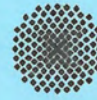


fi

Universität Stuttgart



Schriftenreihe der Institute des Fachbereichs Vermessungswesen

Technical Reports
Department of Geodesy



M. Sester, F. Krumm (Hrsg.)

GIS-Forschung im Studiengang Geodäsie und Geoinformatik

ISSN 0933-2839

Report Nr. 1999.1

GIS – Forschung im Studiengang Geodäsie und Geoinformatik der Universität Stuttgart

Mit der wachsenden Verfügbarkeit digitaler, raumbezogener Daten geht auch eine zunehmende Verbreitung raumbezogener Informationssysteme, sog. Geo-Informationssysteme (GIS), einher. Zum einen ermöglichen diese erst, der gewaltigen Datenflut Herr zu werden, zum anderen unterstützen sie den Anwender in der Analyse der Daten zur Gewinnung neuer Information. Die Einsatzgebiete und Anwendungsmöglichkeiten sind kaum aufzählbar. Der steigenden Kommerzialisierung, die sich vor allem in einer Vielzahl an Desktop Mapping Produkten manifestiert, steht ein verstärkter Forschungsbedarf und auch ein wachsendes Forschungspotential gegenüber. Über diese Forschungsmöglichkeiten im Bereich GIS soll in diesem Heft berichtet werden. Es handelt es sich dabei um aktuelle Arbeiten wissenschaftlicher Mitarbeiter der Institute der Geodäsie und Geoinformatik.

Zunächst berichtet Karl-Heinrich Anders über Ansätze des Data Mining, einem hochaktuellen Forschungsthema der Informatik. Anwendungen des sog. Spatial Data Mining, der Erweiterung um räumliche Komponenten, wird anhand einiger Beispiele deutlich gemacht.

Frank Anshelm und Thomas Gauger bearbeiten Projekte im Umweltbereich. In ihrem ersten Beitrag gehen sie auf die Auswirkungen von Luftverunreinigungen auf Materialien ein, während im zweiten Beitrag das „Critical Levels and Loads“-Konzept vorgestellt wird, welches die Auswirkungen anthropogener Schadstoffbelastungen in der Atmosphäre beschreibt. Deren räumliche Verteilung läßt sich mit Hilfe von GIS kartieren.

Michael Glemser und Ulrike Klein stellen Konzepte vor, wie heutige Geo-Informationssysteme um eine Genauigkeitskomponente bzw. Qualitätskomponente erweitert werden können. Solche Methoden, die in engem Zusammenhang mit OpenGIS, einem aktuellen Forschungstrend im GIS-Bereich stehen, sind elementar für eine zukünftige offene und flexible Nutzung und Verarbeitung von Daten aller Art. Die Integration bedarf einer Fülle von zu realisierenden Komponenten, u.a. auch der Frage der Festlegung der Genauigkeit topologischer Relationen, womit die Beziehungen zwischen Objekten modelliert werden. Hierzu stellen Michael Glemser, Sandra Krauß und Christian Schneider eine mögliche Realisierung vor. Weiterhin ist es unerlässlich, die Fehlerfortpflanzung bei Analyseoperationen zu untersuchen. Hiermit beschäftigt sich der Beitrag von Michael Glemser und Christian Henneberg.

Stefan Güth betrachtet in seinem Beitrag die Möglichkeiten der Integration von GIS und Fernerkundung am Beispiel einiger Anwendungen aus dem Agrarbereich. Steffen Volz und Monika Sester berichten über ein Konzept zur schnellen Erfassung, Dokumentation und Analyse von Schäden, die durch Erdbeben verursacht wurden. Dieses Projekt wurde in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität in Istanbul durchgeführt.

Volker Walter erläutert ein Verfahren, die Fortführung von digitalen Datensätzen zu automatisieren. Am Beispiel des Amtlichen Topographischen Kartographischen Informationssystems ATKIS zeigt er ein durchgängiges Konzept, wie Änderungen im Datenbestand mittels Bilddaten automatisch detektiert werden können. Im Zuge einer wachsenden Verfügbarkeit auch hochauflösender Bilddaten, wie sie mit dem Start neuer amerikanischer Satellitenprogramme zu erwarten ist, werden solche Techniken unerlässlich werden.

Dieser Einblick in die Vielschichtigkeit von GIS-Anwendungen und Forschungsprojekten mag hoffentlich helfen, etwas von der Faszination des Forschungsthemas GIS zu vermitteln.

