Minimum an False-Positives. Wie schon beschrieben, ist damit die Anzahl richtiger, nicht akzeptierter Straßen sehr hoch (False-Negatives). Straßenobjekte der Datenbank die im ersten Bewertungsschritt erfolgreich verifiziert wurden, sollen im weiteren Verlauf als *akzeptiert I-Objekte* bezeichnet werden. Diese bedürfen keiner weiteren Betrachtung. Nicht verifizierte Objekte werden mit *verworfen I* benannt. Von diesen Objekten werden mittels der erst in Kapitel 4.4.3. beschrieben Kriterien diejenigen Objekte ausgewählt, die wiederholt bewertet werden sollen. Die zweite Bewertungsphase entspricht ebenfalls dem in Kapitel 3.7. beschriebenen Verifikationsmodul. Der hier verwendete Extraktionsalgorithmus enthält tolerantere Steuerparameter



(Phase 2). Das Ergebnis der beiden Bewertungsschritte wird differenziert visualisiert. Dabei werden *akzeptiert I-*, *akzeptiert II-*, *verworfen I-* und *verworfen II-Objekte* farblich abgrenzt. In Abbildung 6 ist der beschriebene Programmablauf schematisch dargestellt.

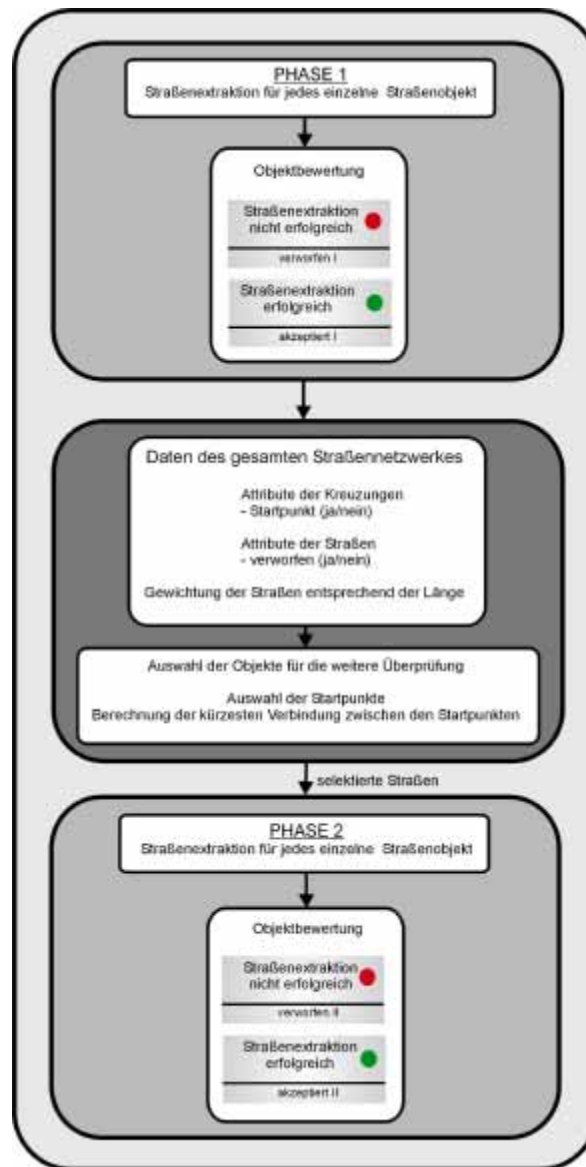


Abbildung 6 : Schematische Darstellung des topologiegestützten Systems nach [GERKE ET AL. 2003]

Es wird im Weiteren noch nachgewiesen, dass die ausschließliche Verwendung des toleranten Parametersatzes zu einer nicht akzeptablen Anzahl von False-Positives führt. Die Verwendung topologischer Regeln ermöglicht den Einsatz eines toleranteren Parametersatzes und damit eine Minimierung der False-Negatives bei einem geringen Niveau an False-Positives.



4.4.1. Definition der Extraktionsparameter für Phase 1 und Phase 2

Für den Verifikationsprozess wird die in [WIEDEMANN UND EBNER 2000] und [WIEDEMANN 2002] beschriebene Extraktionssoftware verwendet. Zur besseren Steuerung der Extraktion können zahlreiche Extraktionsparameter angepasst werden. Veränderungen in diesen Parametersätzen wurden bereits vielfach zur Betrachtung spezieller Kontextregionen oder spezieller Straßenmodelle vorgenommen, [BUTENUTH 2002] und [HOHEISEL 2003]. Für den topologiegestützten Einsatz der Parametersätze ist eine Veränderung bezüglich des Straßenmodells nicht sinnvoll. Eine Betrachtung der Ursachen für False-Negatives im bestehenden System soll eine Abgrenzung der entscheidenden Parameter bringen.

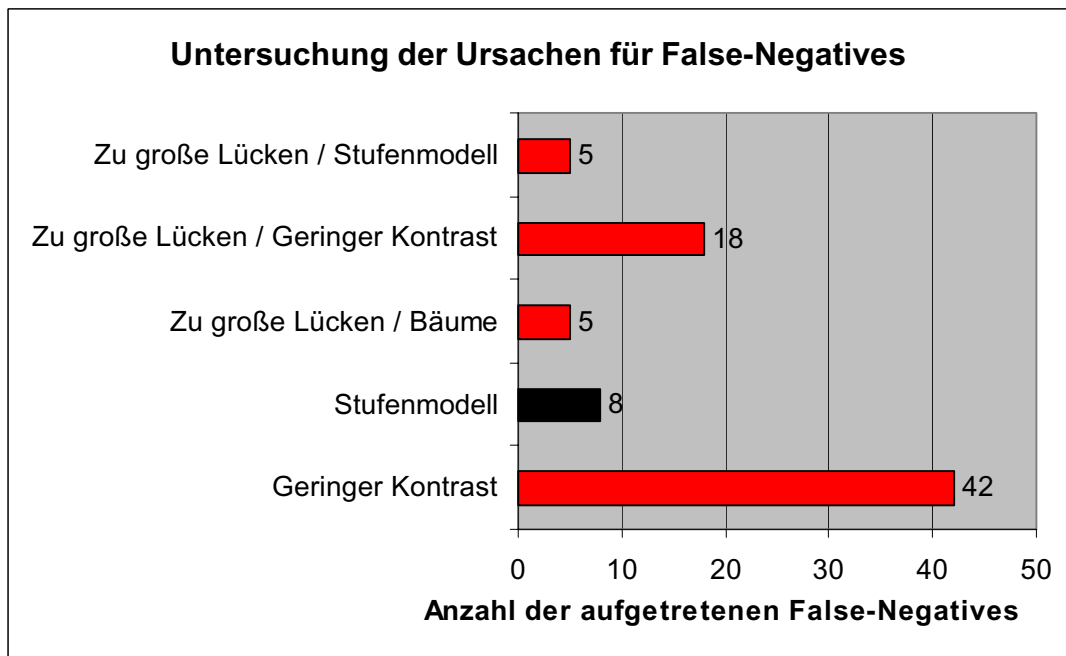


Abbildung 7 : Statistik der auftretenden False-Negatives, (rote Balken = relevant für die Parameterwahl, schwarzer Balken = irrelevant für die Parameterwahl)

Die Untersuchung der False-Negatives des bisher entwickelten Systems wurde in zwei Orthofotos exemplarisch durchgeführt. Die in Abbildung 7 dargestellten Ergebnisse beschränken sich auf die Kontextregion offene Landschaft. Dabei wurden 78 fälschlich verworfene Straßenobjekte untersucht. Für diese Untersuchung wurden die Ergebnisse der Linienextraktion und der Gruppierung für jedes Objekt einzeln betrachtet (vgl. Kapitel 3.7.3.3.1.). Dabei wurde die Ursache für die unvollständige Gruppierung jeweils einer der in Abbildung 7 dargestellten Gruppen zugeordnet.



In Abbildung 7 ist eine Ursache für die False-Negatives das *Stufenmodell*. Dabei handelt es sich um den Fall, dass eine Straßenseite heller und die andere Seite dunkler als die Straße ist. Dies kann durch den Extraktionsalgorithmus nicht abgefangen werden, ist aber eine Frage des Straßenmodells und somit nicht relevant für diese Betrachtung. *Zu große Lücken* treten auf, wenn der Linienextraktor auf Grund von Unterbrechungen durch Bäume, vorübergehend geringen Kontrast oder durch ein stückweise auftretendes Stufenmodell die Straßen nicht vollständig rekonstruieren kann.

An hand der zwei untersuchten Bilder wurde dem größten Teil der False-Negatives als Ursache der geringe Kontrast zwischen Straßen und Umgebung zugeordnet. Somit werden die Kontrastparameter (vgl. Kapitel 3.7.3.3.1.) für die Phase 1 strenger und für die Phase 2 toleranter justiert. Eine zweite wichtige Ursache ist das Auftreten von Lücken während des Extraktionsprozesses (vgl. Kapitel 3.7.3.3.1.). Bei toleranter justierten Kontrastparametern wird bereits der Anteil auftretender Lücken reduziert. Ein weiterer Teil entsteht durch stückweise Störungen der Linienextraktion. Dies ist z.B. auf Verdeckungen durch Bäume zurückzuführen. Um dem Rechnung zu tragen, wird für den Parametersatz der Phase 2 die absolut und relativ überbrückbare Lückengröße in der Gruppierungsphase gegenüber dem Parametersatz der Phase 1 erhöht.

Nach der Betrachtung dieser Analyse erscheint nur die Justierung an diesen beiden Parametern sinnvoll und somit wurden die Parametersätze für Phase 1 und Phase 2 entsprechend generiert. In Anhang A.1.1. sind die modifizierten Parametersätze der Phasen 1 und 2 abgebildet.

4.4.2. Sensitivitätsanalyse der generierten Parametersätze

Eine Sensitivitätsanalyse soll im Allgemeinen die Zuverlässigkeit eines Verifikationsansatzes überprüfen. Um dies zu erreichen, werden bewusst falsche Datenbankinformationen mittels des zu testenden Verifikationsansatzes kontrolliert. Kommt es dennoch zu positiven Verifikationsergebnissen, lässt dies eine Bewertung der Zuverlässigkeit des Systems zu. Im Weiteren lassen sich mit dieser Methode Extraktionsansätze, hinterlegte Straßenmodelle oder die für die Extraktion verwendeten *Parameter* vergleichen und damit bewerten.

Die definierten Parametersätze der Phasen 1 und 2 wurden an hand einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Dafür wurde das für die Verifikation verwendete



Orthofoto um 100 gon gegenüber den Daten des ATKIS Basis-DLM gedreht. Damit steht ein zufälliger Datensatz zur Verfügung, der größtenteils fehlerhaft ist. Dieser wurde mit dem bisher entwickelten Verifikationsansatz, einmal mit strengen Parametern der Phase 1 und einmal mit den toleranten Parametern der Phase 2, bewertet. Die jeweiligen Ergebnisse werden verglichen und erlauben somit eine Aussage über die Auswirkung der beiden Parametersätze auf die Zuverlässigkeit des Systems. Ein Beispiel wird in Abbildung 8 präsentiert.

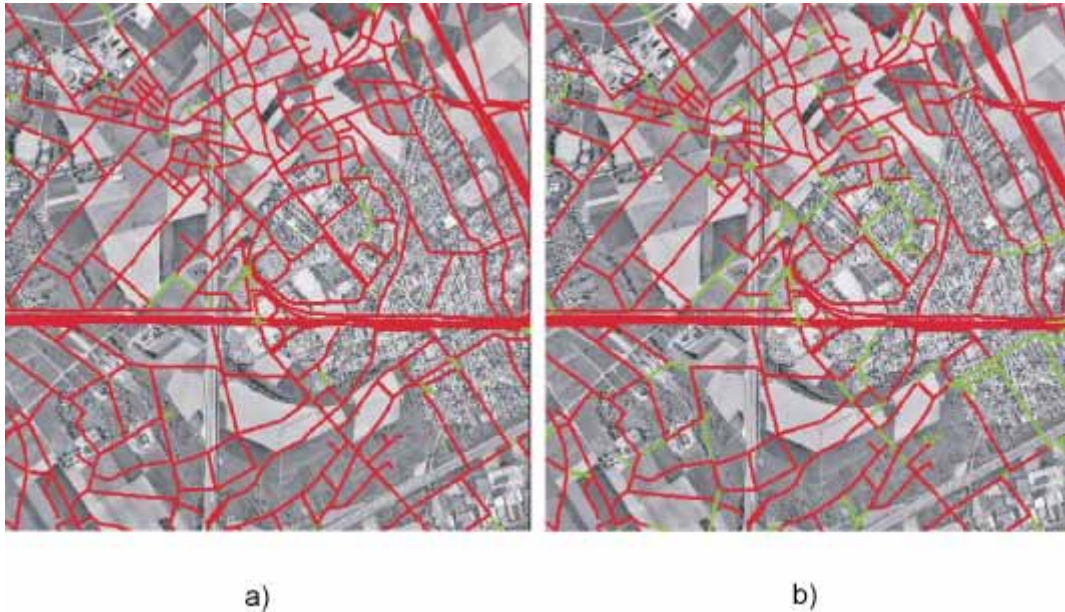


Abbildung 8 : Sensitivitätsanalyse mit einem um 100 gon gedrehten Orthofoto und dem entsprechenden ATKIS-Datensatz (rot = verworfen, grün = akzeptiert) als Vergleich zwischen : a) dem Verifikationsprozess mit den Parametern der Phase 1, b) dem Verifikationsprozess mit den Parametern der Phase 2

In Abbildung 8 sind die Informationen des ATKIS Basis-DLM farbig hervorgehoben. Die vom Verifikationsansatz akzeptierten Straßenobjekte sind grün gekennzeichnet und die verworfenen Objekte sind rot markiert. In Abbildung 8a ist zu erkennen, dass im Gegensatz zu Abbildung 8b nur wenige Straßen akzeptiert wurden. Die Sensitivitätsanalyse wurde insgesamt für zehn Bilder durchgeführt.

BILD-NR.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Gesamt
akzeptiert, Phase 1 in %	19,66	15,30	5,34	16,20	10,33	15,09	11,13	14,41	20,34	14,00	14,92%
akzeptiert, Phase 2 in %	37,63	34,79	17,48	34,43	21,07	37,50	29,63	33,70	35,12	39,39	33,49%

Tabelle 2 : Resultat der Sensitivitätsanalyse für zehn Orthofotos



In Tabelle 2 sind die Resultate der kompletten Analyse dargestellt. Der Anteil der akzeptierten Objekte liegt bei der Verwendung der toleranten Parameter um mehr als 100 % höher als bei Verwendung des strengen Parametersatzes. Die Prozentzahl der akzeptierten Straßenobjekte variiert in den einzelnen Bildern sehr stark aber die Differenz zwischen den Resultaten der beiden Parametersätze bleibt relativ konstant. Eine Ursache hierfür ist, dass einige Straßen zufällig den gedrehten Straßen entsprechen und somit extrahiert werden. Ein Beispiel wird in Abbildung 9 dargestellt.

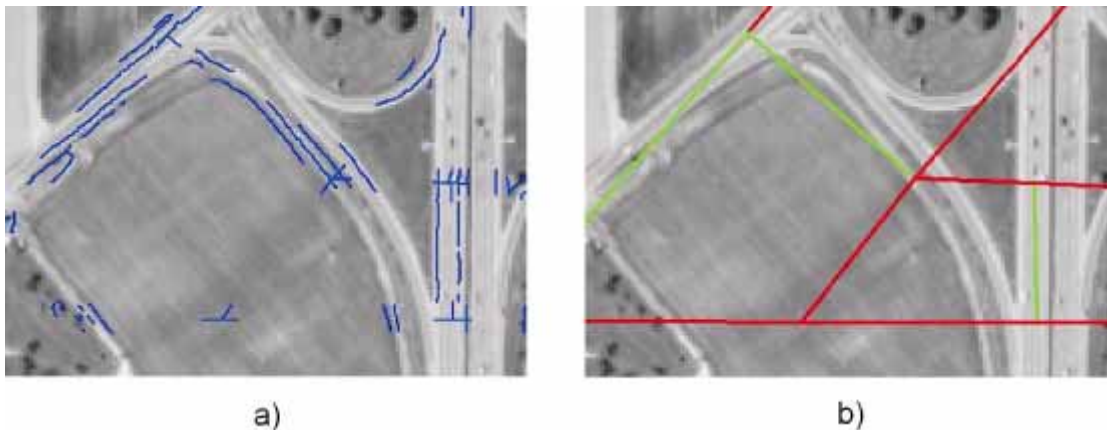


Abbildung 9 : Detailansicht für begründete „Fehlverifikation“ : a) Extraktionsergebnis (blau = extrahierte Liniensegmente), b) falsche ATKIS-Informationen im Orthofoto (rot = verworfen, grün = akzeptiert)

In Abbildung 9b ist zu erkennen, dass eigentlich falsche Straßenobjekte zufällig mit tatsächlich vorhandenen Straßen übereinstimmen. Folglich werden diese Straßenobjekte erfolgreich extrahiert (Abbildung 9a) und somit im Verifikationsprozess akzeptiert (Abbildung 9b). Hinzu kommt, dass vielfach linienhafte Strukturen entlang der gedrehten Straßen auftreten. Vor allem innerhalb urbaner Gebiete werden vom, für diese Region ungeeigneten, Extraktionsansatz vielfach Häuserreihen als korrekte Straßen akzeptiert. Auf Grund dieser zufälligen Extraktionen ist die Differenz der Resultate aus den beiden Parametersätzen für diesen Ansatz interessanter als die absolute Anzahl der akzeptierten Objekte. Bei den Straßenobjekten, die ausschließlich vom Verifikationsansatz mit den Parametern der Phase 2 akzeptiert wurden, führen die weich gewählten Kontrastparameter und die Überbrückung großer Extraktionslücken zu vielen Fehlverifikationen.

Infolge des inakzeptabel hohen Anteils an Fehlverifikationen beim toleranten Parametersatz wird deutlich, dass die angestrebte Steigerung der Effizienz mit einem immensen Verlust an Zuverlässigkeit einhergeht. Folglich kann der



tolerante Parametersatz nicht ausschließlich eingesetzt werden. Ob der Einsatz des zuvor beschriebenen zweistufigen Ansatzes sinnvoller ist, soll im weiteren Verlauf dieses Kapitels geklärt werden.

4.4.3. Auswahl der Objekte für die weitere Untersuchung

Den beiden Verifikationsmodulen wurden die entsprechenden Parametersätze der Phasen 1 und 2 zugewiesen. Darüber hinaus wurden typische topologische Eigenschaften des Straßennetzes definiert.

Um die Straßenobjekte für die Verifikation mit dem Parametersatz der Phase 2 auszuwählen, müssen die topologischen Eigenschaften in mathematische Formeln gefasst werden. Die im Vorfeld genannte Verbindungsfunktion führt zu einer mathematischen Berechnungsmöglichkeit, bei der die kürzeste Verbindung gesucht wird. Dies spiegelt die Tatsache wider, dass auch ein erfahrener Operateur bei der manuellen Verifikation immer eine möglichst direkte Verbindung zwischen zwei wichtigen Punkten sucht. Beim Straßenbau beziehen sich diese Aussagen auf die Reisezeit. Da jedoch nur Längenangaben in den Attributen der ATKIS-Objekte enthalten sind, werden diese alternativ verwendet. Somit wird die kürzeste Verbindung zwischen zwei Startpunkten im ATKIS Basis-DLM gesucht. Obwohl die Richtigkeit des Netzwerkes in der Datenbank nicht vollständig sicher ist, wird es genutzt, um Verknüpfungshypothesen zu formulieren. Im ATKIS Basis-DLM ist die Topologie des Straßennetzwerkes implizit dadurch gegeben, dass angrenzende Straßenobjekte einen gemeinsamen Knotenpunkt haben.

Zunächst werden die Startpunkte selektiert. Um isolierte *verworfen* / Straßen zu vermeiden, werden nur solche Kreuzungen als Startpunkte ausgewählt, die mindestens eine angrenzende *akzeptiert* / Straße aufweisen. Um Rechenzeit zu sparen, werden zusätzlich nur Startpunkte selektiert, denen auch eine *verworfen* / Straße zugeordnet werden kann.

Der nächste Schritt besteht darin, die kürzeste Verbindung zwischen den Startpunkten zu finden. Zu diesem Zweck wird der von [DUDA UND HART 1973] entwickelte A*-Algorithmus verwendet. Die Kanten werden mit der Länge der entsprechenden Straßenobjekte gewichtet. Dadurch sind die kürzeste Verbindung zwischen zwei Startpunkten innerhalb der Datenbank und die effizienteste Straßenverbindung äquivalent. Alle *verworfen* / Objekte die auf



kürzesten Wegen liegen, werden mit dem Parametersatz der Phase 2 erneut bewertet.

Das beschriebene Verfahren hat den folgenden Effekt :

- Alle *verworfen* / Objekte, die an beiden Seiten direkt mit *akzeptiert* / Objekten verbunden sind, werden in der Phase 2 wiederholt bewertet (Abbildung 10).

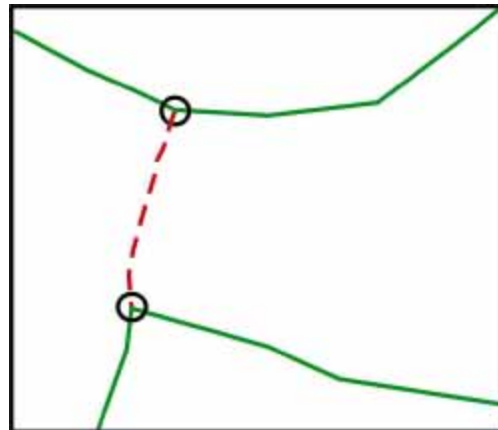


Abbildung 10 : 1. Beispiel für die Auswahl der Straßen für die zweite Bewertungsphase (grün = akzeptiert I, rot gestrichelt = verworfen I, Kreis = Startpunkte für A*)

- Wenn die Kombination einiger Straßenobjekte benachbarte Startpunkte in einem Weg verknüpft, der in der Gesamtlänge kürzer ist als eine Kombination aus *akzeptiert* / Objekten, werden alle diese Straßen ebenfalls mit dem toleranteren Parametersatz der Phase 2 bewertet (Abbildung 11).

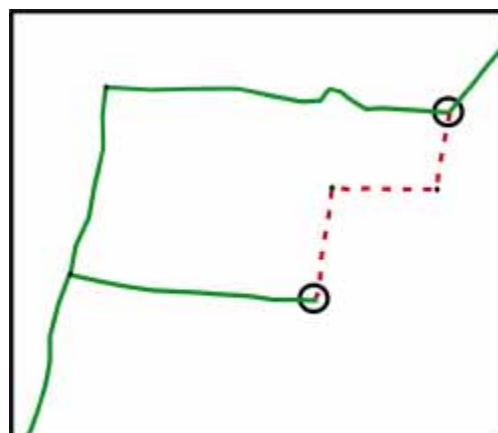


Abbildung 11 : 2. Beispiel für die Auswahl der Straßen für die zweite Bewertungsphase (grün = akzeptiert I, rot gestrichelt = verworfen I, Kreis = Startpunkte für A*, schwarze Punkte = Start- und Endpunkte der Objekte)



- Alle Objekte, die nur an einer Seite an das Straßennetz angeschlossen sind (Sackgassen), werden generell nicht mit den Parametern der Phase 2 bewertet. Als Sackgassen sind auch Objekte gemeint, die am Rand des betrachteten Bildausschnittes angeordnet sind (vgl. Kapitel 3.7.2.1.).

4.4.4. Zweite Untersuchung ausgewählter Objekte

Mit den in Kapitel 4.4.1. gewählten Parametern wird dann der Verifikationsprozess wiederholt. Die mit dem toleranten Parametersatz erfolgreich extrahierten Straßen werden als *akzeptiert* // Objekte gekennzeichnet. Die *verworfen* // Objekte sind farblich ebenfalls abgegrenzt. Auf Grund unzureichend entwickelter Extraktionsansätze für urbane und bewaldete Gebiete bleiben Siedlungs- und Waldgebiete unberücksichtigt.

In Abbildung 12 ist beispielhaft ein für die Verifikation verwendetes Orthofoto dargestellt. Dieses Orthofoto wurde für den verwendeten Verifikationsansatz auf eine Auflösung von ca. 1,5 m reduziert. Damit erscheint ein Großteil der Straßen als Linien. In Abbildung 13 ist ein Beispiel für ein Ergebnis des neu entwickelten topologiegestützten Systems zu sehen. Die blau gekennzeichnete Region bleibt beim Verifikationsprozess unberücksichtigt. Die anderen farblich markierten Elemente stellen die im ATKIS Basis-DLM enthaltenden Straßenobjekte dar. Die grün abgebildeten Straßen konnten auf Grund guter Kontrastbedingungen und guter Konformität zum verwendeten Straßenmodell bereits im Verifikationsprozess der Phase 1 sicher erkannt werden. Die gestrichelten Linien stellen topologisch sinnvolle Straßenverbindungen dar und wurden mit den Parametern der Phase 2 nochmals bewertet. Rot gekennzeichnete Straßen wurden nicht für die zweite Verifikationsphase ausgewählt. Die grün gestrichelten Linien sind Straßen, die nach der toleranteren Bewertung in Phase 2 akzeptiert wurden. Alle rot gestrichelt gekennzeichneten Straßen wurden trotz topologischer Rechtfertigung vom System verworfen. Alle rot dargestellten Objekte werden von einem Operateur einzeln kontrolliert und somit einer dritten Bewertung unterzogen.



Abbildung 12 : Das für den Bewertungsprozess beispielhaft genutzte Orthofoto

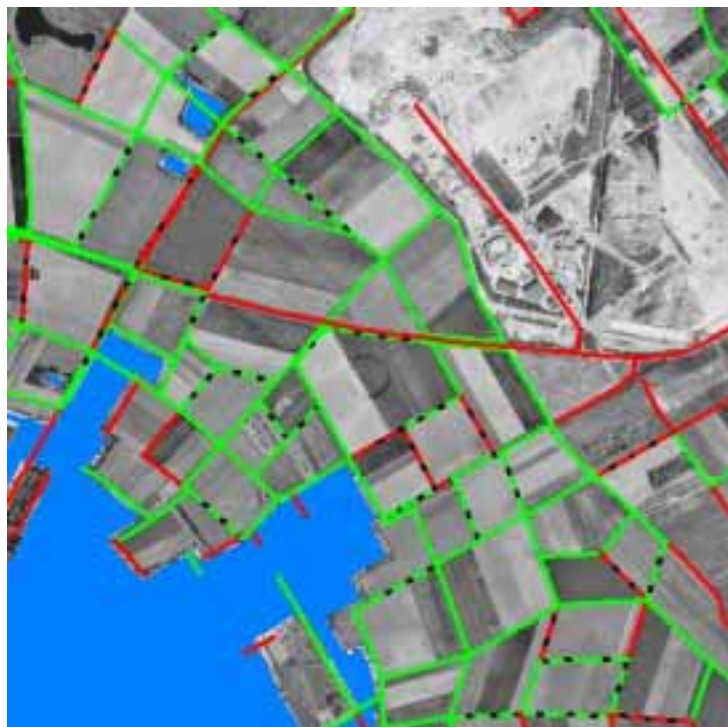


Abbildung 13 : Das Resultat der topologiegestützten Verifikation mit dem auflösungsreduzierten Orthofoto (blaue Region = Siedlungsgebiet, grün = akzeptiert I, rot = verworfen I, grünschwarz gestrichelte Linie = akzeptiert II, rotschwarz gestrichelte Linie = verworfen II)



4.5. Strategie zur Untersuchung der Ergebnisse des neuen Ansatzes

Um die Leistungsfähigkeit des präsentierten Ansatzes im Hinblick auf die eingangs vorgestellten Anforderungen bewerten zu können, ist es notwendig, einen unabhängigen *Referenzdatensatz* zu erzeugen. Dieser soll vor allem Aussagen zu den auftretenden Fehlern, den False-Positives und den False-Negatives, ermöglichen. In diesem Referenzdatensatz sollen nur Objekte enthalten sein, die mit der in ATKIS geforderten geometrischen Genauigkeit von 3 m tatsächlich im Orthofoto zu erkennen sind. Vom Landesvermessungsamt in Hessen wurden dafür Orthofotos, deren geometrische Lagegenauigkeit mit einem Meter angegeben wurde, zur Verfügung gestellt.

Die Richtigkeit der ATKIS-Datenbank differiert in einzelnen Szenen erheblich. Daher ist es notwendig, jede Szene des Testdatensatzes explizit zu untersuchen.

Für die Generierung des Referenzdatensatzes wurde die Software ArcInfo 8.0 verwendet. Der ATKIS-Datensatz wurde in den Referenzdatensatz kopiert und dieser dann über das jeweilige Orthofoto gelegt. Die Straßen, die nicht den ATKIS-Objekten mit der vorgegebenen 3 m Toleranz entsprachen, wurden aus dem Referenzdatensatz gelöscht. Objekte wurden auch gelöscht, wenn nur kleine Teile einer Straße außerhalb der von ATKIS geforderten 3 m Genauigkeit lagen. Hierbei wurde auch die nominelle geometrische Lagegenauigkeit des Orthofotos von 1 m berücksichtigt. Damit ist der Referenzdatensatz als sehr streng einzuschätzen und ermöglicht eine harte Bewertung des entwickelten Ansatzes.

Bei der Betrachtung in ArcInfo 8.0 fiel auf, dass vor allem die geometrische Genauigkeit in den einzelnen Szenen sehr stark differierte und das im gesamten Testgebiet kein Label-Error festgestellt werden konnte. Dies bedeutet, dass keine Fehlbezeichnung auftrat wie z.B. eine Stromleitung die als Straße im ATKIS Basis-DLM enthalten ist.

Der Referenzdatensatz wurde für ein Testgebiet in Hessen in zehn Bildern aus ATKIS-Daten der zweiten Erfassungsstufe generiert. Um den topologiegestützten Ansatz zu bewerten, wird das Verifikationsergebnis des originalen ATKIS-Datensatzes mit dem Referenzdatensatz verglichen. Dies ermöglicht eine Abgrenzung von False-Positives, False-Negatives, True-Positives und True-Negatives (vgl. Tabelle 1) und somit eine Aussage über die Leistungsfähigkeit des vorgestellten Ansatzes. Darüber hinaus sollen



an hand des Referenzdatensatzes die Ergebnisse bei ausschließlicher Verwendung eines der beiden Parametersätze (Phase 1 oder Phase 2) überprüft werden.

4.6. Untersuchung der Ergebnisse

Der präsentierte Ansatz wurde für eine Fläche von 40 km² und für 2356 Straßen- und Wegeobjekte getestet. Dabei wurden nur Straßen in der Kontextregion offene Landschaft betrachtet.

	Straßenobjekte	akzeptiert	verworfen
	in Anzahl	in Anzahl und (%)	in Anzahl und (%)
nach Phase 1	2356	1352 (57,4%)	1004 (42,6%)
nach Phase 2	550	307 (55,8%)	243 (44,2%)
Gesamt	2356	1659 (70,4%)	697 (29,6%)

Tabelle 3 : Resultate des topologiegestützten Ansatzes im Testgebiet, aufgeschlüsselt nach den beiden Verifikationsmodulen

In Tabelle 3 wird das Gesamtergebnis des topologiegestützten Systems dargestellt. Die Anzahl der akzeptierten Straßen wurde von 57 % nach Phase 1 auf 70 % nach Phase 2 erhöht. Die entscheidende Frage nach der Zuverlässigkeit des Systems kann durch die Betrachtung der aufgetretenen Fehler beantwortet werden. Hierfür soll in diesem Abschnitt vor allem der Anteil der False-Positives eingehend untersucht werden.

4.6.1. Vergleich des topologiegestützten Systems mit dem bisherigen System

Zur Bewertung der Ergebnisse des topologiegestützten Ansatzes soll ein Vergleich mit dem zuvor entwickelten System präsentiert werden. Dabei sind auch die Ergebnisse interessant, die das bisherige Systems mit den beiden modifizierten Parametersätzen erreichen kann. Aus diesem Grund wurden mittels des Referenzdatensatzes False-Positives, False-Negatives, True-Positives und True-Negatives für die Ergebnisse aus jedem Orthofoto berechnet.



a)

b)

Abbildung 14 : a) Resultate des bisherigen Systems mit dem strengen Parametersatz der Phase 1, b) Resultate des bisherigen Systems mit dem toleranten Parametersatz der Phase 2

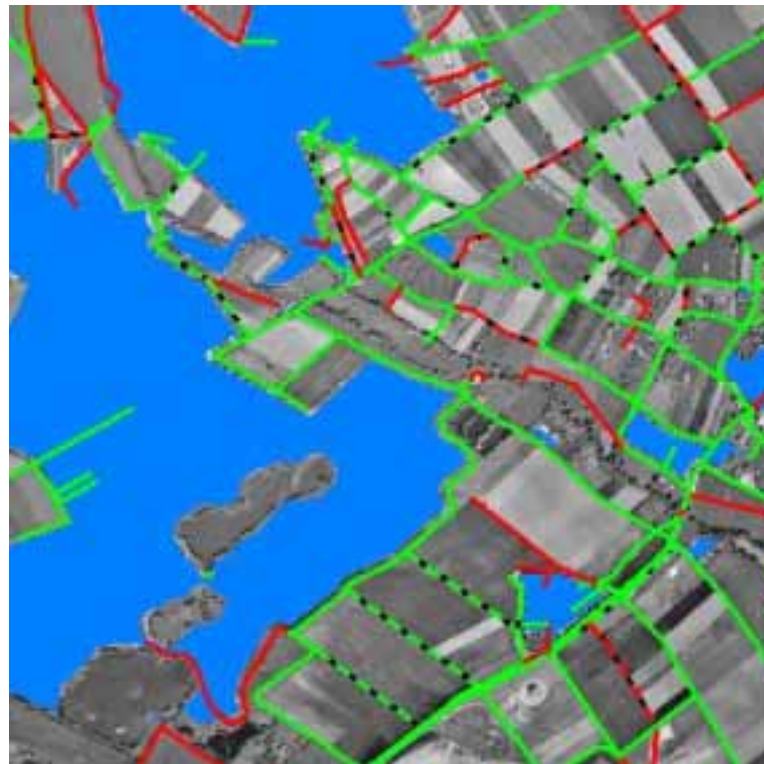


Abbildung 15 : Resultate des neu entwickelten topologiegestützten Systems mit den Parametersätzen für Phase 1 und Phase 2



Die Ergebnisse der drei folgenden Systeme wurden mittels des Referenzdatensatzes genau untersucht. :

- Für das bisherige System mit dem strengen Parametersatz der Phase 1
- Für das bisherige System mit dem toleranten Parametersatz der Phase 2
- Für das neu entwickelte topologiegestützte System mit den Parametersätzen für Phase 1 und Phase 2

Die unterschiedlichen Resultate der drei Tests sollen an hand der Abbildungen 14a, 14b und 15 exemplarisch für eine Szene veranschaulicht werden. Das in Abbildung 14a dargestellte Bild wurde ausschließlich mit den strengen Parametern bewertet und weist große Lücken im Netz auf. Dagegen erscheint das Straßennetz in Abbildung 14b, das ausschließlich mit dem toleranten Parametersatz der Phase 2 bewertet wurde, am vollständigsten. Ob dies auch der Forderung nach Zuverlässigkeit gerecht wird, soll im Folgenden geklärt werden.

Um die präsentierten Ergebnisse besser vergleichen zu können, ist es notwendig, die aufgetretenen Fehler isoliert zu betrachten. Dies soll im weiteren Verlauf dieses Abschnitts geschehen. Anschließend sollen die Endresultate explizit verglichen werden.

4.6.2. Analyse der False-Positives

Die wichtigste Aufgabe des neu entwickelten Systems ist es, eine hohe Zuverlässigkeit zu gewährleisten. Die Bewertung der Zuverlässigkeit wird durch die Betrachtung des Anteils an auftretenden False-Positives realisiert. In dem angestrebten operationell einzusetzenden System werden Positives nicht mehr durch einen Operateur kontrolliert. Damit sind False-Positives das Maß für die Zuverlässigkeit des gesamten Systems und sollten minimiert werden.

In Tabelle 4 wird die Anzahl der auftretenden False-Positives zwischen dem alten System mit den Parametersätzen der Phasen 1 und 2 und dem neu entwickelten topologiegestützten System verglichen. Dabei liegt der Anteil bei der Betrachtung mit dem strengen Parametersatz bei 0,85 %. Der topologiegestützte Ansatz liegt mit 1,53 % höher und die Ergebnisse mit dem



einfachen System und den toleranten Parametern sind mit fast 2,5 % sehr hoch. Die Unterschiede in den einzelnen Testreihen sind damit sehr deutlich.

BILD Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Gesamt
Parameter der 1. Phase (altes System)	8	0	1	0	2	1	5	3	0	0	20
Prozentual	2,8	0,0	0,6	0,0	0,7	0,5	2,7	1,3	0,0	0,0	0,85%
Parameter der 2. Phase (altes System)	15	3	4	0	6	3	9	13	4	1	58
Prozentual	5,5	1,4	2,3	0,0	2,1	1,5	4,9	5,8	1,3	0,3	2,46%
topologiegestützter Ansatz (neues System)	13	0	3	0	3	1	7	9	0	0	36
Prozentual	4,5	0,0	1,7	0,0	1,0	0,5	3,8	4,0	0,0	0,0	1,53%

Tabelle 4 : Auftreten von False-Positives in den verschiedenen Testreihen

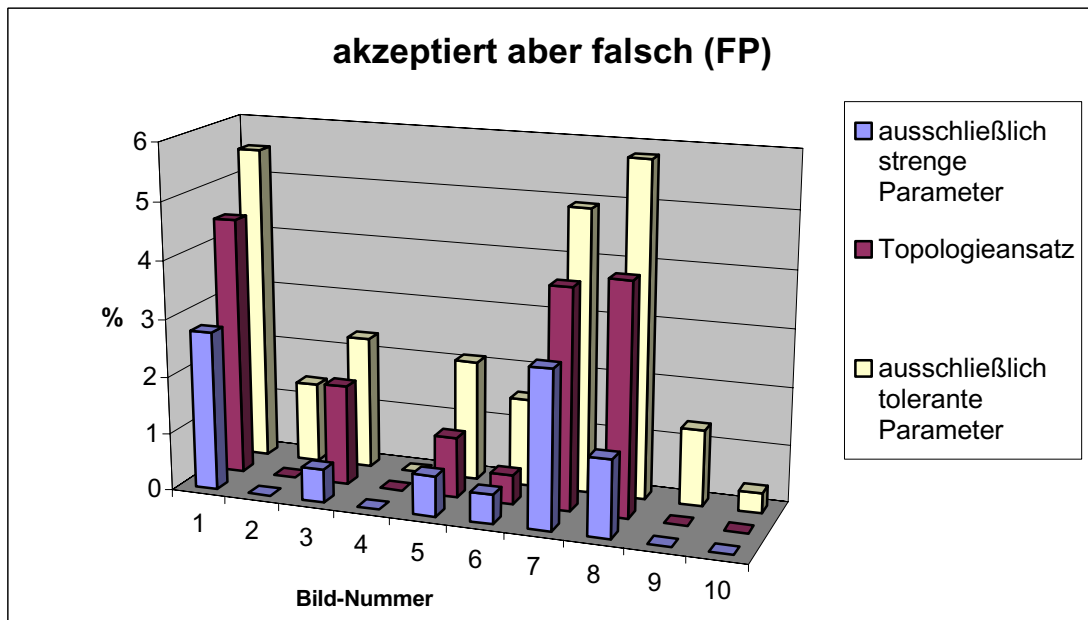


Abbildung 16 : Statistik für das Auftreten der False-Positives

In der Statistik in Abbildung 16 wird deutlich, dass die Anzahl der False-Positives in den jeweiligen Bildern stark variiert. Die Resultate des topologiegestützten Ansatzes ordnen sich zwischen den Ergebnissen der beiden anderen Testreihen ein.

False-Positives können verschiedene Ursachen haben. Interessant ist, welche Art dieser Fehler durch den topologiegestützten Ansatz minimiert oder sogar völlig herausgenommen werden und für welche Art der False-Positives es notwendig ist andere neue Ansätze zu entwickeln. Um dies zu klären, wurden die Ursachen für alle Fehler eingehend untersucht. Dies wurde für die Ergebnisse



aus dem topologiegestützten Ansatz genauso durchgeführt, wie für die Resultate des Vorgängersystems mit den beiden Parametersätzen der Phasen 1 und 2. Dabei konnten die vorkommenden False-Positives in die folgenden vier Klassen eingeteilt werden:

- **Die erste Fehlergruppe** : Das ATKIS-Straßenobjekt weist eine Ungenauigkeit in Lage von mehr als 3 m auf und wurde dennoch vom System akzeptiert. Die geforderte geometrische Genauigkeit für Objekte des Basis-DLM beträgt explizit 3 m.
- **Die zweite Fehlergruppe** : Das ATKIS-Straßenobjekt ist sehr kurz und falsch. Das System hat außer den Seed-Vektoren genug kurze Linien extrahiert, um die Straße als akzeptiert einzustufen.
- **Die dritte Fehlergruppe** : Andere Objekte, wie Zäune oder Baumreihen erscheinen straßenähnlich und erhalten eine so gute Bewertung im Extraktionsprozess, dass diese als Straße akzeptiert werden.
- **Die vierte Fehlergruppe** : Das falsche ATKIS-Straßenobjekt liegt entlang einer Ackerfurche oder Traktorspur. Diese wird als Straße bewertet und vom Verifikationsprozess fälschlicher Weise akzeptiert.

Jedes der fehlerhaft verifizierten Straßenobjekte wurde mehr oder weniger eindeutig einer der vier Gruppen zugeordnet. Einige False-Positives konnten nicht eindeutig klassifiziert werden, da diese Merkmale mehrerer Fehlergruppen aufwiesen. Hier erfolgte die Zuordnung gemäß des hervorstechenden Merkmals. Dies erfolgte durch eine Betrachtung der jeweiligen Extraktionsergebnisse, die irrtümlich zur positiven Bewertung der Straße führten. Die Resultate der Untersuchung werden in Tabelle 5 dargestellt.