Stuttgart, im März 1999

Monika Sester, Friedhelm Krumm

Inhaltsverzeichnis

Karl-Heinrich Anders, Institut für Photogrammetrie Automatische Interpretation digitaler Landschaftsmodelle.....	1
Frank Anshelm und Thomas Gauger, Institut für Navigation Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien unter ARC/INFO.....	16
Thomas Gauger und Frank Anshelm, Institut für Navigation Kartierung kritischer Luftbelastungen unter ARC/INFO.....	21
Michael Glemser und Ulrike Klein, Institut für Photogrammetrie Hybride Modellierung und Analyse von unsicheren Daten.....	27
Michael Glemser und Christian Henneberg, Institut für Photogrammetrie Untersuchungen zu den Fehlerfortpflanzungseigenschaften der geometrischen Genauigkeit bei der Flächenverschneidung.....	44
Michael Glemser, Sandra Krauß und Christian Schneider, Institut für Photogrammetrie Das Minimum-Maximum-Modell – eine qualitative Beschreibung der geometrischen Genauigkeit und ihre Integration in GIS.....	57
Stefan Güth, Institut für Navigation ARC/INFO und Satellitenfernerkundung.....	70
Steffen Volz und Monika Sester, Institut für Photogrammetrie Dokumentation und Analyse von Erdbebenschäden an Gebäuden mit Hilfe eines Geo-Informationssystems.....	76
Volker Walter, Institut für Photogrammetrie Automatische Fortführung von ATKIS-DLM 25.....	90

Automatische Interpretation Digitaler Landschaftsmodelle

Karl-Heinrich Anders

1 Einleitung

Die Notwendigkeit der automatisierten Fortführung von raumbezogenen Daten wird heutzutage immer deutlicher, da die große Menge an raumbezogenen Daten, die in digitaler Form vorliegen, stetig ansteigt. All diese raumbezogenen Daten basieren überwiegend auf verschiedenen Modellen der Landschaft. Unterschiede in diesen Modellen betreffen z. B. die Objektart, den Grad an Generalisierung oder die geometrische Genauigkeit der erfaßten Landschaftsobjekte. Eine rein interaktive Bearbeitung und Analyse großer raumbezogener Datenbanken ist extrem zeit- und kostenintensiv. Besonders die operationelle Analyse raumbezogener Daten zu Fortführungszwecken wird in naher Zukunft an ihre Grenzen der Realisierbarkeit stoßen. Diese Problematik erfordert, Methoden des sogenannten *Spatial Data Mining* oder *Knowledge Discovery in Spatial Databases (KDSD)* in Geo-Informationssystemen zu integrieren. Unter dem Begriff Knowledge Discovery in Spatial Databases versteht man die Ableitung markanter, impliziter und vorher unbekannter Informationen aus großen räumlichen Datenbanken. Das Aufgabenfeld von KDSD integriert die Gebiete des Maschinellen Lernen, Datenbanksysteme, Datenvisualisierung, Statistik, Informationstheorie und algorithmischer Geometrie. Einen Einblick in das relativ junge Gebiet des Spatial Data Mining erhält man durch folgende Literatur : (Anand, Bell & Hughes 1993), (Bell, Anand & Shapcott 1994), (Ester, Kriegel & Xu 1995), (Ester, Kriegel, Sander & Xu 1996), (Fotheringham & Rogerson 1994), (Guan & Bell 1991), (Han, Nishio & Kawano 1994), (Koperski & Han 1995), (Koperski, Adhikary & Han 1996), (Lu, Han & Ooi 1993), (Mohan & Kashyap 1988), (Molenaar 1996), (Ng & Han 1994), (Regnauld 1996), (Shaw & Wheeler 1994).

Die Anwendung der automatischen Interpretation von digitalen Landschaftsmodellen zur Datenfortführung kann man in drei Gebiete einteilen :

- Ableitung von Vorinformationen für die bildbasierte Fortführung
- Fortführung basierend auf raumbezogenen Daten gleichen Maßstabs
- Fortführung basierend auf raumbezogenen Daten mit unterschiedlichem Maßstab.

Innerhalb unseres Projektes *Automatische Interpretation Digitaler Landschaftsmodelle* untersuchen wir drei Bereiche

- Objektorientierte Modellierung von ATKIS
- Ableitung von Vorinformationen aus digitalen Landschaftsmodellen
- Fortführung von digitalen Landschaftsmodellen.

Im ersten Kapitel gehen wir kurz auf die objektorientierte Modellierung von ATKIS ein. Die Ableitung von Vorinformationen aus digitalen Landschaftsmodellen untersuchten wir anhand der 3D-Gebäuderekonstruktion basierend auf Bild-, Laser- und 2D-Grundriß-Daten. Diese Untersuchungen werden näher im dritten Kapitel beschrieben. Die Fortführung, gestützt auf raumbezogene Daten mit unterschiedlichem Maßstab, wird im vierten Kapitel beschrieben.

2 Abbildung von ATKIS auf ein objektorientiertes Datenmodell

Das Amtliche Topographisch Kartographische Informationssystem (ATKIS) (ATKIS 1988) ist ein objektstrukturiertes Datenmodell für die Modellierung und Erfassung raumbezogener Daten. In ATKIS werden im wesentlichen die objektorientierten Konzepte *Klasse* und *Aggregation* verwendet. Ein ATKIS-Objekt besteht aus einem Objektteil, der die geometrischen Informationen beinhaltet. ATKIS-Objekte wiederum können zu sogenannten Komplexen-Objekten aggregiert werden. Im Gegensatz zur Aggregation wird das Konzept der Klasse in ATKIS nicht im Sinne des objektorientierten Paradigmas verwendet. ATKIS wird hierarchisch in *Objektbereich*, *Objektgruppe* und *Objektart* eingeteilt. Diese Hierarchie kann als eine Art Klassenhierarchie im objektorientierten Sinne gedeutet werden. Sie stellt jedoch nur eine rein begriffliche Gliederung der in ATKIS erfaßten räumlichen Objekte dar. Die Hierarchiestufen Objektbereich und Objektgruppe besitzen jedoch keine eigenen Attribute und haben keine weitere nähere Bedeutung. ATKIS stellt somit keine objektorientierte Klassenhierarchie zur Verfügung, die in mehreren Objektarten vorkommenden Attribute in Oberklassen zusammenfaßt.

Aufgrund des fehlenden Konzepts der *Vererbung* kann die Definition des ATKIS-Datenmodells nicht redundanzfrei erfolgen. In jeder Objektart müssen die Attribute direkt definiert werden. Dadurch wird die Wiederverwendung und Erweiterbarkeit des Datenmodells erschwert und ist nur mit einem höheren Aufwand möglich. Globale Änderungen können nicht in einer entsprechenden Oberklasse ausgeführt werden, sondern müssen explizit in allen Unterklassen (im Fall von ATKIS Objektarten) vorgenommen werden. Die Verwendung aller objektorientierten Konzepte der Datenmodellierung in ATKIS hätte natürlich auch den Vorteil, daß das externe Datenmodell ATKIS direkt ohne Konvertierung in ein objektorientiertes Datenmodell integriert werden könnte, was von Vorteil für Hersteller objektorientierter Geoinformationssysteme wäre.

Innerhalb unseres DFG-Projekts *Automatische Interpretation Digitaler Landschaftsmodelle* erzeugen und verwenden wir ATKIS-Daten. Deshalb müssen wir in der Lage sein, ATKIS-Daten in unserem objektorientierten Datenmodell darstellen zu können. Um nun die ATKIS-Daten innerhalb eines objektorientierten Systems nutzen zu können, muß das ATKIS-Datenmodell in geeigneter Form auf ein voll objektorientiertes Datenmodell abgebildet werden. Unser Datenmodell lehnt sich an das Standard Datenmodell *SAIF* (Spatial Archive Interchange Format) (*Spatial Archive and Interchange Format: Formal Definition Release 3.2* 1995) an. Die in den Abbildungen verwendete *OMT-Notation* (Object Modeling Technique) wird in (Rumbaugh, Blaha, Premerlani, Eddy & Lorensen 1991) beschrieben. Das Symbol der Raute steht bei der OMT-Notation für die Aggregation und das Dreieck für die Vererbung. In unserem Datenmodell werden grundlegende *Containerklassen* verwendet, wie sie jedes objektorientierte Datenbanksystem zur Verfügung stellt (Abb. 1). Ein geographisches Objekt wird durch die Klasse *GeoObjekt* beschrieben (Abb. 2). Jedes *GeoObjekt* besitzt ein Objekt *Thematik* (Abb. 3), das zur thematischen Modellierung dient und ist als assoziative Zugriffsstruktur implementiert. Die Klasse *Raumbezug* dient zur Modellierung der Objektgeometrie (Abb. 4 bis 7). Um verschiedene Relationen zwischen räumlichen Objekten modellieren zu können, wird die Klasse *Relation* (Abb. 8) eingeführt.