Klassifizierung	ausschließlich	ausschließlich	Topologieansatz
	strenge Parameter	tolerante Parameter	mit beiden Parametersätzen
1. Fehlergruppe	15	27	22
2. Fehlergruppe	1	7	2
3. Fehlergruppe	1	14	4
4. Fehlergruppe	3	10	8

Tabelle 5 : Zuordnung der False-Positives zu verschiedenen Fehlergruppen



In Tabelle 5 fällt auf, dass die **erste Fehlergruppe** überall am häufigsten auftritt. Die Ursache liegt im Grundprinzip des verwendeten Extraktionsansatzes. Im ATKIS Basis-DLM wird die Mittelachse einer Straße grundsätzlich mit einer Genauigkeit von 3 m angegeben. Eine Überprüfung dieser Tatsache ist ein wichtiger Bestandteil der automatischen Qualitätskontrolle (vgl. 2. Kapitel). Dieses System generiert einen Buffer für die Straßenextraktion entlang der von ATKIS vorgegebenen Mittelachse des Straßenobjekts. Die jeweilige Bufferbreite für jede Seite der Mittelachse ergibt sich aus der Summe der zu überprüfenden geometrischen Genauigkeit von 3 m und der halben Straßenbreite (vgl. Kapitel 3.7.3.3.1.). Damit ist der Buffer größer als 3 m und das System kann die geometrische Genauigkeit von 3 m nicht explizit überprüfen. Alle innerhalb des Buffers erfolgreich extrahierten Straßen werden akzeptiert, obwohl sie eventuell einen inakzeptabel hohen Lagefehler aufweisen. Ein Beispiel für diese Situation soll Abbildung 17 aufzeigen. Darin wird gezeigt, dass der Weg vom System akzeptiert wird, obwohl dieser sich außerhalb der vorgegebenen 3 m Toleranz befindet.

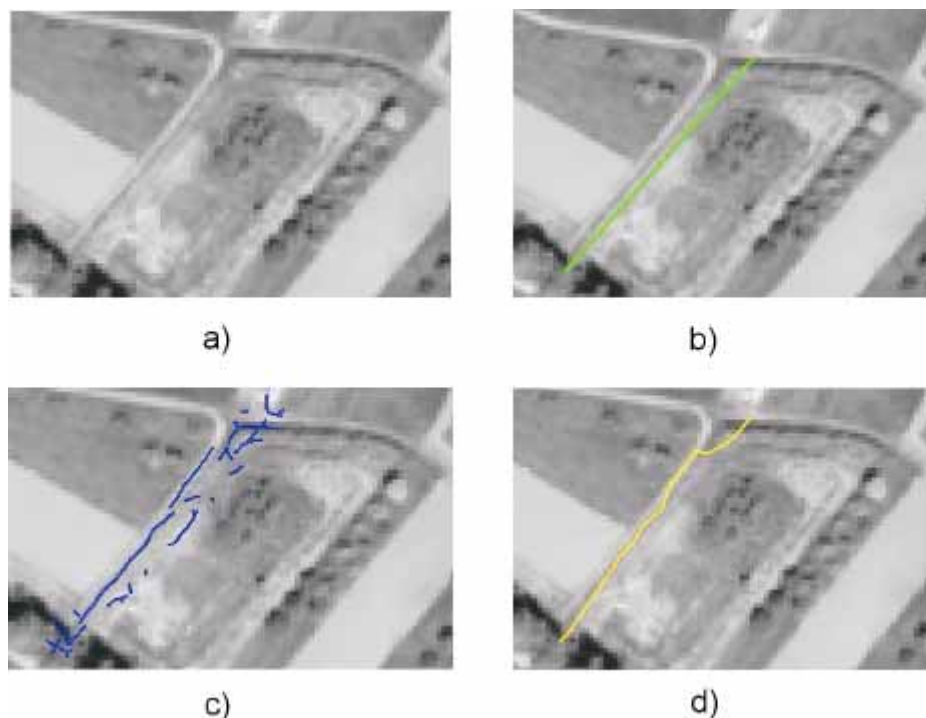


Abbildung 17 : Vergrößerte Detailansicht eines False-Positives durch eine zu groß gewählte Bufferbreite: a) Bildausschnitt, b) Bildausschnitt mit ATKIS-Objekt (grün = akzeptiertes Straßenobjekt), c) erstes Extraktionsergebnis (blau = linienhafte Objekte), d) Resultat der Gruppierung (gelb = Verknüpfung zu einer Linie)

In Abbildung 17a ist die aktuelle Situation in einem Bildausschnitt zu sehen. In Abbildung 17b ist an hand der farblich markierten Linie, die Lage des



ATKIS-Objektes gegenüber der aktuellen Situation dargestellt. Die Mittelachse des Weges befindet sich ca. 5 m entfernt von dem entsprechenden ATKIS-Objekt und sollte somit verworfen werden. In Abbildung 17d wird ersichtlich, dass der Weg dennoch erfolgreich extrahiert (Abbildung 17c) und gruppiert werden konnte.

Befindet sich eine Straße außerhalb dieses zu großen Buffers kommt es dennoch wiederholt zu Fehlextraktionen. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass sich oft parallel zur Straße linienhafte Objekte wie Gräben oder Böschungsschatten befinden. Kann der Extraktionsalgorithmus daraus eine lange Linie rekonstruieren, wird diese Straße positiv bewertet. Eine Unterscheidung zwischen der richtigen Mittellinie und parallelen linienhaften Objekten, ist im Extraktionsansatz nicht implementiert.

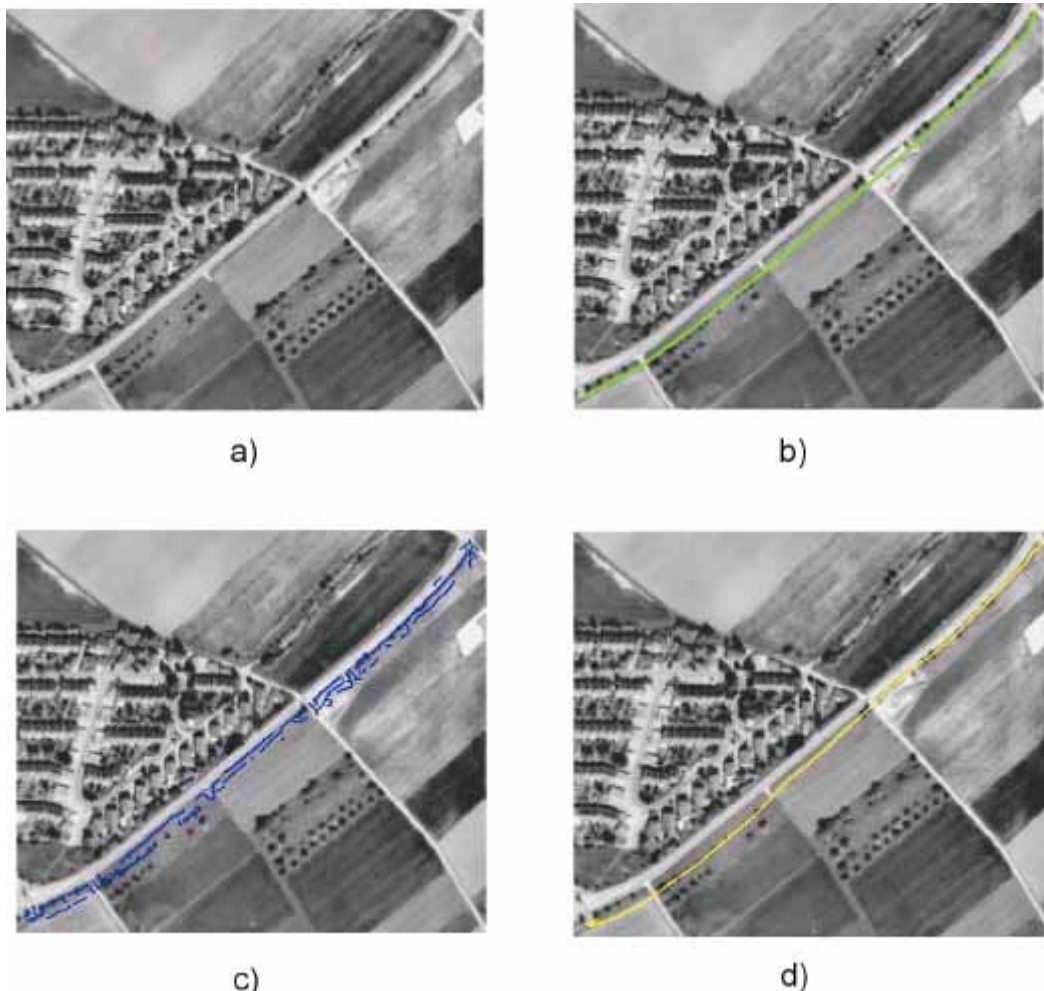


Abbildung 18 : Detailansicht eines False-Positives durch Extraktion von parallelen Objekten : a) Bildausschnitt, b) Bildausschnitt mit ATKIS-Objekt (grün = akzeptiertes Straßenobjekt) c) erstes Extraktionsergebnis (blau = linienhafte Objekte), d) Resultat der Gruppierung (gelb = Verknüpfung zu einer Linie)



In Abbildung 18 wird hierzu ein Beispiel präsentiert. Dabei wird in Abbildung 18a wiederum die aktuelle Situation dargestellt. In Abbildung 18b wird deutlich, dass die weit außerhalb des Buffers liegende Straße (ca. 7 m Lagefehler gegenüber der Mittelachse) auf Grund ihrer linienhaften Randbebauung (Abbildungen 18c und 18b) vom Verifikationsansatz als korrektes ATKIS-Objekt akzeptiert wird.

Die False-Positives der ersten Fehlergruppe treten in allen drei Testreihen ähnlich häufig auf. Die Wahl der Parameter hat kaum Einfluss auf ihre Anzahl. Dies ist ein Problem des allgemeinen Ansatzes des Systems und kann somit nicht durch eine topologiegestützte Betrachtung gelöst werden. Hierfür müssen Veränderungen im Extraktionsansatz vorgenommen werden, z.B. eine Betrachtung in höherauflösenden Bildern, um so eine Unterscheidung zwischen der Mittelachse einer Straße und ihrer Randbebauung zu ermöglichen.

Die zweite Fehlergruppe betrifft sehr kurze Straßenobjekte. Zu derartigen Fehlern kommt es, weil der Extraktionsalgorithmus an den beiden Endpunkten des ATKIS-Objektes jeweils einen kleinen Startvektor (Seed-Vektor) in Richtung des jeweils anderen Punktes generiert (vgl. Kapitel 3.7.3.3.1.). Das Objekt sollte verworfen werden, wenn keine Linien extrahiert wurden. Da die generierten Seed-Vektoren eine konstante Länge haben, ist deren Längenanteil bei sehr kurzen Objekten entsprechend hoch. Folglich werden bei diesen Objekten primär die Seed-Vektoren bewertet und nicht die extrahierten Liniensegmente. Diese Fehlergruppe tritt hauptsächlich in der Testreihe mit dem toleranten Parametersatz auf. Grund hierfür ist, dass mit diesem Parametersatz relativ große Lücken überbrückt werden. In der Testreihe mit dem strengen Parametersatz trat der Fehler nur einmal auf.

Die Abbildung 19a ist stark vergrößert und zeigt ein sehr kurzes (ca. 8 m) ATKIS-Objekt im Orthofoto. In Abbildung 19b sind die extrahierten Liniensegmente und die beiden bereits verbundenen Seed-Vektoren zu erkennen. Als Resultat des Extraktionsprozesses bleiben, wie in Abbildung 19c zu sehen, nur die Seed-Vektoren. In Ermangelung der beiden Vektoren wäre auf Grund der nicht gleichmäßig orientierten Liniensegmente keine Straße rekonstruiert worden. Da hier (Abbildung 19) ausschließlich die Seed-Vektoren bewertet wurden, kam es zu einer Fehlverifikation durch den strengen Parametersatz der Phase 1.

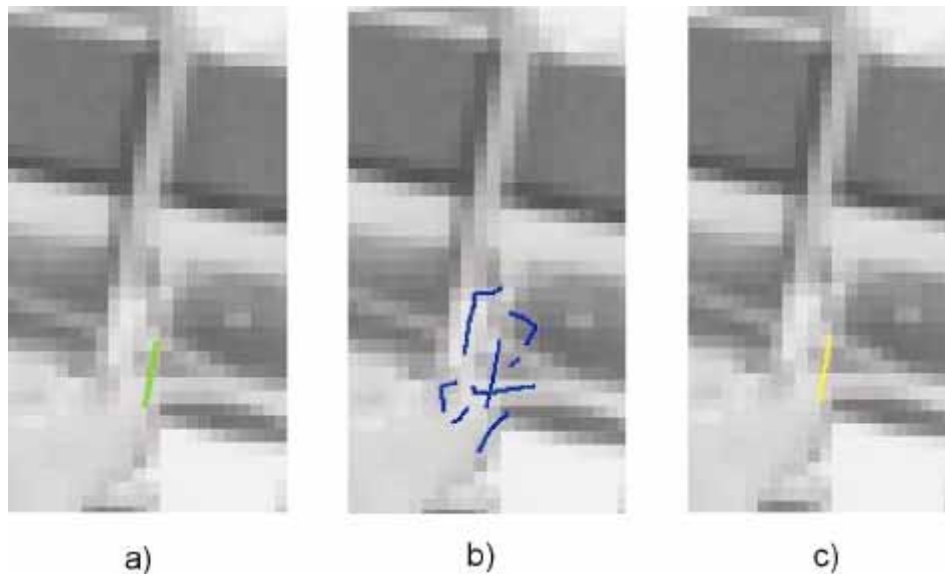


Abbildung 19 : Stark vergrößerte Detailansicht eines False-Positives : a) Bildausschnitt mit ATKIS-Objekt (grün = akzeptiertes Straßenobjekt), b) erstes Extraktionsergebnis (blau = linienhafte Objekte und Seed-Vektoren), d) Resultat der Gruppierung (gelb = Seed-Vektoren)

Das fälschlich akzeptierte ATKIS-Objekt ist so kurz, dass zwischen den Seed-Vektoren keine Lücke vorhanden ist. In den anderen Fällen konnte der Einsatz des topologiegestützten Ansatzes das Auftreten solcher Fehler weitestgehend verhindern. Ein Grund für das gute Abschneiden der topologisch gestützten Betrachtungsweise ist der Tatsache geschuldet, dass kurze Objekte hauptsächlich am Rand der Bilder auftreten (Straßenobjekte wurden abgetrennt) und somit keine Verbindung zu zwei akzeptierten Straßenobjekten haben können. Diese Objekte werden daher nicht mittels des toleranten Parametersatzes überprüft, der sich in dieser Fehlergruppe als besonders ungünstig erwiesen hat.

In Abbildung 20 wird dargestellt, wie ein sehr kurzes Objekt mittels der verschiedenen Parametersätze unterschiedlich bewertet wird. Dabei wird in Abbildung 20a die aktuelle Situation in einem Bildausschnitt verdeutlicht. Abbildung 20b zeigt die extrahierten Liniensegmente und Abbildung 20c die Gruppierungsergebnisse mit dem strengen Parametersatz. Hier werden die Lücken nicht geschlossen und das Straßenobjekt wird folgerichtig verworfen. In Abbildung 20d ist die Gruppierungsphase des toleranten Parametersatzes dargestellt. Alle Lücken werden geschlossen und das falsche ATKIS-Objekt wird irrtümlich akzeptiert. Im topologiegestützten Ansatz wurde dieses Objekt nicht für die zweite Phase ausgewählt und folgerichtig verworfen.

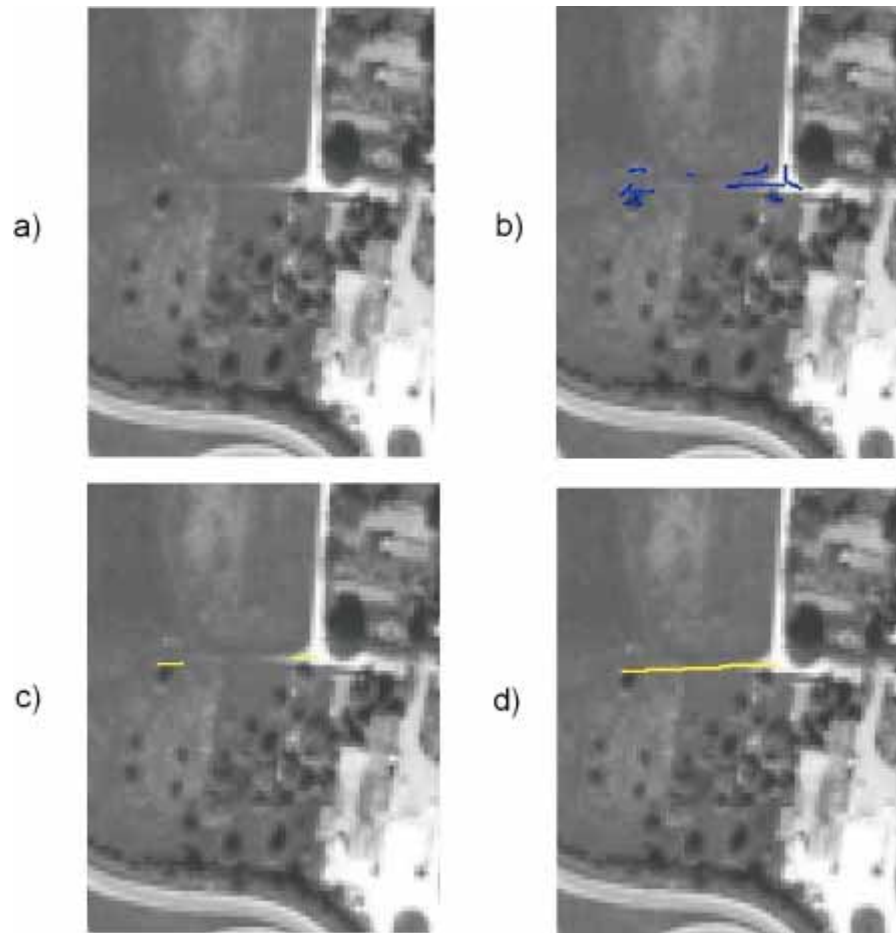


Abbildung 20 : Detailansicht eines False-Positives : a) Bildausschnitt, b) erstes Extraktionsergebnis (blau = linienhafte Objekte) c) Resultat der Gruppierung mit den Parametern der Phase 1 (gelb = Verknüpfung der extrahierten Liniensegmente) d) Resultat der Gruppierung mit den Parametern der Phase 2 (gelb = Verknüpfung zu einer Linie)

Die Ursache für die auftretenden False-Positives der **dritten Fehlergruppe** ist eine Schwäche des Extraktionsmodells. Dies berücksichtigt die Modellierung des lokalen Kontextes nicht in einem ausreichenden Umfang (vgl. Kapitel 3.7.3.2.). Objekte wie Baumreihen oder Zäune werden nicht explizit modelliert und somit als Liniensegmente im Gruppierungsprozess mit Straßensegmenten verbunden. Da Baumreihen oder Zäune meist parallel zu Straßen liegen, ist eine Extraktion dieser Objekte zur Überbrückung von überdeckten Straßenabschnitten oft von Vorteil. Befindet sich jedoch keine Straße in deren Nachbarschaft treten False-Positives auf. Bei der Untersuchung fiel auf, dass vor allem das System mit dem toleranten Parametersatz, sehr sensibel gegenüber dieser Fehlerklasse ist. Ein Grund hierfür ist wiederum die Lückenüberbrückung in der Gruppierungsphase aber auch die Herabsetzung der Kontrastparameter. Baumreihen haben oft einen schwächeren Kontrast gegenüber ihrer Umgebung als dies bei Straßen der Fall ist. Die Stärke des



topologiegestützten Ansatzes kommt hier voll zum Tragen (vgl. Tabelle 5). In den hier untersuchten zehn Bildern befinden sich, die dieser Fehlergruppe zugeordneten Objekte, oft in topologischer Nachbarschaft zu fehlerhaften und damit verworfenen ATKIS-Objekten. Folglich werden diese nicht für eine Verifikation mit den toleranteren Parametern der Phase 2 ausgewählt und somit zu Recht verworfen.

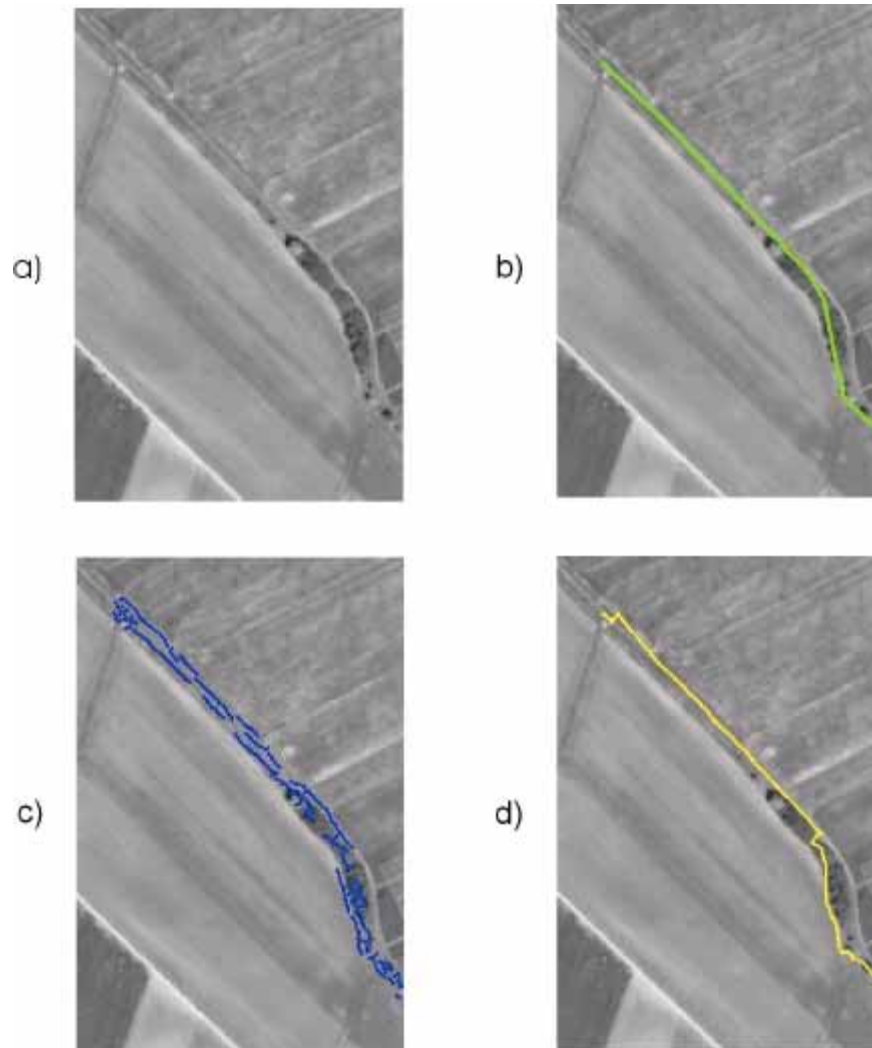


Abbildung 21 : Detailansicht eines False-Positives durch mangelnde Betrachtung des lokalen Kontexts : a) Bildausschnitt, b) Bildausschnitt mit ATKIS-Objekt (grün = akzeptiertes Straßenobjekt) c) erstes Extraktionsergebnis (blau = linienhafte Objekte),d) Resultat der Gruppierung (gelb = Verknüpfung zu einer Linie)

In Abbildung 21 wird ein Beispiel für die dritte Fehlergruppe dargestellt. Darin zeigt Abbildung 21a den derzeitigen Verlauf einer Straße. In Abbildung 21b wird deutlich, dass das im ATKIS Basis-DLM enthaltene Straßenobjekt im südlichen Bereich quer über eine Baumreihe verläuft. In Abbildung 21c sind Liniensegmente zu sehen, die auf der Baumreihe und am Rand der selbigen



extrahiert wurden. In der Gruppierungsphase, die in Abbildung 21d dargestellt ist, werden diese Liniensegmente zu einer Linie verknüpft. Folglich wurde dieses Objekt positiv bewertet. In der Testreihe mit den strengeren Parametern und im topologiegestützten Ansatz wurde dieses fehlerhafte ATKIS-Objekt verworfen.

Die **vierte Fehlergruppe** tritt auf, weil Ackerfurchen oder Traktorspuren in hohem Maße dem verwendeten Straßenmodell entsprechen. Selbst ein Mensch würde kaum einen kleinen Feldweg von einer auf dem Feld befindlichen Traktorspur unterscheiden können, wenn sich der sichtbare Bildausschnitt auf den für die Extraktion genutzten Buffer beschränkt. Ein Mensch bezieht in einer solchen Situation die Betrachtung der weiteren Umgebung mit ein und gelangt somit zu einer richtigen Entscheidung. Die Umgebung wird bei dem verwendeten Extraktionsalgorithmus jedoch nicht berücksichtigt. Ein entsprechendes Beispiel für eine solche Situation wird in Abbildung 22 dargestellt.

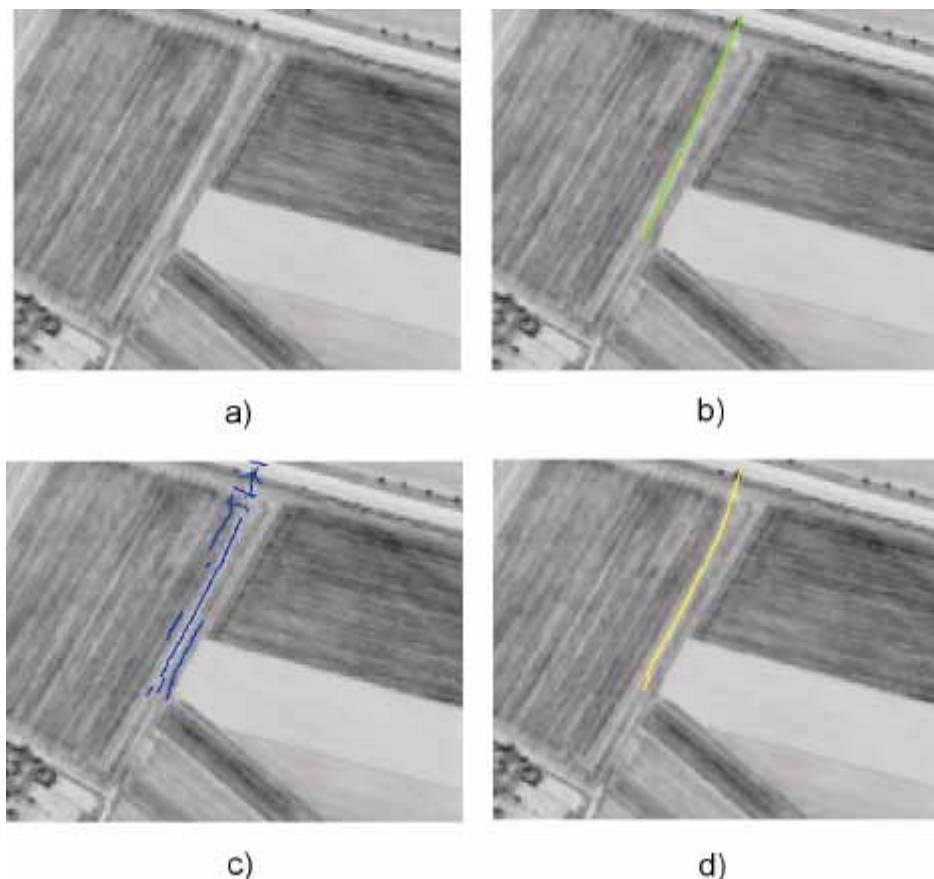


Abbildung 22 : Detailansicht eines False-Positives durch Mängel des verwendeten Straßenmodells : a) Bildausschnitt, b) Bildausschnitt mit ATKIS-Objekt (grün = akzeptiertes Straßenobjekt) c) erstes Extraktionsergebnis (blau = linienhafte Objekte), d) Resultat der Gruppierung (gelb = Verknüpfung zu einer Linie)



Abbildung 22a macht in einem Bildausschnitt die derzeitige Situation deutlich. In Abbildung 22b ist zu erkennen, dass das in der ATKIS-Datenbank gespeicherte Objekt in seiner Lage deutlich von dem entsprechenden Weg abweicht. Das ATKIS-Objekt befindet sich zufällig entlang einer Traktorspur des angrenzenden Feldes. Das in Abbildung 22c dargestellte Extraktionsergebnis zeigt viele, entlang des ATKIS-Objektes gefundene Liniensegmente, die durch die Extraktion der Spur und einiger Ackerfurchen bedingt sind. An hand von Abbildung 22d wird deutlich, wie diese zu einer langen Linie verknüpft und damit vom Verifikationsansatz akzeptiert wurden.

Die dieser Fehlergruppe zugeordneten False-Positives konnten durch den topologiegestützten Ansatz nicht eindeutig minimiert werden. Sie treten hauptsächlich auf, wenn die Kontrastbedingungen allgemein gut sind. Sie stellen ein generellen Problem des Extraktionsansatzes dieses Systems dar.

Nach eingehender Betrachtung der einzelnen Fehlergruppen ist es möglich, den neu entwickelten Ansatz in erster Instanz zu bewerten. Als oberste Priorität wurde die Steigerung der Zuverlässigkeit und damit die Minimierung der False-Positives angestrebt. Insgesamt ist dies zwar gelungen aber es wurde auch deutlich, dass das Auftreten bestimmter Fehler nur durch eine Weiterentwicklung des Extraktionsansatzes verhindert werden kann. Hierzu gehört vor allem die erste Fehlergruppe. Würde ein Extraktionsalgorithmus, der Abweichungen über 3 m explizit erfassen könnte, in das topologiegestützte System implementiert, wäre der Anteil der False-Positives unter 0,6 %. Bei Betrachtung der anderen Fehlergruppen wird klar, dass der neue Ansatz eine erhebliche Verringerung der Fehler 2. Ordnung ermöglicht.

4.6.3. Analyse der False-Negatives

Hinter der Forderung nach einer hohen Zuverlässigkeit, steht die Anforderung an eine Steigerung der Effizienz an zweiter Stelle. Ein Operateur muss alle verworfenen Straßenobjekte nochmals kontrollieren und somit sollte der Anteil der zu Unrecht verworfenen Objekte minimiert werden.

In Tabelle 6 wird in einer Statistik der Anteil der False-Negatives in den jeweiligen Testreihen angegeben. Verglichen mit der einfachen Verifikation mit dem strengen Parametersatz wurde der Anteil an False-Negatives von rund 40 % auf 27 % mittels der topologiegestützten Verifikation gesenkt. Um weitere



10 % geringer ist der Anteil der False-Negatives bei der Verifikation mit den toleranteren Parametern.

BILD Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Gesamt
Parameter der 1. Phase (altes System)	120	73	77	98	93	93	65	65	127	122	933
Prozentual	41,4	34,0	44,8	50,3	32,5	47,2	35,5	29,0	41,9	41,9	39,60%
Parameter der 2. Phase (altes System)	53	44	23	42	48	47	27	22	47	55	408
Prozentual	18,3	20,5	13,4	21,5	16,8	23,9	14,8	9,8	15,5	18,9	17,32%
topologiegestützter Ansatz (neues System)	84	56	38	73	65	73	42	40	81	90	642
Prozentual	29,0	26,0	22,1	37,4	22,7	37,1	23,0	17,9	26,7	30,9	27,25%

Tabelle 6 : Auftreten von False-Negatives in den verschiedenen Testreihen

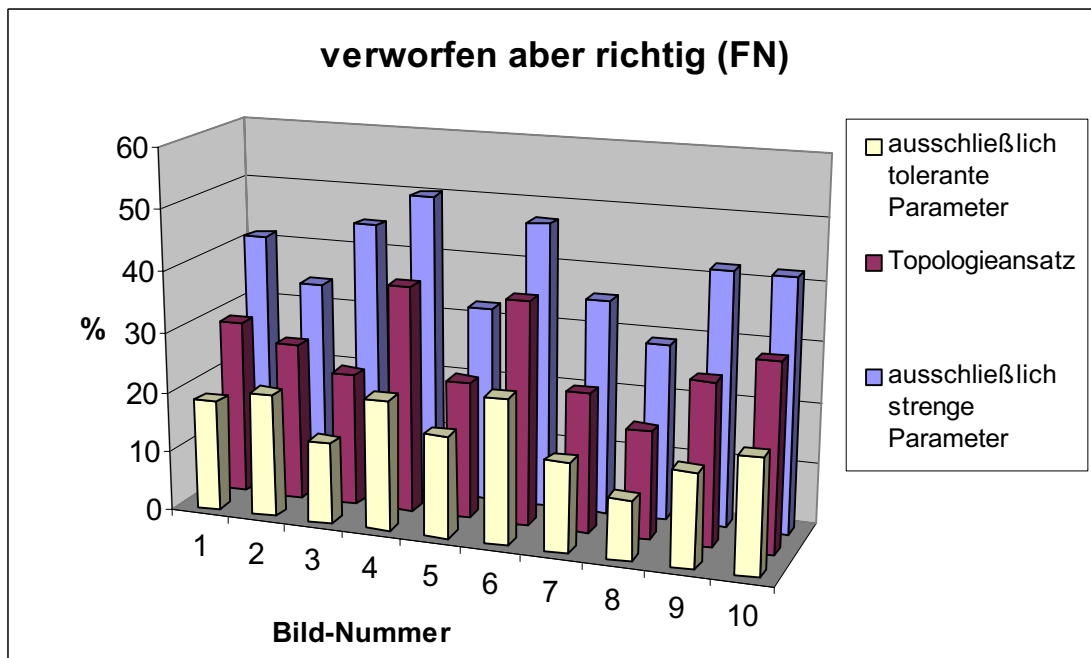


Abbildung 23 : Statistik für das Auftreten der False-Negatives

Wie an hand der Statistik in Abbildung 23 zu erkennen, ist der Anteil der False-Negatives in allen Bildern relativ homogen. In diesem Diagramm wird deutlich, dass sich der topologiegestützte Ansatz in etwa zwischen den beiden anderen Testreihen einordnet.

Als Hauptursache für die False-Negatives wurden im Vorfeld schlechte Kontrastbedingungen genannt und somit wurde der tolerante Parametersatz entsprechend definiert. Als Resultat konnte der Anteil an False-Negatives gesenkt werden. Ähnlich verhält es sich mit den auftretenden Lücken. Ein Teil der False-Negatives entsteht, weil das für den Extraktionsalgorithmus



verwendete Straßenmodell das in Kapitel 4.4.1. beschriebene Stufenmodell nicht berücksichtigt. Dieser Anteil konnte folglich nicht durch den Topologieansatz minimiert werden.

4.6.4. Analyse der True-Positives

True-Positives und True-Negatives stehen in Zusammenhang mit den zuvor beschriebenen False-Positives und False-Negatives und sind tendenziell daraus ableitbar. Dennoch lohnt auch eine Betrachtung dieser positiven Ergebnisse der drei Testreihen.

True-Positives kennzeichnen die Straßenobjekte des ATKIS Basis-DLM, die im Verifikationsprozess akzeptiert wurden und auch tatsächlich unverändert und mit der entsprechenden Lagegenauigkeit im Luftbild enthalten sind. Dies sind Objekte, die zu Recht von einem Operateur nicht weiter betrachtet werden müssen und kennzeichnen damit den Automatisierungsgrad des Systems. Eine Maximierung von True-Positives ist das Ziel jedes Systems zur automatischen Qualitätskontrolle.

BILD Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Gesamt
Parameter der 1. Phase (altes System)	148	135	89	96	179	98	108	142	170	167	1332
Prozentual	51,0	62,8	51,7	49,2	62,6	49,7	59,0	63,4	56,1	57,4	56,54%
Parameter der 2. Phase (altes System)	215	164	143	152	224	144	146	185	250	234	1857
Prozentual	74,1	76,3	83,1	77,9	78,3	73,1	79,8	82,6	82,5	80,4	78,85%
topologiegestützter Ansatz (neues System)	184	152	128	121	207	118	131	167	216	199	1623
Prozentual	63,4	70,7	74,4	62,1	72,4	59,9	71,6	74,6	71,3	68,4	68,89%

Tabelle 7 : Auftreten von True-Positives in den verschiedenen Testreihen

Eine Statistik der True-Positives ist in Tabelle 7 dargestellt. Mit dem topologiegestützten Ansatz konnte der Anteil der True-Positives von 57 % beim einfachen Verifikationsansatz mit den strengen Parametern auf 79 % erhöht werden. Der Anteil beim einfachen Verifikationsansatz mit den toleranten Parametersatz liegt um weitere 10 % höher. Damit liegt der neu entwickelte Ansatz schon annähernd im Bereich des alten Systems mit den toleranten Parametern, obwohl, wie zuvor gezeigt, die Zuverlässigkeit beim topologiegestützten System entscheidend höher ist.

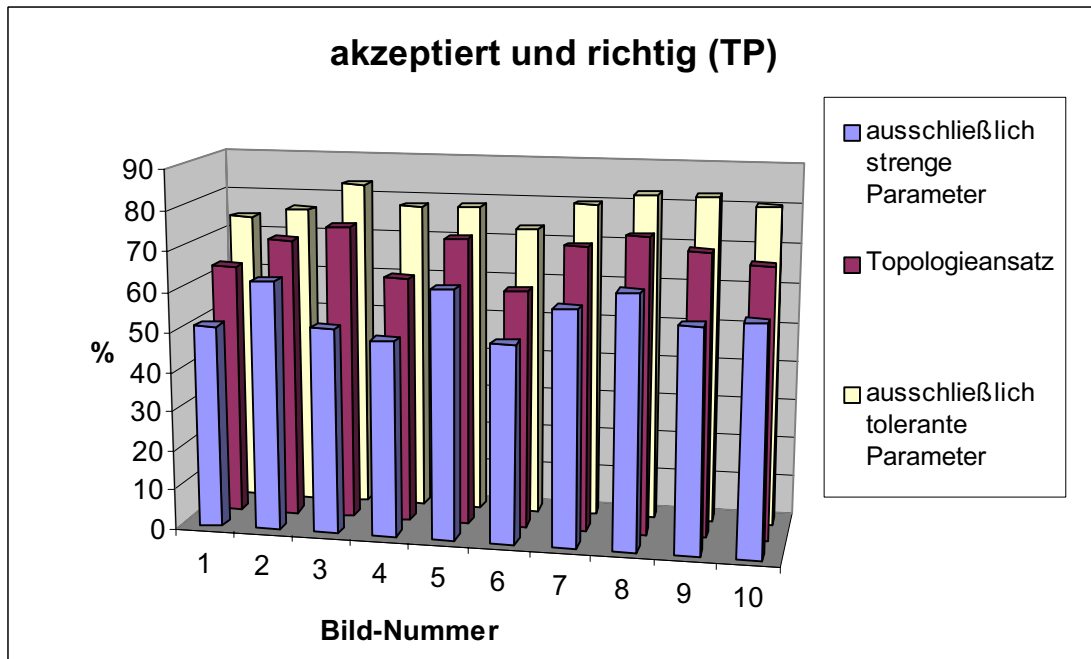


Abbildung 24 : Statistik für das Auftreten der True-Positives

Abbildung 24 zeigt die statistische Verteilung der True-Positives in den verschiedenen Testreihen und den zehn getesteten Bildern. Der annähernd parallele Verlauf der True-Positives in den drei Testreihen zeigt, dass das Verhältnis vom Bild unabhängig ist. Die Stichprobe scheint somit ausreichend repräsentativ.

4.6.5. Analyse der True-Negatives

Treten Unterschiede zwischen den im ATKIS Basis-DLM enthaltenden Straßenobjekten und den entsprechen Straßen im Luftbild auf und werden diese vom Verifikationsansatz auch verworfen, werden diese als True-Negatives bezeichnet.

BILD Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Gesamt
Parameter der 1. Phase (altes System)	14	7	5	1	12	5	5	14	6	2	71
Prozentual	4,8	3,3	2,9	0,5	4,2	2,5	2,7	6,3	2,0	0,7	3,01%
Parameter der 2. Phase (altes System)	6	4	2	1	8	3	1	4	2	1	32
Prozentual	2,1	1,9	1,2	0,5	2,8	1,5	0,5	1,8	0,7	0,3	1,36%
topologiegestützter Ansatz (neues System)	9	7	3	1	11	5	3	8	6	2	55
Prozentual	3,1	3,3	1,7	0,5	3,8	2,5	1,6	3,6	2,0	0,7	2,33%

Tabelle 8 : Auftreten von True-Negatives in den verschiedenen Testreihen



Eine Statistik der True-Negatives ist in Tabelle 8 dargestellt. Der Anteil an True-Negatives ist beim einfachen System mit dem toleranten Parametersatz unter 1,4 %. Mit ca. 2,3 % ist der Anteil beim topologiegestützten System deutlich höher. Das einfache System mit dem strengen Parametersatz weist mit 3,0 % einen nochmals höheren Anteil an True-Negatives auf. Am Gesamtergebnis gemessen ist der Anteil an True-Negatives sehr gering. Dennoch treten True-Negatives kontinuierlich in jeder der getesteten Szenen auf.

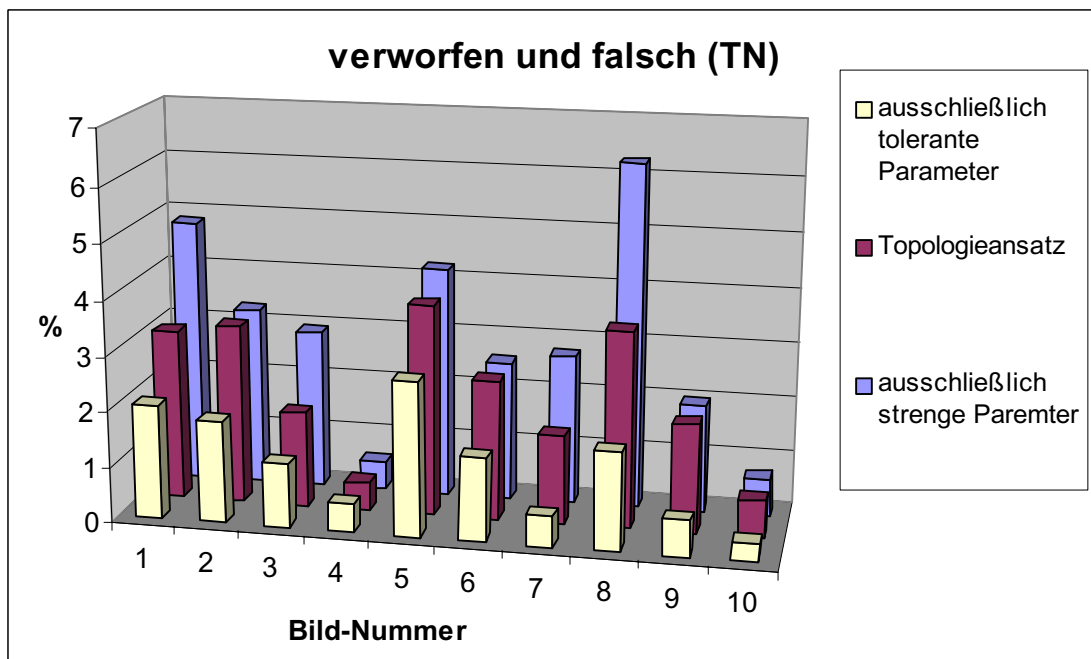


Abbildung 25 : Statistik für das Auftreten der True-Negatives

In Abbildung 25 ist deutlich zu erkennen, dass sich das topologiegestützte System, bezogen auf die True-Negatives, sehr an den Ergebnissen des strengen Parametersatzes orientiert. Einzig im Bild mit der Nummer acht treten stärkere Differenzen auf. In vier der zehn Bilder bleibt der Anteil der True-Negatives jedoch absolut identisch. Insgesamt ist dies ein sehr gutes Resultat für den topologiegestützten Ansatz.