Wenn man nun die Definition von ATKIS-Objekten redundanzfrei auf ein objektorientiertes Datenmodell abbilden will, stößt man auf das Problem, daß in ATKIS die Attribute einer Objektart

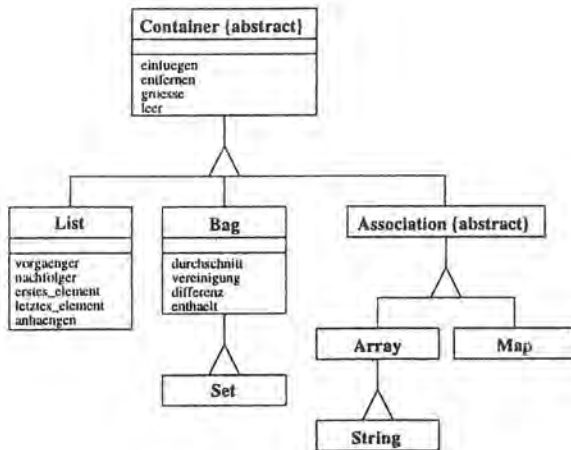


Abbildung 1: Container-Klassen.

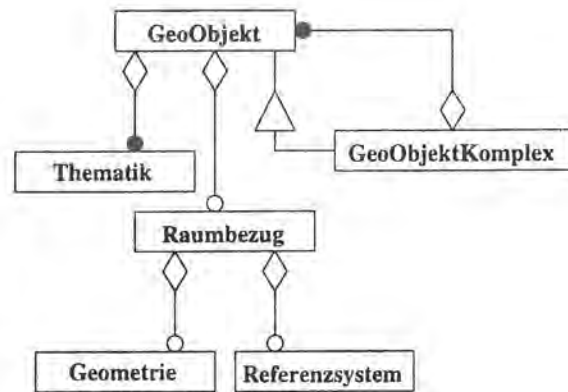


Abbildung 2: Klasse GeoObjekt.

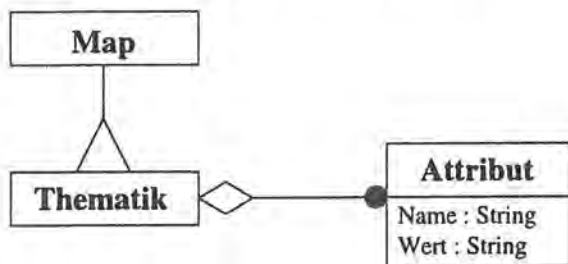


Abbildung 3: Klasse Thematik.

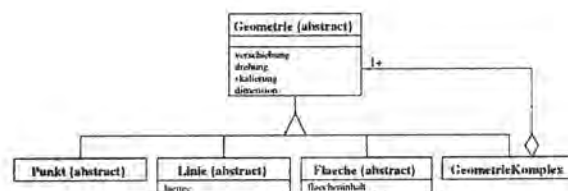


Abbildung 4: Klasse Geometrie.

nicht immer eindeutig im Zusammenhang mit der Klassenhierarchie stehen. Das soll anhand der ATKIS-Objektart Straße verdeutlicht werden (Abb. 9). Um eine redundanzfreie Klassenhierarchie aufbauen zu können ist es möglich, neue Zwischenklassen einzuführen (Abb. 10). Diese Hilfsklassen besitzen jedoch nur wenig semantische Informationen. Eine andere Möglichkeit ist, jedem Objekt einer bestimmten Objektgruppe alle Attribute, die in dieser Gruppe vorkommen, zu vererben und für nicht erfaßte Attribute einen Standardwert, wie z. B. *Nicht Erfaßt*, einzuführen. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, daß diese zweite Variante die geeignetere ist. Abbildung 11 zeigt am Beispiel Straße, wie ein ATKIS-Objekt in unserem Datenmodell dargestellt werden kann. Diese Arbeiten wurden in (Fritsch & Anders 1996) veröffentlicht.

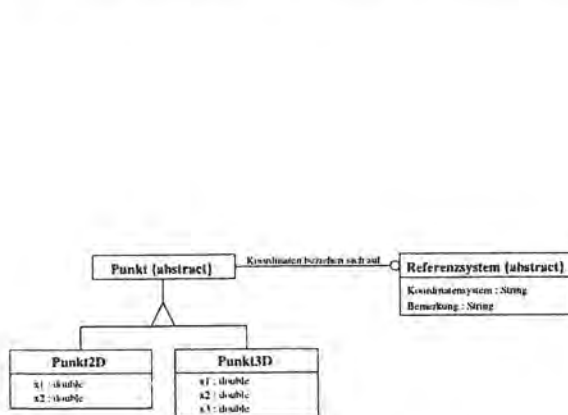


Abbildung 5: Klasse Punkt.

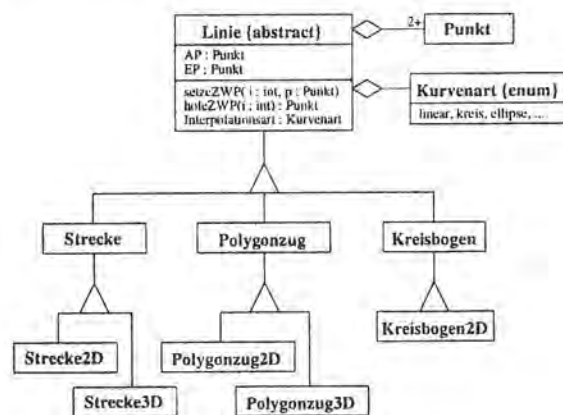


Abbildung 6: Klasse Linie.

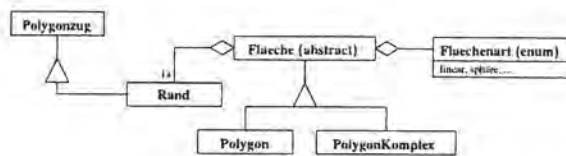


Abbildung 7: Klasse Fläche.

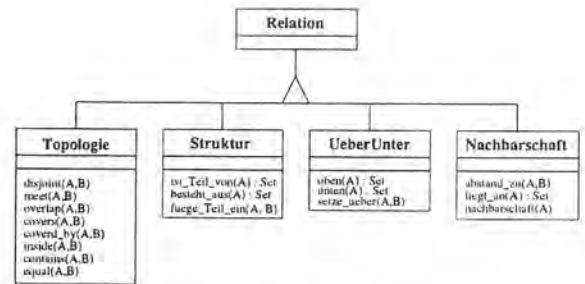


Abbildung 8: Klasse Relation.

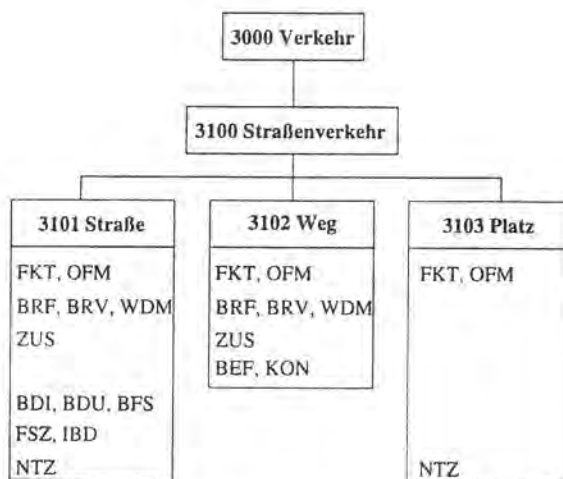


Abbildung 9: ATKIS Objektbereich 3000 Verkehr.

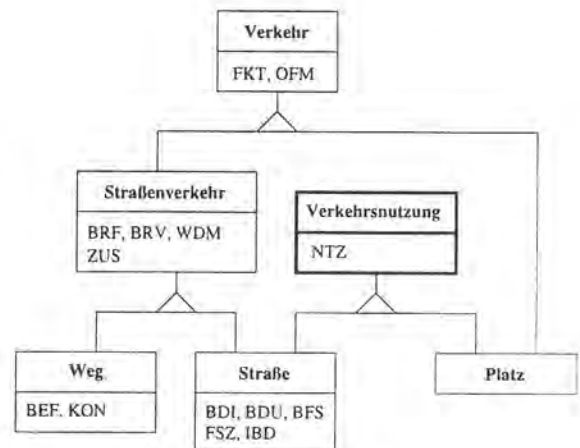


Abbildung 10: Redundanzfreie Klassenhierarchie für Verkehr durch Einführung von Zwischenklassen.