4.6.6. Diskussion der Ergebnisse

Das neu entwickelte topologiegestützte System zur automatischen Qualitätskontrolle von Daten des ATKIS Basis-DLM wurde in diesem Kapitel vorgestellt und getestet. Ausschlaggebend für die Entwicklung dieses Systems



war die Forderung nach einer Steigerung der Zuverlässigkeit und die Erhöhung der Effizienz. Diesbezüglich stellt das System einen Kompromiss zwischen dem einfachen Ansatz mit den strengen und den toleranten Parametern dar.

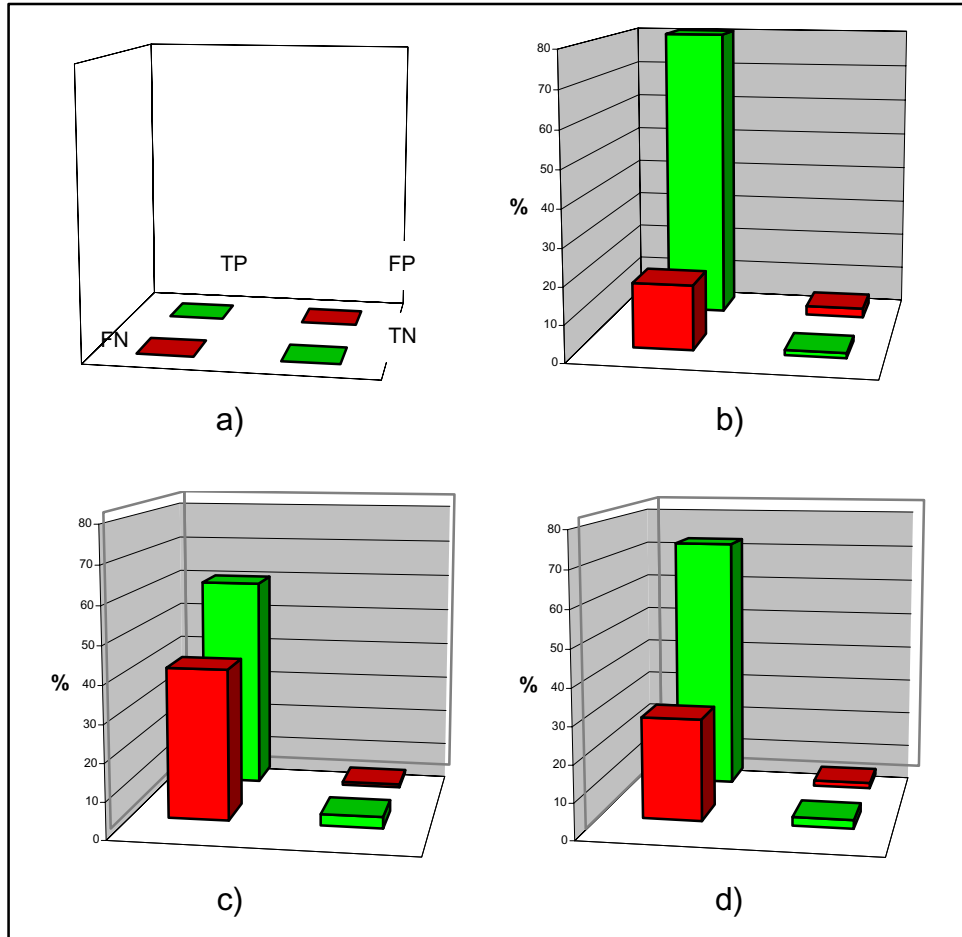


Abbildung 26 : Zusammenfassung der Ergebnisse aller Testreihen : a) Legende mit Zuweisung True-Positives (TP), False-Positives (FP), False-Negatives (FN) und True-Negatives (TN), b) Resultate der Testreihe des einfachen Systems mit den toleranten Parametern, c) Resultate der Testreihe des einfachen Systems mit den strengen Parametern, d) Resultate des Topologieansatzes

An hand der Diagramme in Abbildung 26 wird deutlich, dass die im alten System verwendeten Parametersätze ihre Stärken in verschiedenen Bereichen haben. So sind die Resultate des einfachen Systems mit den strengen Parametersatz zwar in Bezug auf die geforderte Zuverlässigkeit sehr gut aber die Effizienz ist vergleichsweise niedrig. Umgekehrt verhält es sich beim alten System mit dem toleranten Parametersatz. Hier wurden weniger als die Hälfte der veränderten Objekte erkannt. Die Resultate des Topologieansatzes sind



zwischen den beiden anderen Testreihen einzuordnen aber mit einer deutlichen Tendenz in Richtung der jeweiligen Stärken der beiden Parametersätze.

Die Fehlerquote betrug im Testgebiet fast 4 %. Der topologiegestützte Ansatz bewertete fast 2,5 % der ATKIS-Daten zu Recht als verworfen. Damit würden 1,5 % der ATKIS-Datenbank weiterhin fehlerhaft bleiben. Dieser, als relativ hoch einzuschätzende Anteil, ist bei der Betrachtung der Fehleranalyse, größtenteils grundsätzlichen Mängeln der verwendeten Extraktionssoftware zuzuschreiben. Um den Anteil der nicht detektierten Fehler in der ATKIS-Datenbank unter 0,3 % zu senken, ist eine Weiterentwicklung des Extraktionsansatzes notwendig. Diese Weiterentwicklung muss eine explizite Bewertung der 3 m Lagegenauigkeit der Objekte ermöglichen und eine verbesserte Unterscheidung zwischen Ackerfurchen, Traktorspuren und Feldwegen enthalten. Probleme der Extraktionssoftware mit kurzen Objekten oder straßenähnlichen linienhaften Strukturen konnten durch den Topologieansatz kompensiert werden.

Ein Operateur muss bei der Verwendung des topologisch gestützten Systems rund 30 % der ATKIS-Objekte überprüfen. Damit konnte die Effizienz gegenüber dem Vorgängersystem erheblich gesteigert werden. Wird das dem Extraktionsansatz hinterlegte Straßenmodell, mit der Berücksichtigung des Stufenmodells erweitert, ist eine deutliche Erhöhung der Effizienz möglich.

4.7. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein logisch gesteuerter Ansatz für die Verifikation aus Luftbildern vorgestellt und getestet. Hintergrund hierfür war es, ein operationell einsetzbares System zu erschaffen, das einen Operateur des BKG bei der Bewertung des ATKIS Basis-DLM unterstützt. Um dies zu gewährleisten, wurden zwei Prämissen formuliert. Zum einen soll die automatische Komponente zuverlässig sein und zum anderen sollte die Effizienz möglichst hoch sein.

Ein topologiegestütztes Straßenverifikationssystem wurde vorgestellt. Dieses kombiniert die Resultate eines sehr strengen Straßenverifikationsmoduls (Phase 1) mit den Ergebnissen eines toleranten Straßenverifikationsmoduls (Phase 2). Die erste Extraktionsphase soll der Forderung nach der Zuverlässigkeit des Systems gerecht werden. Die zweite Extraktionsphase soll zusätzliche Verbindungen in den Lücken der zuverlässig extrahierten Straßen



finden. Die Auswahl der Objekte für eine Überprüfung in Phase 2 liegt einem Algorithmus zu Grunde, der die kürzesten Verbindungen zwischen den zuverlässig bestimmten Straßen sucht.

Die Resultate aus einem Testgebiet zeigen die Vorteile des Ansatzes gegenüber einem Ansatz, der keine Netzwerkcharakteristika in die Betrachtung mit einbezieht. Die umfangreiche Analyse der Ergebnisse zeigt die neuen Stärken und verbleibenden Schwächen des Systems auf.



5. Vervollständigung des ATKIS-Straßennetzes

In diesem Kapitel werden Überlegungen präsentiert, die eine effiziente Vervollständigung des ATKIS Basis-DLM ermöglichen sollen. Zunächst muss geklärt werden, welche Anforderungen ein neues System erfüllen soll. Anschließend werden die auftretenden Lücken im Basis-DLM eingehend untersucht. Aus dieser Untersuchung heraus werden Vorschläge erarbeitet, wie diese Lücken zuverlässig detektiert werden können.

5.1. Ansätze bereits entwickelter Systeme

Das im 4. Kapitel beschriebene System soll einen Operateur des BKG bei der Bewertung der im ATKIS Basis-DLM enthaltenen Straßenobjekte unterstützen. Eine Bewertung von nicht erfassten Geo-Daten ist innerhalb dieses Verifikationsprozesses nicht möglich. Um die Vollständigkeit (vgl. 2 Kapitel) einer Datenbank zu gewährleisten, ist die Pflege beziehungsweise die Aktualisierung einer Geo-Datenbank ein zweiter wichtiger Punkt der automatischen Qualitätskontrolle.

Während bei den Systemen zur Verifikation von Straßennetzen bereits umfangreiches Vorwissen konsequent genutzt wird (vgl. 3. Kapitel), wurde bei der Bewertung der Vollständigkeit einer Geo-Datenbank bisher kaum Vorwissen eingesetzt. Nur wenige Ansätze verwenden das zuvor verifizierte und damit gesichert bestimmte Straßennetz, um daraus Startpunkte für die Netzwerkgenerierung abzuleiten.

Im 4. Kapitel wurden Zuverlässigkeit und Effizienz als wichtige Anforderungen an ein automatisches System genannt. Dies ist auf die Änderungsdetektion übertragbar. Die Ergebnisse der bisher entwickelten Ansätze zur Vervollständigung einer Datenbank (vgl. 3. Kapitel) zeigen, dass allein die Weiterentwicklung von Extraktionsalgorithmen dem nicht gerecht wird. Vielmehr sollte der verstärkte Einsatz von Vorwissen, ein leistungsfähiges automatisches System zur Änderungsdetektion ermöglichen.



Ziel der folgenden Überlegungen ist es, das in Kapitel 3.7. beschriebene System mit den Verbesserungen im Verifikationsmodul (vgl. 4. Kapitel) auch hinsichtlich der Änderungsdetektion entsprechend leistungsfähig zu gestalten. Für den operationellen Einsatz ist es wichtig, dass alle im ATKIS Basis-DLM fehlenden Straßen von der automatischen Komponente detektiert werden (Zuverlässigkeit). Kann dies garantiert werden, muss der Operateur nur diese Vorschläge für Straßen kontrollieren. Das kann eine erhebliche Zeitersparnis bedeuten, da ansonsten die komplette Szene inspiziert werden müsste. Mit einer Minimierung der Anzahl an Vorschlägen für fehlende Straßen steigt andererseits die Effizienz der automatischen Komponente. In bisher entwickelten Ansätzen wird die Änderungsdetektion meist durch eine Linienextraktion über die gesamte Szene realisiert. Dabei wird weder eine Beschreibung der Geometrie, noch spezifisches Wissen genutzt. Somit erfolgt nur eine *allgemeine* Modellierung hinsichtlich der zu erwartenden Straßen. Dies bedeutet einen hohen Anteil von nicht gerechtfertigten Straßenvorschlägen und führt somit zu einer schlechten Effizienz des Systems. Im Folgenden sollen Ansätze für eine Steigerung der Effizienz erarbeitet werden.

5.2. Kategorisierung von fehlenden Straßen

Um Lösungsansätze für die zuvor gestellte Aufgabe zu erarbeiten, ist es zunächst sinnvoll eine Kategorisierung der Straßen vorzunehmen, die nicht in der Datenbank enthalten sind. Grundsätzlich sind zwei Ursachen für das Fehlen von Straßen innerhalb des ATKIS Basis-DLM denkbar. Zum einen sind dies Fehler bei der Erfassung der Daten (Klasse 1), zum anderen kann eine Straße neuer als das letzte Update des entsprechenden ATKIS Basis-DLM sein (Klasse 2).

Interessanter für ein automatisches Verfahren ist jedoch das Erscheinungsbild der jeweiligen Straßen im Orthofoto. Da Straßen aus Klasse 1 vom Alter den umgebenen bekannten ATKIS-Objekten entsprechen, haben diese Straßen ein analoges Erscheinungsbild im Orthofoto. Für die Straßen aus Klasse 2 gilt hingegen, dass diese neuer als die umgebenen ATKIS-Objekte sind. Folglich differiert auch deren Erscheinungsbild im Orthofoto. Dementsprechend scheint eine unterschiedliche Herangehensweisen für die Detektion dieser Objekte sinnvoll. Die Entwicklung spezieller Ansätze und eine weitere Unterteilung ist notwendig.



5.2.1. Strategie zur Kategorisierung

Um eine Kategorisierung durchzuführen, müssen fehlende Straßen explizit betrachtet werden. Dazu gehört eine Einteilung in die entsprechende Klasse, eine Abgrenzung nach Länge und eine topologische Einordnung des fehlenden Straßenstückes in das gesamte Netz. Topologische Zusammenhänge zum bestehenden Netz sind interessant, da die bekannte Geometrie des Basis-DLM potentiell nutzbares Vorwissen darstellt.

Für diese Kategorisierung wurde ein Datensatz manuell erzeugt, der die Differenz zwischen dem aktuellen Status (Orthofoto) und dem ATKIS Basis-DLM darstellt. Dementsprechend wurde mittels der Software ArcInfo 8.0 ein Datensatz des ATKIS Basis-DLM mit einer Fläche von 6 x 10 km mit den fünfzehn entsprechenden Orthofotos aus Nordrhein-Westfalen hinterlegt. Im so digitalisierten Differenzdatensatz sind alle fehlenden Straßen enthalten und mit den Attributen Klasse, Länge, Kontextregion, Typ und topologischen Verbindungen zum vorhandenen Netz versehen worden.

5.2.2. Auswertung und Zuordnung

Der aus der manuellen Nachdigitalisierung resultierende Datensatz ermöglicht eine Einteilung der Straßen in verschiedene Klassen. Diese Klassen sollen den unterschiedlichen Herangehensweisen der automatischen Fortführung gerecht werden. Ein Teil der fehlenden Straßen kann Fehlern bei der Digitalisierung des ATKIS Basis-DLM zugeordnet werden. Dabei wurde eine Unterteilung zwischen vollständig fehlenden Objekten und fehlenden Verknüpfungen zwischen den in der Datenbank enthaltenen Objekten vorgenommen. Ein anderer wichtiger Teil der fehlenden Straßen tritt infolge der ständigen Weiterentwicklung des Straßennetzes auf. Dieser Teil kennzeichnet den Fortführungsbedarf für eine aktuelle Datenbank. In Tabelle 9 werden die fehlenden Straßen im untersuchten Gebiet kategorisiert.

Klassifizierung	Anzahl	Gesamtlänge	Längenanteil in %
Straßenabschnitte des Basis-DLM	2738	429.385 m	95,00%
fehlende Straßenabschnitte	78	10126 m	2,24%
fehlende Verknüpfungen	10	326 m	0,07%
neu gebaute Straßenabschnitte	110	12123 m	2,68%
alle fehlenden Straßenabschnitte	198	22576 m	5,00%

Tabelle 9 : Kategorisierung fehlender Straßen



Alle fehlenden Straßenobjekte konnten eindeutig einer der in Tabelle 9 aufgeführten Klassen zugeordnet werden. Der größte Teil fehlender Straßen mit ca. 12 km Gesamtlänge konnte neu gebauten, noch nicht im ATKIS Basis-DLM enthaltenen Straßen zugeordnet werden. Straßenobjekte, die durch Fehler bei der Erfassung der Daten entstanden sind traten mit ungefähr 10 km Gesamtlänge im untersuchten Gebiet auf. Mit einer Gesamtlänge von 326 m sind Verknüpfungsfehler im untersuchten Bereich verhältnismäßig wenig aufgetreten.

Insgesamt wurden im Untersuchungsgebiet 198 Objekte mit einer Gesamtlänge von ca. 22,6 km manuell nachdigitalisiert. Im ATKIS Basis-DLM sind in dem gleichen Gebiet 2738 Objekte mit einer Gesamtlänge von ca. 429,4 km enthalten. Folglich weist das ATKIS Basis-DLM im Testgebiet ein Defizit an relevanten Straßenobjekten von 5 % auf.

5.3. Lücken im bestehenden Netz infolge fehlerhafter Digitalisierung

Straßen, die bei der Digitalisierung übersehen wurden oder aus ähnlichen Gründen nicht im ATKIS Basis-DLM enthalten sind, treten im Untersuchungsbereich mit einem Anteil von ca. 2,3 % auf. Um den wachsenden Qualitätsansprüchen gerecht zu werden, ist eine Korrektur wünschenswert. Ziel ist es, aus der näheren Betrachtung der entsprechenden Objekte und ihrer Umgebung mögliche Ansätze zu finden, mit denen diese fehlenden Objekte effizient detektiert werden können.

Objekte, die bei der Erfassung der Daten übersehen wurden, sind den umgebenen, bereits richtig in der Datenbank enthaltenen Objekte radiometrisch ähnlich. Zunächst sollen solche Lücken untersucht werden, die infolge fehlender Verknüpfungen zwischen Objekten des Basis-DLM entstanden sind. Danach wird die Betrachtung vollständig fehlender Objekte erfolgen.

5.3.1. Untersuchung fehlender Verknüpfungen

Fehlende Verknüpfungen entstehen durch Fehler bei der Digitalisierung. Der Operateur hat die entsprechenden Straßen zwar erkannt und in die Datenbank übernommen, diese aber topologisch nicht korrekt verbunden. Ein Beispiel dazu wird in Abbildung 27 gegeben.



Abbildung 27 : Basis-DLM-Objekte sind nicht korrekt verknüpft (grün = Objekte des ATKIS Basis-DLM, rot = nachdigitalisiertes Objekt)

In Abbildung 27 wird deutlich, dass alle Straßen der Szene im ATKIS Basis-DLM enthalten sind, jedoch nicht korrekt verknüpft wurden. Das fehlende und folglich nachzudigitalisierende Straßenstück hat eine Länge von ca. 12 m.



Abbildung 28 : Basis-DLM-Objekt ist unterbrochen (grün = Objekte des ATKIS Basis-DLM, rot = nachdigitalisiertes Objekt)



Dieser Fehlergruppe wurden auch Lücken zugeordnet, die durch Unterbrechungen in Objekten entstanden sind. Ein Beispiel zeigt Abbildung 28. Hier wird deutlich, dass die fehlenden Straßenabschnitte sehr kurz sind (ca. 15 m) und innerhalb eines eigentlich zusammenhängenden Straßenobjektes auftreten. Die Ursache für das Auftreten dieser Art von Unterbrechungen ist nicht bekannt. Eine weitere Untersuchung in anderen Regionen erscheint notwendig, um eine allgemeingültigere Aussage zu erreichen. Eine statistische Auflistung folgt in Tabelle 10.

	offene Landschaft	Siedlungsgebiet
fehlende Objekte insgesamt	9	1
Gesamtlänge	309 m	17 m
Anzahl Straßen	6	1
Anzahl Wege	3	0

Tabelle 10 : Statistik über die fehlenden Verknüpfungen

In Tabelle 10 ist zu erkennen, dass die meisten fehlenden Verknüpfungen in der offenen Landschaft gefunden wurden. Dieser Fehler wurde vorrangig bei Straßen beobachtet.

Betrachtet man die auftretenden Lücken insgesamt, ist der Anteil an fehlenden Verknüpfungen sehr gering (vgl. Tabelle 9). Die fehlenden Verknüpfungen sind mit 4 bis 60 m sehr kurz und bei einer manuellen Kontrolle recht schwierig zu finden. Bei derart geringen Längen ist es möglich, dass im Rahmen dieser Untersuchung einige Lücken übersehen wurden. Obwohl diese Lücken kurz sind, führen diese zu Fehlern in der Topologie des Straßennetzes.

Für die automatische Detektion ist die geringe Länge jedoch ein Vorteil. So erscheint es sinnvoll, solche Stellen automatisch zu detektieren, in denen Straßenobjekte innerhalb eines Toleranzbereiches liegen und nicht verbunden sind. Da fehlende Straßenabschnitte nahezu geradlinig sind, könnte eine direkte Verbindung zwischen den zuvor ausgewählten Straßenobjekten als Verifikationshypothese generiert werden. Eine Bewertung könnte mit dem bereits entwickelten Verifikationsansatz (vgl. 4. Kapitel) realisiert werden. Auf den Einsatz von Seed-Vektoren sollte auf Grund der kurzen Objekte jedoch verzichtet werden. Ist das Verifikationsergebnis positiv, wird dem Operateur diese Stelle angezeigt und die Verknüpfung der entsprechenden Objekte vorgeschlagen. Bei der Generierung entsprechender Parametersätze ist zu beachten, dass sich bei dieser *Verifikations-Detektion* Zuverlässigkeit und Effizienz invers zur reinen Verifikation auswirken. Kommt es zu



Fehlverifikationen muss ein Operateur mehr Vorschläge betrachten (Effizienz). Dagegen werden nicht akzeptierte Objekte dem Operateur auch nicht vorgeführt und somit eventuell übersehen (Zuverlässigkeit). Die verwendeten Parametersätze sollten entsprechend tolerant generiert werden.

Diese Vorgehensweise scheint besonders für die Kontextregion offene Landschaft sinnvoll, da hier zwei Straßen, die nur wenige Meter voneinander entfernt sind, meist verbunden sind. Infolge des geringen Anteils dieser Art von Lücken ist der Nutzen relativ gering, eine effiziente Detektion wäre allerdings verhältnismäßig einfach zu realisieren.

5.3.2. Lücken infolge fehlender Straßenabschnitte

Bisher wurde die Erfassung und die Fortführung der Daten für das ATKIS Basis-DLM manuell von einem Operateur durchgeführt. Bei diesem Vorgang wurden relevante Daten vergessen oder übersehen. Um die Qualität der Geo-Datenbank zu gewährleisten, muss die Vollständigkeit verbessert werden. Dazu gehört die effiziente Detektion der fehlenden Straßen. Im Folgenden soll untersucht werden, ob die vom Operateur vergessenen Straßen in ein spezielles Modell eingeordnet werden können und ob das daraus resultierende Wissen für die Detektion eingesetzt werden kann. Ein Beispiel für eine fehlende Straße wird in Abbildung 29 dargestellt.



**Abbildung 29 : Objekte des Basis-DLM und ein nachdigitalisierter Straßenabschnitt
(grün = Objekte des ATKIS Basis-DLM, rot = nachdigitalisiertes Objekt)**



In Abbildung 29 ist ein Objekt des ATKIS Basis-DLM grün gekennzeichnet. Ein zweites Objekt befindet sich in direkter Nachbarschaft und erscheint im hinterlegten Orthofoto radiometrisch ähnlich. Diese Straße ist topologisch betrachtet an eine bestehende Kante angeschlossen. Diese müsste bei der Detektion aufgetrennt und der entsprechende Knoten hinzugefügt werden. Eine statistische Auflistung aller fehlenden Objekte ist in Tabelle 11 dargestellt.

	offene Landschaft	Siedlungsgebiet
fehlende Objekte insgesamt	60	18
Gesamtlänge	8,4 km	1,7 km
Anzahl Straßen	11	5
Anzahl Wege	49	13

Tabelle 11 : Statistik der fehlenden Objekte

Aus Tabelle 11 geht hervor, dass fehlende Objekte vorrangig in der offenen Landschaft auftreten. Weiter lässt sich ableiten, dass im untersuchten Gebiet deutlich mehr Wege als Straßen bei der Erfassung der Daten übersehen wurden. Eine Ursache hierfür liegt eventuell in der Betrachtungsweise eines Operateurs. Dieser misst Straßen eine höhere Bedeutung als kleineren Feldwegen bei. Hinzu kommt, dass Straßen in Fernerkundungsdaten leichter erkennbar sind. Dies ist auch ein Grund für die Häufigkeit derartiger Lücken in der offenen Landschaft, denn dort befinden sich die meisten Wege. Folglich müsste sich eine effiziente Detektion der fehlenden Objekte auf Feldwege in der offenen Landschaft konzentrieren. Um Startpunkte für die Extraktion der fehlenden Objekte abzuleiten, soll zunächst deren topologische Verbindung zum Straßennetz des Basis-DLM betrachtet werden.

topologische Verbindung der fehlenden Objekte zu Objekten des Basis-DLM	Objekte in %
an einem Knoten	19 %
an zwei Knoten	4 %
an einer Kante	37 %
an zwei Kanten	12 %
an einem Knoten und einer Kante	14 %
keine direkte Nachbarschaft zum bekannten Netz	14 %

Tabelle 12 : Topologiestatistik der fehlenden Objekte

Hierzu zeigt Tabelle 12 in einer Statistik die Häufigkeit aller möglichen topologischen Verbindungen der fehlenden Objekte zu den Objekten des



Basis-DLM. Darin wird deutlich, dass ca. 20 % der fehlenden Objekte mit einer bereits in der Datenbank enthaltenen Kreuzung verbunden sind. Mit rund 37 % sind die meisten fehlenden Objekte entlang einer bekannten Straße zu finden. Fast 30 % der nachdigitalisierten Objekte sind an beiden Endpunkten mit dem bekannten Netz verbunden. Der Anteil nicht angeschlossener Objekte liegt bei 15 % und beinhaltet Straßen und Wege, die wiederum mit fehlenden Objekten verbunden sind. Diese Objekte haben aber keine direkte Verbindung zum Straßennetz, welches zu diesem Zeitpunkt im Basis-DLM verfügbar ist. Grundsätzlich ist jede Straße mit dem gesamten Straßennetz verbunden. Vollständig isolierte Straßen wurden im untersuchten Gebiet nicht gefunden. Dieser Sachverhalt wird durch Plausibilitätstests im Geo-Datenzentrum in Leipzig überprüft und kann folglich ausgeschlossen werden.

Bei der Entwicklung eines möglichst effizienten Ansatzes zur Detektion fehlender Objekte ist es wichtig, vorhandenes Wissen konsequent einzusetzen.

An hand der Daten in Tabelle 12 konnte nachgewiesen werden, dass die meisten fehlenden Objekte direkt mit Objekten verbunden sind, die bereits im Basis-DLM enthalten sind. Somit ist es sinnvoll, dass zuvor überprüfte Netz der Datenbank als Startpunkt für eine Suche nach fehlenden Objekten zu nutzen. Im Speziellen sollten Knoten des aus dem ATKIS Basis-DLM bekannten Netzes, als Startpunkte für entsprechende Extraktionsalgorithmen eingesetzt werden. Die Extraktion kann durch den Einsatz von Seed-Vektoren erleichtert werden (vgl. Kapitel 3.7.3.3.1.). Bei der Untersuchung zeigte sich, dass fehlende Objekte meist in der Verlängerung bekannter Objekte liegen. Somit kann die Ausrichtung der Seed-Vektoren für den Extraktionsalgorithmus von den auf die Kreuzung treffenden Kanten übernommen werden. Im untersuchten Gebiet wurden die meisten fehlenden Straßen in direkter Nachbarschaft zu einer Kante des Basis-DLM gefunden. Um mögliche Startpunkte für eine erfolgreiche Extraktion zu finden, könnte entlang der bereits verifizierten Kanten ein Extraktionsansatz nach Knoten suchen. In [SUI ET AL. 2002] (vgl. Kapitel 3.2.4.) wurde ein Ansatz zur Unterscheidung von Kreuzungen und Straßen vorgestellt. Somit könnten Kandidaten für Kreuzungen selektiert werden und als Startpunkte für einen Extraktionsansatz dienen. Feldwege verlaufen auf Grund ihrer Verbindungsfunktion (vgl. 4. Kapitel) meist senkrecht zu bekannten ATKIS-Objekten. Dementsprechend ist es sinnvoll die Seed-Vektoren für den Extraktionsalgorithmus senkrecht zu den bekannten ATKIS-Objekten auszurichten.

Fehlende Straßen sind den umgebenen, in der Datenbank richtig enthaltenen, Objekten radiometrisch ähnlich. Kann ein Extraktionsalgorithmus mit einem



bestimmten Parametersatz eine bereits sicher bekannte Straße vollständig rekonstruieren, sollte dies auch für eine fehlende Straße in direkter Nachbarschaft gelten. Demzufolge wird zunächst ein sicher bekanntes Objekt mittels verschiedener Extraktionsparameter verifiziert (vgl. 4. Kapitel). Dabei sollte die Verifikation zunächst mit einem strengen Parametersatz beginnen und bei erfolgreicher Extraktion mit dem nächst toleranteren Parametersatz fortfahren. Der letzte erfolgreiche Parametersatz kann dann für die Extraktion in der Umgebung verwendet werden. Dabei können jeweils verschiedene Parametersätze eine individuelle Anpassung an Kontrastbedingungen, Lückenbildung und diverse Straßenmodelle ermöglichen. Sind beispielsweise entlang einer sicher bekannten Straße viele Bäume, die eine Extraktion erschweren, wird dies für den Extraktionsprozess in der Nachbarschaft berücksichtigt. Der Einsatz verschiedener Extraktionsalgorithmen ist hier ebenso denkbar. War die Verifikation mit einem bestimmten Extraktionsalgorithmus für ein bekanntes Objekt erfolgreich, sollte dieser für eine Extraktion linienhafter Objekte in der direkten Nachbarschaft eingesetzt werden. Durch diese Herangehensweise werden topologische Zusammenhänge zwischen den bekannten und den fehlenden Objekten genutzt. So erhält man Hypothesen über fehlende Straßen in bestimmten Bereichen. Der Hauptvorteil liegt darin, dass bei schlechten Bedingungen für den Extraktionsalgorithmus die Parameter sehr tolerant eingestellt werden und einem Operateur in diesem Bereich relativ viele Vorschläge präsentiert werden. Sind die Bedingungen für die automatische Detektion hingegen gut, hat ein Operateur einen geringen Aufwand.

Die Anzahl extrahierter linienhafter Objekte ist nach diesen Arbeitsschritten immer noch relativ hoch. Um einige nicht relevante linienhafte Strukturen zu entfernen, wird das Wissen aus dem ATKIS Basis-DLM genutzt. Darin sind geometrische Informationen über Baumreihen, Flüsse, Gräben und Oberlandleitungen enthalten. Stimmt die Geometrie der zuvor extrahierten Linien mit diesen Objekten überein, werden diese gelöscht. Entsprechen die extrahierten Linien Straßen des Basis-DLM, werden diese ebenfalls gelöscht.

Zusätzlich kann das Wissen über verfeinert aufgelöste Kontextregionen genutzt werden, um die Extraktion zu unterstützen [Butenuth 2002].

Für eine weitere sinnvolle Verringerung der Anzahl an Straßenvorschlägen könnten Bilddaten höherer Auflösung verwendet werden. Dafür könnte die für die Linienextraktion reduzierte Auflösung der zur Verfügung stehenden Orthofotos zurückgenommen werden. An hand dieser Bilddaten könnten die zuvor extrahierten Linien bewertet werden. Dann würden regelmäßig extrahierte

parallele Kanten, Autos und Straßenmarkierungen analog zum System von [ZHANG UND BALTSAVIAS 2002] zu einer verbesserten Bewertung führen (vgl. Kapitel 3.6.). Schlecht bewertete Linien werden dann verworfen.

Abschließend werden die so extrahierten Linien mit dem entsprechenden Orthofoto dem Operateur einzeln präsentiert und dieser entscheidet, ob die extrahierte Geometrie in die Datenbank übernommen wird.

5.4. Neubaugebiete als Lücken im Basis-DLM

Der größte Teil der fehlenden Straßen im Testgebiet wurde solchen Straßen zugeordnet, die infolge von Bauprojekten in jüngster Vergangenheit entstanden sind (vgl. Tabelle 9). Ist das Basis-DLM mit den in Kapitel 5.3. aufgeführten Ansätzen einmal korrigiert, ist ausschließlich die Fortführung der Datenbank von Bedeutung. Damit ist die Digitalisierung von Neubaugebieten eine primäre Problemstellung für die automatische Pflege einer Geo-Datenbank. Ein Beispiel für ein Neubaugebiet im Testgebiet zeigt Abbildung 30.



Abbildung 30 : Dicht bebautes Neubaugebiet am Stadtrand mit zahlreichen neuen Straßen, die nicht im ATKIS Basis-DLM enthalten sind (grün = Objekte des ATKIS Basis-DLM, rot = nachdigitalisierte Objekte)



In Abbildung 30 wird deutlich, wie sich eine Stadt ausdehnt. Dabei ist der dicht besiedelte Stadtkern am rechten Bildrand bereits im Basis-DLM enthalten (grün). Die rot gekennzeichneten Straßen sind infolge einer Baumaßnahme für eine Siedlung mit zahlreichen Einfamilienhäusern neu entstanden. In der Datenbank wird das Neubaugebiet noch der Kontextregion „offene Landschaft“ zugeordnet. Da ein Grossteil neuer Straßen am Stadtrand entsteht, stellt diese Szene eine typische Situation dar. Ein ebenfalls häufig auftretender Fall ist der Neubau von Umgehungsstraßen mit entsprechenden Gewerbegebieten. Hierzu war ebenfalls ein Beispiel im Testgebiet vorhanden.



Abbildung 31 : Neubaugebiet mit Umgehungsstraße ist nicht im Basis-DLM enthalten (grün = Objekte des ATKIS Basis-DLM, rot = nachdigitalisierte Objekte)

In Abbildung 31 ist eine neu gebaute Umgehungsstraße zusätzlich zu den zuvor in der Datenbank enthaltenden Objekten dargestellt. Im mittleren südlichen Bereich der Abbildung 31 ist eine Straße zu erkennen, die infolge der Neubaumaßnahme weggefallen ist und an deren Stelle nun ein Gebäude steht. Derartige Veränderungen werden jedoch mittels des Verifikationsmoduls aufgedeckt (vgl. 4. Kapitel). Das in Abbildung 31 dargestellte Neubaugebiet ist nur wenig bebaut und enthält noch Charakteristika der offenen Landschaft. Den beiden oben gezeigten Beispielen zufolge werden im Folgenden Neubaugebiete nach der Dichte ihrer Bebauung klassifiziert. In Tabelle 13 wird dieser Sachverhalt mit einer Statistik verdeutlicht.



	offenes Neubaugebiet	Neubaugebiet mit dichter Bebauung
fehlende Objekte insgesamt	61	49
Gesamtlänge	7,1 km	5,0 km
Anzahl Straßen	40	49
Anzahl Wege	21	0

Tabelle 13 : Statistik der neu gebauten Objekte

Aus Tabelle 13 ist ersichtlich, dass der Anteil neu gebauter Objekte im dicht besiedelten Gebiet etwas geringer ist als in wenig bebauten Gebieten. In diesem Bereich steht die Errichtung vielfältiger Gebäude eventuell noch bevor. Im untersuchten Bereich konnten mehr Straßen als Wege den Neubaumaßnahmen zugeordnet werden.

5.4.1. Nutzen von Bauentwurfsdaten

Für die Detektion neu gebauter Straßen ist der Einsatz von umfangreichen Vorwissen möglich. Dazu gehören Daten, die für den Bau der Straße notwendig sind. In Deutschland ist es üblich, dass der Bedarf einer Baumaßnahme zunächst politisch entschieden wird. Die verschiedenen Baumaßnahmen werden im Bebauungsplan koordiniert. Straßen werden dann als Neubaumaßnahme an das Straßenbauamt übergeben. Dieses führt vorab eine Vermessung des entsprechenden Geländes durch. Daraus wird ein DGM (**D**igitales **G**elände**M**odell) abgeleitet, um darin eine Straßenachse zu entwerfen. Aus dieser Planung entsteht neben Informationen über Untergrund, Straßenbelag u.Ä. ein dreidimensionales Bild der Straße. Daraus sind Informationen über die geometrische Lage der Mittelachse, der Breite und der Anzahl der Fahrstreifen der geplanten Straße ableitbar. Dieses Wissen wird auch für den im 4. Kapitel beschriebenen Verifikationsprozess verwendet. Die Bauentwurfsdaten werden anschließend an eine Baufirma übergeben. Diese führt die Baumaßnahme entsprechend durch. Dabei kommt es infolge lokaler Gegebenheiten zu Abweichungen von den Bauentwurfsdaten. Aus diesem Grund wird vom Straßenbauamt eine Schlussvermessung und eine Bestandserfassung durchgeführt. Diese findet in der Regel innerhalb eines halben Jahres statt. Die Daten der Schlussvermessung werden innerhalb eines weiteren halben Jahres vom Landesvermessungsamt in das Basis-DLM übernommen. Dies ist der derzeitige Ablauf beim Straßenbau und dessen Nachführung. Die Informationen wurden aus [PIETSCH 1989], Gesprächen mit



Angestellten des Straßenbauamtes Hannover, des Landesvermessungsamtes Niedersachsen und des Landesvermessungsamtes in Hessen abgeleitet.

In Zukunft wird eine Spitzenaktualität von ATKIS für Straßen von drei Monaten angestrebt (ADV 2003). Dies ist mit der zuvor beschriebenen Prozedur nicht realisierbar. Aus diesem Grund übernehmen einige Länder, wie z.B. Hessen, bereits Bauentwurfsdaten in das Basis-DLM. Bis diese Straßen für den Verkehr freigegeben werden, sind diese Objekte dementsprechend gekennzeichnet. In anderen Bundesländern, wie z.B. Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen, wird noch nach der oben beschriebenen Prozedur verfahren. Dies war aus Gesprächen mit Angestellten der Vermessungsämter in Niedersachsen, Hessen und Nordrhein-Westfalen zu erfahren.

Um die geforderte Spitzenaktualität bundesweit zu erreichen, wird derzeit an einem allgemeinen Datenformat für alle Ämter gearbeitet. So kann das Vermessungsamt direkt auf die Bauentwurfsdaten des Straßenbauamtes zugreifen und mittels einer Schnittstelle die relevanten Daten für das Basis-DLM ableiten.

Dennoch entsprechen die Bauentwurfsdaten eventuell nicht der tatsächlichen Situation im Gelände und sollten daher überprüft werden. Folglich ist eine Verifikation von Bauentwurfsdaten an hand von Fernerkundungsdaten sinnvoll.

5.4.2. Verifikation von Bauentwurfsdaten

Die Verifikation von Bauentwurfsdaten soll mit dem im 4. Kapitel beschriebenen Verifikationsmodul realisiert werden. Als Vorwissen werden hier Informationen aus den Bauentwurfsdaten verwendet und nicht die Daten des Basis-DLM. Die entsprechenden Daten des Basis-DLM sind vermutlich falsch, da in Neubaugebieten oft das gesamte Straßennetz angepasst wird.

Mit dem Einsatz des Verifikationsmoduls sollen die Bauentwurfsdaten mit dem fertigen Ergebnis der Baumaßnahme verglichen werden. Eventuelle Diskrepanzen sollen aufgedeckt werden. Dabei werden die gleichen Anforderungen an Zuverlässigkeit und Effizienz gestellt, wie bei der im 4. Kapitel behandelten Verifikation des Basis-DLM.

Die auftretenden Abweichungen zwischen Bauentwurf und Bauergebnis entsprechen jedoch nicht den typischen Abweichungen des Basis-DLM von der Realität. Die Baufirma wird dem Plan in großen Teilen folgen und nur geringe



Veränderungen vornehmen. Diese betreffen dann vorrangig die Metrik der Objekte und nicht deren Topologie.

5.4.2.1. Wahl der Parameter für die Verifikation

Für den Verifikationsprozess wird die in [WIEDEMANN UND EBNER 2000] und [WIEDEMANN 2002] beschriebene Extraktionssoftware verwendet (vgl. Kapitel 3.7.). Zur besseren Steuerung der Extraktion sollen die Extraktionsparameter entsprechend angepasst werden.

Neu gebaute Straßen weisen radiometrische Unterschiede auf und befinden sich in einem anderen Kontext als die im 4. Kapitel relevanten Objekte. Da in einem Neubaugebiet die Vegetation nur sehr schwach ausgebildet ist, entstehen kaum Störungen durch Bäume. Außerdem werden Straßen fast nie im Stadtkern neu gebaut und somit entstehen geringere Störungen durch Schattenwurf hoher Gebäude. Um dies zu berücksichtigen, wird im Parametersatz die Lückenüberbrückung in der Gruppierungsphase minimiert. Auf Grund nicht vorhandener Vegetation am Rand einer neuen Straße ist der Kontrast geringer. Deshalb wurden die Kontrastparameter (vgl. Kapitel 3.7.3.3.1.) abgeschwächt. Es wurden separate Parametersätze für ein offenes und ein dichter bebautes Neubaugebiet generiert (vgl. Anhang A.1.2. und Anhang A.1.3.). Obgleich die Parameteranpassung vorgenommen wurde ist der Extraktionsansatz nicht für dicht bebaute Gebiete geeignet. Kleine einzeln stehende Häuser in Neubaugebieten verursachen kaum Störungen wie Schattenwurf oder Verdeckungen, weisen aber linienhafte Strukturen auf, die eine Extraktion der eigentlichen Straße erschweren.

5.4.3. Untersuchung des Verifikationsansatzes für Bauentwurfsdaten

Um die Möglichkeiten für die Verifikation von Bauentwurfsdaten auszuleuchten, sollen nachfolgend die Resultate einer Untersuchung präsentiert werden. Zu diesem Zweck wurden zwei größere Neubaugebiete für die Untersuchung ausgewählt. Eines der Neubaugebiete hat eine relativ dichte Bebauung (Abbildung 30) und ein anderes ist kaum von Gebäuden frequentiert (Abbildung 31).

Da für das gesamte Untersuchungsgebiet keine Bauentwurfsdaten verfügbar sind, wurden die entsprechenden Datensätze aus den Orthofotos heraus



manuell digitalisiert. Um die Effizienz des Verifikationsansatzes mit den modifizierten Extraktionsparametern zu testen, wurde ein korrekter Datensatz erzeugt. Zusätzlich wurde ein falscher Datensatz aus den Bilddaten digitalisiert, um die Zuverlässigkeit des Ansatzes zu überprüfen. Für diese Sensitivitätsanalyse wurde die Metrik der Straßen verzerrt digitalisiert. Dies soll abweichenden Bauentwurfsdaten nahe kommen.