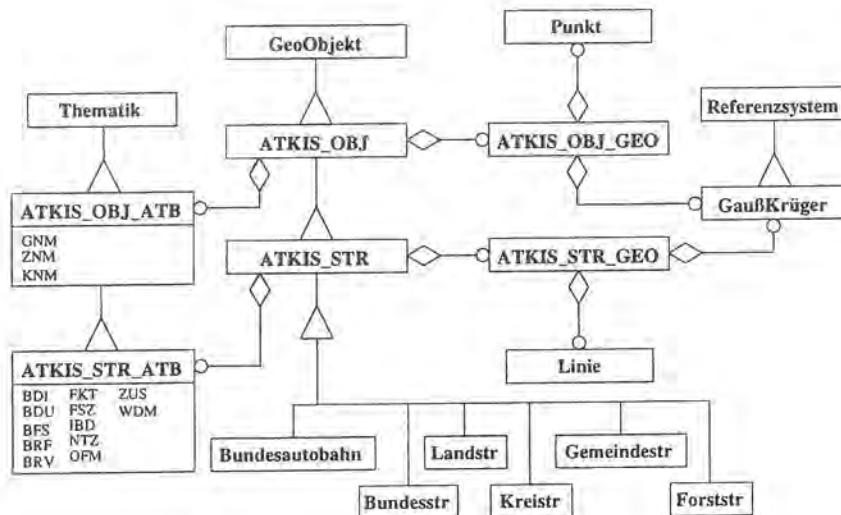


Abbildung 11: Beispiel für ATKIS-Objektart Straße.

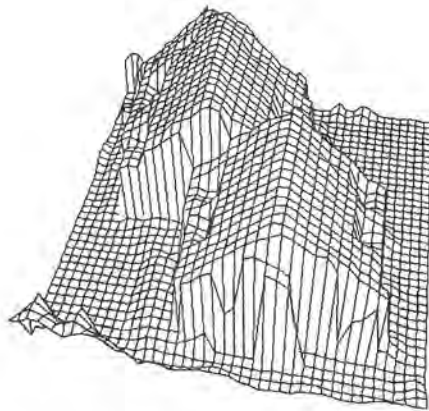


Abbildung 12: Ausschnitt aus einem DHM, erfaßt mit einem Laserscanner.

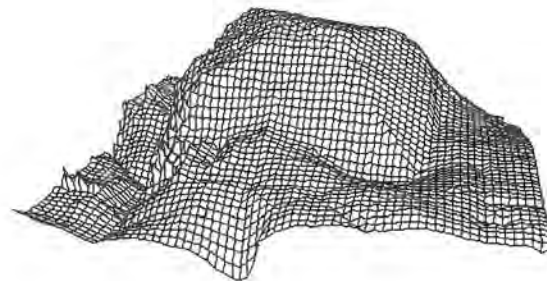


Abbildung 13: Ausschnitt aus einem DHM, erfaßt durch Stereobildzuordnung.

3 Ableitung von 3D-Gebäudehypothesen für die 3D-Gebäude-rekonstruktion, basierend auf digitalen Oberflächenmodellen

Die Nachfrage nach digitalen 3D-Stadtmodellen von Seiten der Stadtplaner nimmt kontinuierlich zu. Daraus ergab sich die Frage, ob sich vorhandene 2D-Gebäudedaten nutzen lassen, um den Prozeß der 3D-Gebäuderekonstruktion aus Luftbildern oder Laserdistanzdaten zu unterstützen (Haala & Anders 1996).

Bereits vorhandene Gebäudegrundrisse in einem zweidimensionalen Geo-Informationssystem sind eine zuverlässige Zusatzinformationsquelle für die Erfassung qualifizierter Gebäudehöhenmodelle aus direkt mit Laserscanner (Abb. 12) bzw. indirekt durch Stereobildzuordnung (Abb. 13) erfaßten Digitalen Höhenmodellen (DHM). Ein Beispiel für solche Daten ist das amtliche Liegenschaftskataster (ALK), in der sowohl Grundrißinformationen als auch die jeweilige Nutzungsart der Gebäude enthalten ist. Neben der Aktualisierung dieses Bestandes ist die Erweiterung der vorhandenen zweidimensionalen Daten durch Informationen über die dritte Dimension ein wichtiger Anwendungsbereich. Daten über die dritte Dimension werden besonders auf dem Gebiet genauer und dichter Höhenmodelle in Stadtgebieten benötigt. Durch die Analyse bzw. Interpretation der vorhandenen Grundrisse können beispielsweise Kontrollparameter



Abbildung 14: Bildausschnitt vom Testgebiet.

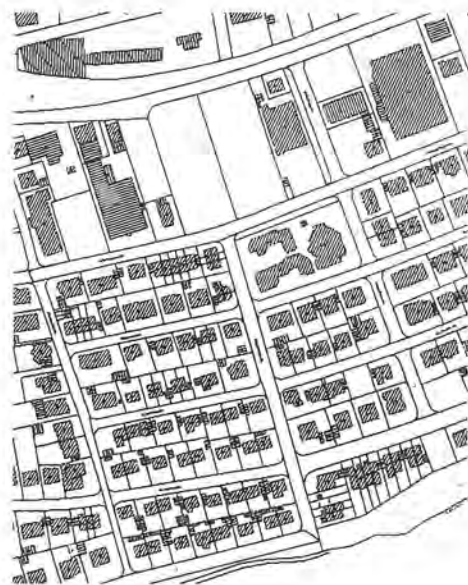


Abbildung 15: Ausschnitt aus der verwendeten ALK.

für die Segmentierung des DHM bzw. für die anschließende dreidimensionale Rekonstruktion bestimmt werden. Abbildung 14 zeigt eine Luftaufnahme des Testgebiets und Abbildung 15 den dazu gehörenden Ausschnitt aus der ALK.

3.1 Analyse der Gebäudeinformationen

Bei geringen Genauigkeitsanforderungen an die zu erfassende dreidimensionale Form eines Gebäudes kann eine Beschreibung durch einfache Blöcke erfolgen. In diesem Fall kann der Gebäudegrundriß aus dem existierenden GIS ohne weitere Analyse verwendet werden; die benötigte Gebäudehöhe kann dann als die maximale Höhe, innerhalb des Grundrisses, aus dem DHM bestimmt werden. Für Anwendungen wie Visualisierungen ist häufig ein mittlerer Detaillierungsgrad ausreichend, für den neben dem Grundriß noch der Dachtyp (z. B. Flach- oder Walmdach) sowie einige wenige Höhenwerte (z. B. First-, Trauf- und Fußbodenhöhe) zu bestimmen sind. Durch die Analyse der ALK-Daten können aus der Form und Lage der Gebäudegrundrisse und den ebenfalls vorhandenen Nutzungsarten Hypothesen (Abb. 17, Abb. 18) über die dreidimensionale Form gebildet werden. Die unterschiedlichen Hypothesen können anschließend mit Hilfe der DHM- und Bilddaten verworfen bzw. verifiziert werden.

Die Erzeugung von 3D-Gebäudemodellen mit Hilfe der Grundrißinformationen kann natürlich nicht eindeutig gelöst werden. Zusätzlich zu den unbekannten Gebäudehöhen sind die unterschiedlichsten Dachformen möglich, wie z. B. Flach-, Pult-, Sattel- oder Walmdach. Da die Gebäudenutzung einen möglichen Hinweis auf die Dachform und Dachhöhen bietet, nutzen wir die in der ALK enthaltenen Informationen über die Gebäudenutzung, um die Gebäude in die sechs Klassen *Wohn-, Industrie-, Bürogebäude, Kirche, Turm* und *Garage* einzuteilen. Jede dieser Klassen ordnen wir einen Dachtyp und Dachhöhen wie folgt zu :

- Garage : Flachdach, Dachhöhe 3m
- Wohn-, Bürogebäude : Satteldach, Traufhöhe 6m, Firsthöhe 9m (das entspricht 2 Geschossen mit 3m Höhe und ein Dachgeschoß von 3m Höhe)

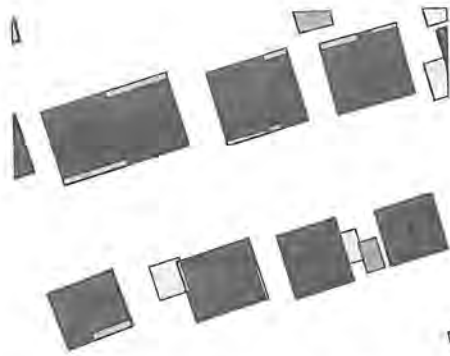


Abbildung 16: Generalisierung des Grundrisses durch minimal umschließendes Rechteck.