5.4.3.1. Resultate der Verifikation

Der im 4. Kapitel vorgestellte topologiegestützte Ansatz wurde mit den modifizierten Parametersätzen und den simulierten Bauentwurfsdaten eingesetzt. Die geometrischen Daten der Objekte sind korrekt und sollten vom Verifikationsansatz akzeptiert werden.

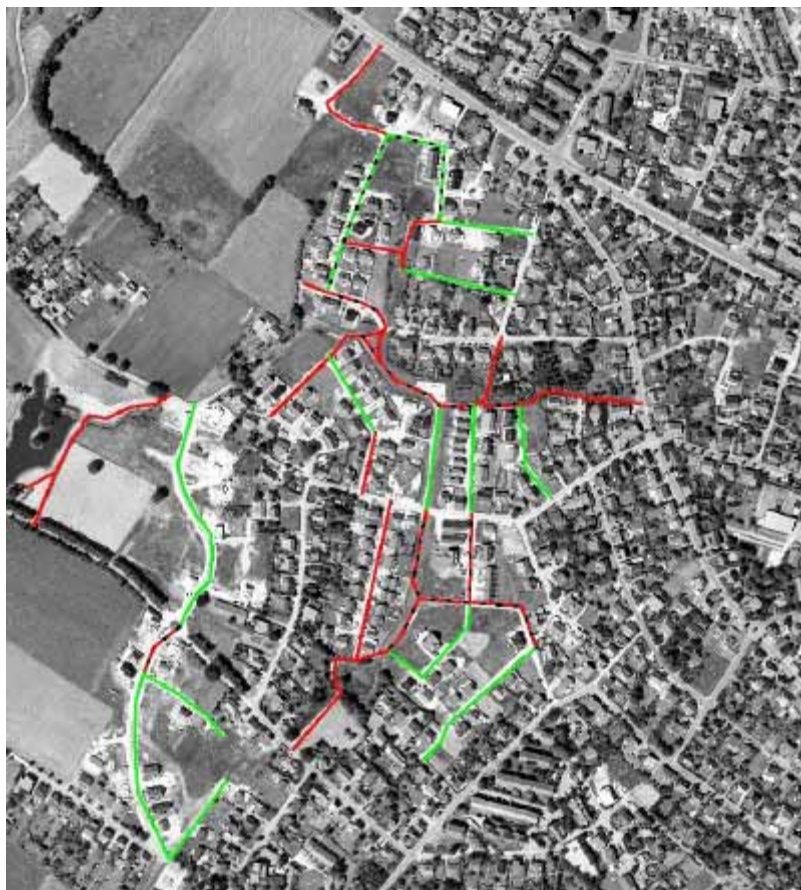


Abbildung 32 : Verifikation in einem Neubaugebiet mit dichter Bebauung (grün = akzeptiertes Objekt, rot = verworfenes Objekt)



In Abbildung 32 wird deutlich, dass vor allem Straßen in enger Bebauung zu Unrecht verworfen werden. Der vom System verwendete Extraktionsansatz ist für ein dicht besiedeltes Gebiet ungeeignet. Sobald verfügbar, kann im System zur Verifikation ein leistungsfähigerer Extraktionsansatz für urbane Gebiete verwendet werden. Diese Betrachtung soll zunächst nur die Möglichkeiten für diese Herangehensweise aufzeigen.

Neubaugebiet mit dichter Bebauung	akzeptiert	verworfen
Anzahl der Objekte	14	33
Gesamtlänge aller Objekte	2,13 km	2,59 km

Tabelle 14 : Resultat der Verifikation in einem Neubaugebiet mit dichter Bebauung

In Tabelle 14 werden die Defizite des Extraktionsansatzes an hand von Zahlenwerten deutlich. Die Anzahl der verworfenen Straßen ist mehr als doppelt so groß wie der Anteil an akzeptierten Straßen. Ein Operateur müsste folglich ca. 65 % der Objekte nochmals bewerten. Die Effizienz des Verifikationsansatzes war in diesem Fall gering.

Aussagen zur Effizienz des Ansatzes in einem weniger dicht bebauten Neubaugebiet sollen an hand des folgenden Beispiels möglich sein.



Abbildung 33 : Verifikation in einem offenen Neubaugebiet (grün = akzeptiertes Objekt, rot = verworfenes Objekt)



In Abbildung 33 ist zu erkennen, dass der für die Verifikation verwendete Extraktionsansatz in schwach bebauten Neubaugebieten gute Ergebnisse liefert. Außer der mehrspurigen Umgehungsstraße (rot) werden alle Objekte zu Recht akzeptiert (grün). Da der verwendete Extraktionsansatz für die Suche nach linienhaften Objekten entwickelt wurde, treten einige Probleme bei sehr breiten Straßen auf. Diese erscheinen im Bild nicht als Linie, sondern als mehr oder weniger homogene Fläche. Verbesserungen könnte der Einsatz anderer Extraktionsansätze oder eine andere Vorverarbeitung der Bilder bringen. Eine vertiefende Untersuchung diesbezüglich, ist jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit.

offenes Neubaugebiet	akzeptiert	verworfen
Anzahl der Objekte	16	4
Gesamtlänge aller Objekte	1,67 km	1,09 km

Tabelle 15 : Resultat der Verifikation in einem offenen Neubaugebiet

An hand der Werte in Tabelle 15 wird die hohe Effizienz des Verifikationsansatzes für das getestete Gebiet deutlich. Bei Betrachtung der akzeptierten Gesamtlänge schneidet das System jedoch nicht gut ab. Die Ursache liegt, wie zuvor beschrieben, bei der langen und breiten Straße.

5.4.3.2. Resultate der Sensitivitätsanalyse

Um die Zuverlässigkeit des Systems zur Verifikation mit den modifizierten Parametersätzen zu überprüfen, wurde ein falscher Datensatz bewertet. Die geometrischen Daten der Objekte sind falsch und sollten vom Verifikationsansatz verworfen werden.

Aus Abbildung 34 geht hervor, dass der für bebauten Gebiet ungeeignete Extraktionsansatz, lediglich eine falsche Straße vollständig extrahiert. In diesem Bereich führte die Extraktion von Häuserkanten und Zäunen zu einem falschen Resultat.

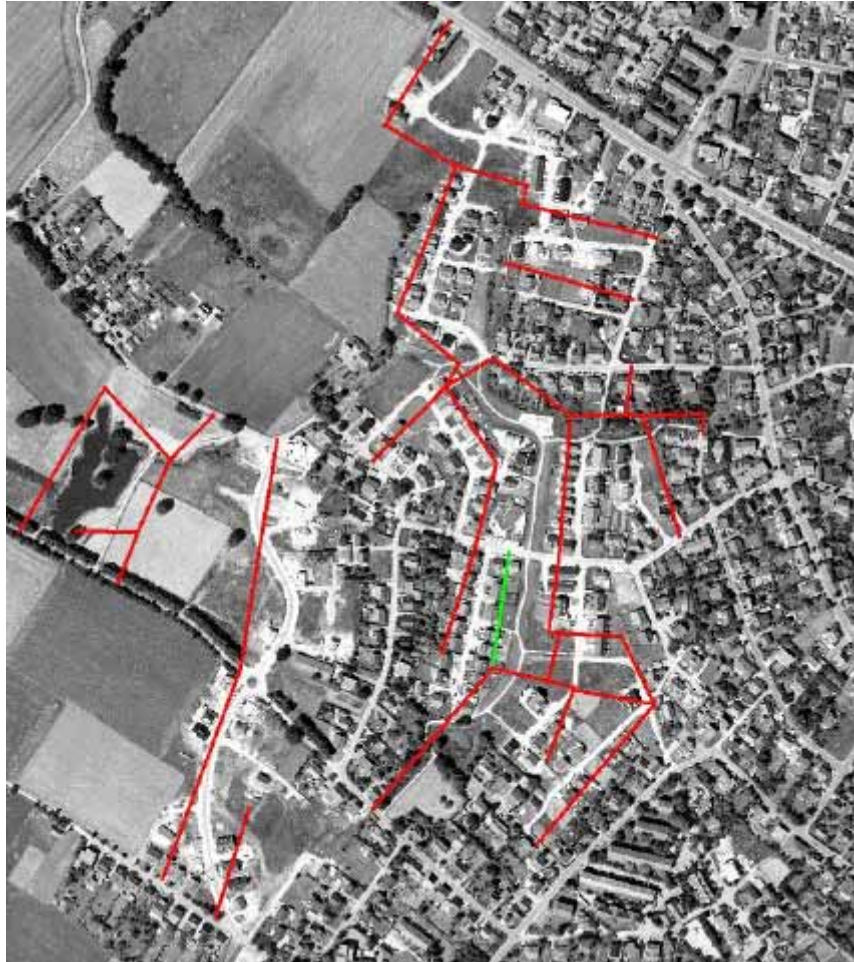


Abbildung 34 : Sensitivitätsanalyse in einem Neubaugebiet mit dichter Bebauung (grün = akzeptiertes Objekt, rot = verworfenes Objekt)

Neubaugebiet mit dichter Bebauung	akzeptiert	verworfen
Anzahl der Objekte	1	39
Gesamtlänge aller Objekte	0,12 km	3,95 km

Tabelle 16 : Resultat der Sensitivitätsanalyse in einem Neubaugebiet mit dichter Bebauung

Die Zahlenwerte in Tabelle 16 bestätigen das relativ gute Ergebnis des Verifikationsansatzes. Der Anteil der False-Positives liegt unter 2,2 % und kommt den Erwartungen recht nah. Aussagen zur Zuverlässigkeit in einem weniger dicht bebauten Neubaugebiet sollen an hand des folgenden Beispiels möglich sein.

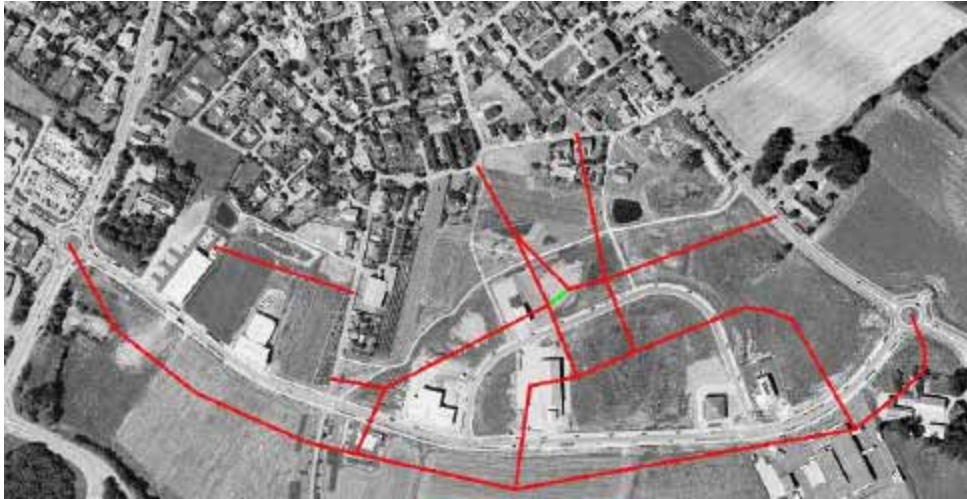


Abbildung 35 : Sensitivitätsanalyse in einem offenen Neubaugebiet (grün = akzeptiertes Objekt, rot = verworfenes Objekt)

In Abbildung 35 wird deutlich, dass der Verifikationsansatz fast alle falschen Objekte verworfen hat. Für das wenig bebaute Neubaugebiet ist der Extraktionsansatz für die offene Landschaft geeignet. Ein sehr kurzes Objekt wurde fälschlich akzeptiert. Dies ist auf die Schwäche des Extraktionsansatz mit kurzen Objekten zurückzuführen (vgl. Kapitel 4.6.2.).

offenes Neubaugebiet	akzeptiert	verworfen
Anzahl der Objekte	1	20
Gesamtlänge aller Objekte	0,03 km	3,02 km

Tabelle 17 : Resultat der Sensitivitätsanalyse in einem offenen Neubaugebiet

An hand der Werte aus Tabelle 17 kann eine hohe Zuverlässigkeit des Verifikationsansatzes in diesem offenen Neubaugebiet nachgewiesen werden.

5.4.3.3. Diskussion der Ergebnisse

Das System zur Verifikation von Bauentwurfsdaten wurde exemplarisch in zwei Regionen mit neu erstellten Straßen getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass die automatische Komponente zur Bewertung der Planungsdaten zuverlässig funktioniert. Es wurde deutlich, dass die Effizienz des Systems durch den Einsatz neuer angepasster Extraktionsalgorithmen recht hoch ist.



Der topologiegestützte Ansatz brachte nur in dem größeren Neubaugebiet einen entscheidenden Vorteil. Ausschließlich in Gebieten mit einer komplexeren Struktur kommen die typischen topologischen Charakteristika des Straßennetzes zum Tragen. Wird jedoch der Anschluss an das bestehende Netz des Basis-DLM berücksichtigt kann der zweistufige topologische Verifikationsansatz zu einer Steigerung der Effizienz führen. Hiefür sollten identische Knoten aus dem Basis-DLM und den Bauentwurfsdaten als Startpunkte für die Suche nach der kürzesten Verbindung berücksichtigt werden (vgl. Kapitel 4.4.3.).

Um die Dichte der Bebauung bei der Steuerung des Extraktionsansatzes zu berücksichtigen, kann eine entsprechende Parameterwahl erfolgen. Die Dichte der Bebauung steht in Zusammenhang mit dem Baufortschritt und ist somit von der Zeit zwischen Bauentwurf und Befliegung abhängig. Bei den vorliegenden Tests wurden die Parametersätze durch eine (manuelle) Betrachtung der Szene entsprechend angepasst. Um diesen Vorgang zu automatisieren, könnten die Parametersätze in Abhängigkeit von der Bauzeit generiert werden. Dabei sollte die Art des Neubaugebietes und die Jahreszeit auch berücksichtigt werden.

5.5. Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird ein wissensbasierter Ansatz für die Vervollständigung des ATKIS Basis-DLM aus Luftbildern vorgestellt. Ziel ist es, ein operationell einsetzbares System zu entwickeln, welches einen Operateur des BKG bei der Bewertung des ATKIS Basis-DLM unterstützt. Um dies zu gewährleisten, wurden Zuverlässigkeit und die Effizienz der automatischen Komponente in den Vordergrund gestellt.

Lücken im ATKIS Basis-DLM wurden für ein Testgebiet kategorisiert und dementsprechend differenzierte Ansätze zur Detektion vorgestellt. Dabei wurden Unterschiede der fehlenden Objekte in Objektart, Länge, Kontext, topologischen und radiometrischen Eigenschaften deutlich. Je nach Kategorie unterscheiden sich die vorgestellten Ansätze vor allem im Einsatz von Vorwissen. So werden zur Detektion neuer Straßen Bauentwurfsdaten eingesetzt. Bei der Suche nach fehlenden Verknüpfungen wurde vorgeschlagen, an hand der geometrischen Informationen aus Objekten des Basis-DLM einen Suchraum zu definieren. Für die Detektion von Objekten, die man bei der Generierung des Basis-DLM übersehen hat, könnten topologische Eigenschaften des Straßennetzes verwendet werden. Zusätzlich wurden



Vorschläge zur Verwendung umfangreicher Informationen aus dem ATKIS Basis-DLM zur Einschränkung des Suchraums erarbeitet. Somit könnte eine Beschreibung der Geometrie und spezifisches Wissen genutzt werden, um die spezielle Modellierung der zu erwartenden Straßen vorzunehmen.

Resultate aller vorgestellten Ansätze werden nicht präsentiert, da nur theoretische Überlegungen angestellt wurden. Lediglich an hand einer kleinen Testreihe wurde die Verwendung von Bauentwurfsdaten untersucht und ausgewertet. Somit wurden einige Möglichkeiten zur effizienten Vervollständigung des ATKIS Basis-DLM dargestellt.



6. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst. Des Weiteren erfolgt ein Ausblick auf zukünftige Problemstellungen.

6.1. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden semiautomatische Verfahren für die Qualitätskontrolle von linienhaften Geo-Daten an hand von Fernerkundungsdaten vorgestellt und untersucht. Von besonderem Interesse war dabei der Einsatz von Vorwissen zur Steuerung der automatischen Komponenten für die Qualitätskontrolle.

Bei einer eingehenden Literaturrecherche im 3. Kapitel wurden verschiedenste Ansätze beleuchtet. Dabei stellte sich heraus, dass es sinnvoll ist, Wissen über die Topologie des Straßennetzes für die automatische Steuerung der Verifikation einzusetzen.

Dementsprechend wurde ein weiterentwickeltes System im 4. Kapitel genauer untersucht. Darin wird die Verknüpfung zweier Straßenverifikationsmodule durch die logische Darstellung der typischen Topologie des Straßennetzes realisiert. Ziel der Entwicklung dieses Systems ist es, einen Operateur des BKG bei der Bewertung des ATKIS Basis-DLM zu unterstützen. Mittels umfangreicher Tests konnte in dieser Arbeit nachgewiesen werden, dass so der Aufwand für einen Operateur erheblich reduziert werden kann. Es wurde deutlich, dass auch weiterhin nur semiautomatische Systeme eine akzeptable Zuverlässigkeit bei einer hohen Effizienz erreichen können. Zusätzlich konnten an hand einer Fehleranalyse verschiedene Defizite der dem System hinterlegten Straßenextraktionssoftware abgegrenzt werden.

Neben der Verifikation von Geo-Daten ist auch die Änderungsdetektion ein wichtiger Teil der Qualitätskontrolle. Im 5. Kapitel wurden theoretische Vorschläge für die Entwicklung eines Systems zur Änderungsdetektion des ATKIS Basis-DLM erarbeitet. Auftretende Lücken im Straßennetz des Basis-DLM wurden untersucht und in verschiedene Klassen unterteilt. Diese



Untergliederung war auf Grund des unterschiedlichen Vorwissens, das für die Steuerung des Prozesses der Detektion genutzt werden kann, sinnvoll. Für Lücken im Straßennetz, die bei der Erfassung der Daten entstanden sind, kann das bereits verifizierte Netz als Startpunkt für die Extraktion genutzt werden. Zusätzlich können Ähnlichkeiten im Straßenmodell zwischen bereits verifizierten Objekten und benachbarten fehlenden Objekten für die Steuerung des Extraktionsprozesses verwendet werden. Bei neu gebauten Straßen können Informationen aus vorhandenen Bauentwurfsdaten abgeleitet werden. Die Steuerung der Extraktion kann somit objektbezogen ablaufen. Das Wissen über die Geometrie und die Attribute der Objekte kann zur Definition eines Suchraumes genutzt werden. Somit kann das im 4. Kapitel beschriebene System zur Verifikation der Bauentwurfsdaten genutzt werden. Dieses wurde entsprechend den typischen radiometrischen Eigenschaften von neu erstellten Straßen in einem Orthofoto angepasst und in zwei Neubaugebieten getestet. Die Qualitätsmaße für die Ergebnisse zeigen jedoch ein differenziertes Bild. Der verwendete Verifikationsansatz erzielt die besten Ergebnisse in offenen Gebieten. In dichter bebauten Bereichen ist die Effizienz des Ansatzes erheblich eingeschränkt, da der verwendete Extraktionsansatz in urbanen Gebieten Schwächen aufweist.

Die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse belegen, dass eine auf umfangreichen Vorwissen basierende Steuerung sowohl bei der Erfassung von Veränderungen als auch bei der Verifikation für einen hohen Automatisierungsgrad entscheidend ist.

6.2. Ausblick

Die Untersuchungen der topologiegestützten Steuerung des Verifikationsprozesses wurden in dieser Arbeit mit einer ausführlichen Fehleranalyse durchgeführt. Um allgemein gültige Aussagen über die Qualitätsmaße treffen zu können, sollte dies für weitere Orthofotos aus verschiedenen Bundesländern geschehen.

Auch die im 5. Kapitel präsentierten Statistiken über die auftretenden Lücken im ATKIS Basis-DLM sollten noch erweitert werden. Dazu kann das entsprechende Fehlerprotokoll des BKG verwendet werden. Um die erarbeiteten Vorschläge zum Einsatz von Vorwissen in der Änderungsdetektion einschätzen zu können, müssen die theoretischen Überlegungen in lauffähige



Software implementiert werden. Analog zum Verifikationsmodul sind dann umfangreiche Tests notwendig.

Bei der Literaturrecherche wurden Systeme vorgestellt, die unterschiedlichste Extraktionsansätze verwenden. Diese weisen jeweils spezielle Stärken bei verschiedenen Bildauflösungen, Farbkanälen und Straßenmodellen auf. Eine Kombination der Extraktionsansätze und deren Datenquellen sollte zu besseren Ergebnissen führen. Die Qualitätskontrolle von Geo-Daten für den Bereich offene Landschaft ist relativ weit fortgeschritten, könnte aber in Zukunft um entsprechende Extraktionsansätze für urbane Regionen erweitert werden. Für alle automatischen Verfahren zur Qualitätskontrolle von Geo-Daten ist die Zuverlässigkeit des Menschen und die Geschwindigkeit des Computers jeweils das Ziel. Der Mensch setzt allgemeine Erfahrungen ein, um Bilddaten zu analysieren. Dieser Prozess findet im Unterbewusstsein statt und ist schwer als logischer Prozess zu isolieren. So sucht beispielsweise ein Operateur automatisch eine Region genauer ab, in der er aus Erfahrung eine Straße vermutet. Diesem Sachverhalt wurde ansatzweise durch den zweistufigen Ansatz, der im 4. Kapitel beschrieben wurde, Rechnung getragen. Die logische Verknüpfung der beiden Verifikationsmodule wurde auf die Verbindungsfunktion des Straßennetzes bezogen. Andere Funktionen des Straßennetzes, wie z.B. die Erschließungsfunktion, könnten in Zukunft für eine weitere Verbesserung der Steuerung des zweistufigen Ansatzes genutzt werden.



Literaturverzeichnis

ADV (2003) : ATKIS-Spitzenaktualität auf Internetseite:

<http://www.atkis.de/meta/html/spitzakt.htm>

BARTHELME, N. (2000) : *Geoinformatik – Modelle, Strukturen, Funktionen*. Springer Verlag

BAUMGARTNER, A., ECKSTEIN, W., MEYER, H., HEIPKE, C. UND H. EBNER (1997) : *Context-supported road extraction*. In Grün, A., Baltsavias, E.P. und O. Henricsson, Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (II), Birkhäuser Publishers Basel, 1997, Seiten 229 – 308

BORDES, G., GIRAUDON, G. UND O. JAMET (1997) : *Road Modelling Based on a Cartographic Database for Aerial Image Interpretation. Semantic Modelling for Acquisition of Topographic Information from Images and Maps*. In Förstner, W. and L. Plümer, Birkhäuser Verlag, Basel, Seiten 123 – 139

BUTENUTH, M. (2002) : *Steuerung bei der Qualitätskontrolle linienhafter Geo-Daten auf Basis von Orthofotos unter Nutzung eines GIS*. Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Uni-Hannover

CASPARY, W. (1992) : *Qualitätsmerkmale von Geo-daten*. In: Zeitschrift für Vermessungswesen (117) 7, Seiten 360 – 367, Wittwer Verlag Stuttgart

COULOIGNER, I. UND T. RANCHIN (2000) : *Mapping of urban areas : a multiresolution modelling approach for semi-automatic extraction of streets*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol LXVI, No. 7, Seiten 867 - 874

DUDA, R.O. UND P.E. HART. (1973) : *Pattern Classification and Scene Analysis*, Wiley, New York, Seite 482

ENGLISCH, A. UND C. HEIPKE (1998) : *Erfassung und Aktualisierung topografischer Geo-Daten mit Hilfe analoger und digitaler Luftbilder*. PGF 3, Seiten 133 – 149



FISCHLER, M.A., TANNENBAUM, J.M. UND H.C. WOLF (1981) : *Detection of roads and linear structures in Low-Resolution Aerial Imagery Using a Multisource Knowledge Integration Technique*. Computer Graphics and Image Processing, Vol. 15, Seiten 201 – 223

GERKE, M., BUTENUTH, M., HEIPKE, C. UND F. WILLRICH (2003) : *Graph supported verification of road databases*. 2nd International Symposium on Spatial Data Quality, Hongkong, W. Shi, M.F. Goodchild, P.F. Fisher (Ed.), Seiten 421 - 430

GRÜN A. UND H. LI (1996) : *Linear Feature Extraction with LSB-Snakes from Multiple Images*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol XXXI Part B3, Wien, Seiten 266 – 272

GRACA, L.M. (1987) : *A Concept for Automatic Change Detection in Revision of Topographic Maps by Means of Digital Image Processing and Pattern Recognition Techniques*. M.Sc. thesis, International Institute of Aerospace Survey and Earth Sciences.

HAKE, G. UND D. GRÜNREICH (2002) : *Kartographie*. de Gruyter Verlag 8. Aufl.

HOHEISEL, S. (2003) : : *Automated Road Extraction from Radar and Optical Imagery*, Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie und GeoInformation, Uni-Hannover

JAIN, A.K. UND R.C. DUBES (1988) : *Algorithms for Clustering Data*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey

Joos, G. (2003) : *Standardization of Data Quality Measures*. 2nd International Symposium on Spatial Data Quality, Hongkong, W. Shi, M.F. Goodchild, P.F. Fisher (Ed.)

LIEDTKE, C.-E., BÜCKNER, J., PAHL, M. UND O. STAHLHUT (2001) : *Knowledge based system for the interpretation of complex scenes*. In E. Baltsavias, A. Grün, L. van Gool (eds.), *Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images (III)*, A.A. Balkema Publishers, Lisse / Abingdon / Exton(PA) / Tokio, Seiten 3 - 12

McKEOWN D. UND J. DENLINGER (1988) : *Cooperative methods for road Tracking In aerial Imagery*. Computer Vision and Pattern Recognition. Seiten 662 – 672



MERLET, N. UND J. ZERUBIA (1996) : *New Prospects in Line Detection by Dynamic Programming*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol XVIII, No. 4, Seiten 426 - 431

PELZER, H. (1979) : *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung. Vorträge des Kontaktstudiums Februar 1979 in Hannover*. Konrad Wittwer Stuttgart

PIETSCH, W. (1989) : *Straßenplanung*. Werner-Verlag 5. Aufl.

SOLBERG, R. (1992) : *Semi-automatic revision of topographic maps from satellite imagery*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol XXIX Part B4, 549 – 556

STEGER, C. (1998) : *An unbiased detector of curvilinear structures*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol XX, No. 2, Seiten 311 - 326

SUI, H., LI, D. UND J. GONG (2002) : *Automatic change detection for road networks from imagery based on GIS*. In: IAPRS, Vol XXXIV, Part 2, Xi'an 2002, Seiten 437 – 438

VOSELNANN G. UND J. DE KNECHT (1995) : *Road Tracing by Profile Matching and Kalman Filtering*. Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space-Images, BirkHauser Verlag Basel, Seiten 265 - 274

WALTER, V. (2000) : *Automatic Change Detection in GIS Databases Based on Classification of Multispectral Data*. In: IAPRS, Vol XXXIII, Part B4, Amsterdam 2000, Seiten 1138 – 1145

WANG, J.F. UND P.J. HOWARTH (1987) : *Automated Road Network Extraction from Landsat TM Imagery*. ASPRS-ASCM Annual Convention Proceedings, Vol. I, Seiten 429 – 438

WIEDEMANN, C (2001) : *Extraktion von Straßennetzen aus optischen Satellitenbildern*. Dissertation Lehrstuhl für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU München.

WIEDEMANN, C. (2002) : *Extraktion von Straßennetzen aus optischen Satellitenbildern*. DGK bei der bayrischen Akademie der Wissenschaften, Reihe C Dissertationen, Heft 551, München, Seite 94



WIEDEMANN, C. UND H. EBNER (2000) : *Automatic Completion and Evaluation of Road Networks.* IntArchPhRS (33), Part B3, Amsterdam, Seiten 979 – 986

WILLRICH, F. (2002) : *Quality Control and Updating Road Data by GIS-driven Road Extraction from Imagery.* IntArchPhRS (34), Part 4, Ottawa, Seiten 761 – 767

ZHANG, C. UND E.P. BALTSAVIAS, (2002) : *Improving Cartographic Road Databases By Image Analysis.* IntArchPhRS (34), Part 3, Graz, Seiten 400 – 405



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 : Vergleich des Datenbank-Objektes mit dem Extraktionsergebnis nach [SUI ET AL. 2002].....	12
Abbildung 2 : Verlaufsdiagramm des Ansatzes nach [BORDES ET AL. 1997]	15
Abbildung 3 : Datenbank Straßenmodell nach [BORDES ET AL. 1997]	17
Abbildung 4 : Komponenten des Systems zur Aktualisierung nach [WILLRICH 2002]	33
Abbildung 5 : Vergleich der im 3. Kapitel vorgestellten Ansätze mittels der zu Beginn gestellten Fragen.....	44
Abbildung 6 : Schematische Darstellung des topologiegestützten Systems nach [GERKE ET AL. 2003].....	49
Abbildung 7 : Statistik der auftretenden False-Negatives, (rote Balken = relevant für die Parameterwahl, schwarzer Balken = irrelevant für die Parameterwahl).....	50
Abbildung 8 : Sensitivitätsanalyse mit einem um 100 gon gedrehten Orthofoto und dem entsprechenden ATKIS-Datensatz (rot = verworfen, grün = akzeptiert) als Vergleich zwischen : a) dem Verifikationsprozess mit den Parametern der Phase 1, b) dem Verifikationsprozess mit den Parametern der Phase 2	52
Abbildung 9 : Detailansicht für begründete „Fehlverifikation“ : a) Extraktionsergebnis (blau = extrahierte Liniensegmente), b) falsche ATKIS-Informationen im Orthofoto (rot = verworfen, grün = akzeptiert).....	53
Abbildung 10 : 1. Beispiel für die Auswahl der Straßen für die zweite Bewertungsphase (grün = akzeptiert I, rot gestrichelt = verworfen I, Kreis = Startpunkte für A*)	55
Abbildung 11 : 2. Beispiel für die Auswahl der Straßen für die zweite Bewertungsphase (grün = akzeptiert I, rot gestrichelt = verworfen I, Kreis = Startpunkte für A*, schwarze Punkte = Start- und Endpunkte der Objekte).....	55
Abbildung 12 : Das für den Bewertungsprozess beispielhaft genutzte Orthofoto	57



Abbildung 13 : Das Resultat der topologiegestützten Verifikation mit dem auflösungsreduzierten Orthofoto (blaue Region = Siedlungsgebiet, grün = akzeptiert I, rot = verworfen I, grünschwarz gestrichelte Linie = akzeptiert II, rotschwarz gestrichelte Linie = verworfen II).....	57
Abbildung 14 : a) Resultate des bisherigen Systems mit dem strengen Parametersatz der Phase 1, b) Resultate des bisherigen Systems mit dem toleranten Parametersatz der Phase 2.....	60
Abbildung 15 : Resultate des neu entwickelten topologiegestützten Systems mit den Parametersätzen für Phase 1 und Phase 2	60
Abbildung 16 : Statistik für das Auftreten der False-Positives	62
Abbildung 17 : Vergrößerte Detailansicht eines False-Positives durch eine zu groß gewählte Bufferbreite: a) Bildausschnitt, b) Bildausschnitt mit ATKIS-Objekt (grün = akzeptiertes Straßenobjekt), c) erstes Extraktionsergebnis (blau = linienhafte Objekte), d) Resultat der Gruppierung (gelb = Verknüpfung zu einer Linie).....	64
Abbildung 18 : Detailansicht eines False-Positives durch Extraktion von parallelen Objekten : a) Bildausschnitt, b) Bildausschnitt mit ATKIS-Objekt (grün = akzeptiertes Straßenobjekt) c) erstes Extraktionsergebnis (blau = linienhafte Objekte), d) Resultat der Gruppierung (gelb = Verknüpfung zu einer Linie).....	65
Abbildung 19 : Stark vergrößerte Detailansicht eines False-Positives : a) Bildausschnitt mit ATKIS-Objekt (grün = akzeptiertes Straßenobjekt), b) erstes Extraktionsergebnis (blau = linienhafte Objekte und Seed-Vektoren), d) Resultat der Gruppierung (gelb = Seed-Vektoren)	67
Abbildung 20 : Detailansicht eines False-Positives : a) Bildausschnitt, b) erstes Extraktionsergebnis (blau = linienhafte Objekte) c) Resultat der Gruppierung mit den Parametern der Phase 1 (gelb = Verknüpfung der extrahierten Liniensegmente) d) Resultat der Gruppierung mit den Parametern der Phase 2 (gelb = Verknüpfung zu einer Linie).....	68
Abbildung 21 : Detailansicht eines False-Positives durch mangelnde Betrachtung des lokalen Kontexts : a) Bildausschnitt, b) Bildausschnitt mit ATKIS-Objekt (grün = akzeptiertes	



Straßenobjekt) c) erstes Extraktionsergebnis (blau = linienhafte Objekte),d) Resultat der Gruppierung (gelb = Verknüpfung zu einer Linie).....	69
Abbildung 22 : Detailansicht eines False-Positives durch Mängel des verwendeten Straßenmodells : a) Bildausschnitt, b) Bildausschnitt mit ATKIS-Objekt (grün = akzeptiertes Straßenobjekt) c) erstes Extraktionsergebnis (blau = linienhafte Objekte), d) Resultat der Gruppierung (gelb = Verknüpfung zu einer Linie).....	70
Abbildung 23 : Statistik für das Auftreten der False-Negatives.....	72
Abbildung 24 : Statistik für das Auftreten der True-Positives.....	74
Abbildung 25 : Statistik für das Auftreten der True-Negatives	75
Abbildung 26 : Zusammenfassung der Ergebnisse aller Testreihen : a) Legende mit Zuweisung True-Positives (TP), False-Positives (FP), False-Negatives (FN) und True-Negatives (TN), b) Resultate der Testreihe des einfachen Systems mit den toleranten Parametern, c) Resultate der Testreihe des einfachen Systems mit den strengen Parametern, d) Resultate des Topologieansatzes	76
Abbildung 27 : Basis-DLM-Objekte sind nicht korrekt verknüpft (grün = Objekte des ATKIS Basis-DLM, rot = nachdigitalisiertes Objekt).....	83
Abbildung 28 : Basis-DLM-Objekt ist unterbrochen (grün = Objekte des ATKIS Basis-DLM, rot = nachdigitalisiertes Objekt)	83
Abbildung 29 : Objekte des Basis-DLM und ein nachdigitalisierter Straßenabschnitt (grün = Objekte des ATKIS Basis-DLM, rot = nachdigitalisiertes Objekt)	85
Abbildung 30 : Dicht bebautes Neubaugebiet am Stadtrand mit zahlreichen neuen Straßen, die nicht im ATKIS Basis-DLM enthalten sind (grün = Objekte des ATKIS Basis-DLM, rot = nachdigitalisierte Objekte).....	89
Abbildung 31 : Neubaugebiet mit Umgehungsstraße ist nicht im Basis-DLM enthalten (grün = Objekte des ATKIS Basis-DLM, rot = nachdigitalisierte Objekte).....	90



Abbildung 32 : Verifikation in einem Neubaugebiet mit dichter Bebauung (grün = akzeptiertes Objekt, rot = verworfenes Objekt).....	94
Abbildung 33 : Verifikation in einem offenen Neubaugebiet (grün = akzeptiertes Objekt, rot = verworfenes Objekt).....	95
Abbildung 34 : Sensitivitätsanalyse in einem Neubaugebiet mit dichter Bebauung (grün = akzeptiertes Objekt, rot = verworfenes Objekt).....	97
Abbildung 35 : Sensitivitätsanalyse in einem offenen Neubaugebiet (grün = akzeptiertes Objekt, rot = verworfenes Objekt)	98



Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 : Einordnung der Fehler erster und zweiter Ordnung.....	45
Tabelle 2 : Resultat der Sensitivitätsanalyse für zehn Orthofotos	52
Tabelle 3 : Resultate des topologiegestützten Ansatzes im Testgebiet, aufgeschlüsselt nach den beiden Verifikationsmodulen	59
Tabelle 4 : Auftreten von False-Positives in den verschiedenen Testreihen.....	62
Tabelle 5 : Zuordnung der False-Positives zu verschiedenen Fehlergruppen	63
Tabelle 6 : Auftreten von False-Negatives in den verschiedenen Testreihen.....	72
Tabelle 7 : Auftreten von True-Positives in den verschiedenen Testreihen.....	73
Tabelle 8 : Auftreten von True-Negatives in den verschiedenen Testreihen.....	74
Tabelle 9 : Kategorisierung fehlender Straßen	81
Tabelle 10 : Statistik über die fehlenden Verknüpfungen	84
Tabelle 11 : Statistik der fehlenden Objekte	86
Tabelle 12 : Topologiestatistik der fehlenden Objekte.....	86
Tabelle 13 : Statistik der neu gebauten Objekte.....	91
Tabelle 14 : Resultat der Verifikation in einem Neubaugebiet mit dichter Bebauung	95
Tabelle 15 : Resultat der Verifikation in einem offenen Neubaugebiet.....	96
Tabelle 16 : Resultat der Sensitivitätsanalyse in einem Neubaugebiet mit dichter Bebauung.....	97
Tabelle 17 : Resultat der Sensitivitätsanalyse in einem offenen Neubaugebiet.....	98



Anhang A

A.1. : Parametersätze zur Steuerung der Extraktionssoftware

A.1.1. Parametersätze des zweistufigen topologiegestützten Systems

Parameter	Phase1	Phase2
ExtrLines		
LINE_WIDTH	5.0	5.0
CONTRAST_HIGH	40	15
CONTRAST_LOW	20	15
LINE_BRIGHTNESS	light	light
EXTRAKT_WIDTH	true	true
CORRECT_POSITION	true	true
COMPLETE_JUNCTIONS	true	true
THRESHOLD	0	0
EXTRACT_INSIDE_MASK	true	true
SMSPLINES		
SMOOTH_LENGTH	5	5
MAX_CURVATURE	0.1	0.1
ASSESSLINES		
LENGTH	0 50	0 50
DIRECTION_DEV	0 10	0 10
WIDTH	2 3 6 10	2 3 6 10
WIDTH_DEV	0 5	0 5
GREY_DEV	0 20	0 20
MAX_RAMER_DISTANCE	-1	-1
FUSELINES		
WEIGHT_SCALES_LIGHT	1	1
WEIGHT_SCALES_DARK	1	1
WEIGHT_SCALES_SEED	1	1
BUFFER_WIDTH	8	8
MAX_DIRECTION_DIFFERENCE	30	30
SPLITLINES		
SPLITTED_JUNCTION_DISTANCE	5	5
SHORTESTPATHS		
RESOLUTION	1.0	1.0
WEIGHT	0 1	0 1
ABS_DISTANCE	5 120	5 120
REL_DISTANCE	1 4	1 8
COLLINEAR	0 25	0 25
JUNCTION	55 90	55 90
MAX_DIST_JUNCTION	5	5
SCALE_LENGTH	True	True
WEIGHT_SEEDPOINT	1.0	1.0
MIN_DISTANCE	1	1



A.1.2. Parametersätze für ein dicht bebautes Neubaugebiet

Parameter	Phase1	Phase2
ExtrLines		
LINE_WIDTH	5.0	5.0
CONTRAST_HIGH	35	15
CONTRAST_LOW	5	15
LINE_BRIGHTNESS	light	Light
EXTRAKT_WIDTH	true	True
CORRECT_POSITION	true	True
COMPLETE_JUNCTIONS	true	True
THRESHOLD	0	0
EXTRACT_INSIDE_MASK	true	True
SMSPLINES		
SMOOTH_LENGTH	5	5
MAX_CURVATURE	0.1	0.1
ASSESSLINES		
LENGTH	0 50	0 50
DIRECTION_DEV	0 10	0 10
WIDTH	2 3 8 14	2 3 8 14
WIDTH_DEV	0 5	0 5
GREY_DEV	0 20	0 20
MAX_RAMER_DISTANCE	-1	-1
FUSELINES		
WEIGHT_SCALES_LIGHT	1	1
WEIGHT_SCALES_DARK	1	1
WEIGHT_SCALES_SEED	1	1
BUFFER_WIDTH	8	8
MAX_DIRECTION_DIFFERENCE	30	30
SPLITLINES		
SPLITTED_JUNCTION_DISTANCE	5	5
SHORTESTPATHS		
RESOLUTION	1.0	1.0
WEIGHT	0 1	0 1
ABS_DISTANCE	2 100	5 120
REL_DISTANCE	1 2	1 6
COLLINEAR	0 35	0 35
JUNCTION	55 90	55 90
MAX_DIST_JUNCTION	5	5
SCALE_LENGTH	True	True
WEIGHT_SEEDPOINT	0.99	0.99
MIN_DISTANCE	100	100



A.1.3. Parametersätze für ein offenes Neubaugebiet

Parameter	Phase1	Phase2
ExtrLines		
LINE_WIDTH	5.0	5.0
CONTRAST_HIGH	35	15
CONTRAST_LOW	20	15
LINE_BRIGHTNESS	light	light
EXTRAKT_WIDTH	true	true
CORRECT_POSITION	true	true
COMPLETE_JUNCTIONS	true	true
THRESHOLD	0	0
EXTRACT_INSIDE_MASK	true	true
SMSPLLines		
SMOOTH_LENGTH	5	5
MAX_CURVATURE	0.1	0.1
ASSESSLines		
LENGTH	0 50	0 50
DIRECTION_DEV	0 10	0 10
WIDTH	2 3 6 10	2 3 6 10
WIDTH_DEV	0 5	0 5
GREY_DEV	0 20	0 20
MAX_RAMER_DISTANCE	-1	-1
FUSELines		
WEIGHT_SCALES_LIGHT	1	1
WEIGHT_SCALES_DARK	1	1
WEIGHT_SCALES_SEED	1	1
BUFFER_WIDTH	8	8
MAX_DIRECTION_DIFFERENCE	30	30
SPLITLines		
SPLITTED_JUNCTION_DISTANCE	5	5
SHORTESTPATHS		
RESOLUTION	1.0	1.0
WEIGHT	0 1	0 1
ABS_DISTANCE	5 80	5 100
REL_DISTANCE	1 2	1 4
COLLINEAR	0 25	0 25
JUNCTION	55 90	55 90
MAX_DIST_JUNCTION	5	5
SCALE_LENGTH	True	True
WEIGHT_SEEDPOINT	1.0	1.0
MIN_DISTANCE	1	1

Eine genauere Beschreibung der Software „Quala“, der Parametersätze und deren weitere Funktionen sind in [BUTENUTH 2002] beschrieben.