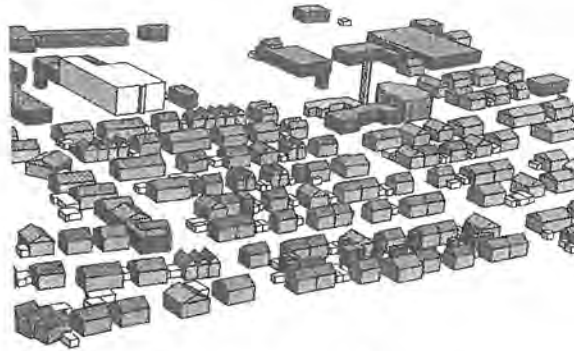


Abbildung 17: 3D-Gebäudehypothesen basierend auf den ALK-Gebäudegrundrissen.

- Industriegebäude : Flachdach, Dachhöhe 15m (3 Geschosse mit 5m Höhe)
- Kirche : Flachdach, Dachhöhe 12m
- Turm : Flachdach, Dachhöhe 25m
- Kindergarten : Flachdach, Dachhöhe 5m
- andere : Flachdach, Dachhöhe 7,5m

Diese Werte sind natürlich rein heuristisch, aber sie sollen auch nur eine erste Nährung für das Gebäude liefern. Durch den anschließenden Verifikationsprozeß wird die Hypothese dann bestätigt und verbessert, oder sie wird verworfen und eine neue Hypothese gebildet (z. B. andere Firstrichtung oder anderer Dachtyp).

Bevor wir jedoch das 3D-Modell erzeugen führen wir noch eine Generalisierung des Gebäudegrundrisses durch. Flach- und Pultdächer folgen in den meisten Fällen der Form des Grundrisses. Bei Walm- oder Satteldächern ist das jedoch nicht der Fall. Kleine Erker oder Unregelmäßigkeiten im Grundriß werden vom Dach verdeckt. Man kann in den meisten Fällen davon ausgehen, daß die Grundfläche eines solchen Daches rechteckförmig ist. Als Generalisierung des Grundrisses berechnen wir deshalb ein minimal umschließendes Rechteck wie es in Abbildung 16 dargestellt ist. Die Firstrichtung wird dann durch die längste Seite dieses Rechtecks festgelegt. Basierend auf all den aufgezählten Annahmen erzeugen wir dann ein hypothetisches 3D-Stadtmodell. In Abbildung 17 ist das Ergebnis dargestellt. Ein Vergleich dieses Ergebnisses mit Abbildung 14 zeigt jedoch noch erhebliche Unterschiede auf. Dies geht daraufhin zurück, daß wir bisher nur die Grundrisse allein betrachtet haben. Ein Grundriß in der ALK repräsentiert ein bestimmtes Besitzverhältnis, und angrenzende Grundrisse gehören im allgemeinen zu einem Gebäude und besitzen somit ein gemeinsames Dach. Deshalb bestimmen wir topologisch benachbarte Grundrisse (Grundrisse, die sich ein Geometrielement Linie teilen) und gruppieren diese Grundrisse, falls sie die gleiche Nutzungsart aufweisen, zu einem neuen Grundriss zusammen (Umhüllendes Polygon). Dieses neue Polygon wird dann gegebenenfalls generalisiert und dann ein 3D-Modell erzeugt. Das Ergebnis dieser verbesserten Hypothesenbildung zeigt Abbildung 18. Ein nochmaliger Vergleich mit Abbildung 14 zeigt, daß sich allein mit diesen einfachen Annahmen ein relativ gutes Stadtmodell erzeugen läßt.

Die Erzeugung von 3D-Gebäudehypothesen benötigt jedoch noch zusätzliche Metainformationen, die nicht in der ALK enthalten sind. Die Gebäudeparameter (Dachform, Dachhöhen, Firstrichtung) hängen auch von den Regeln der Stadtplaner ab. Solche zusätzlichen Bedingungen sind :

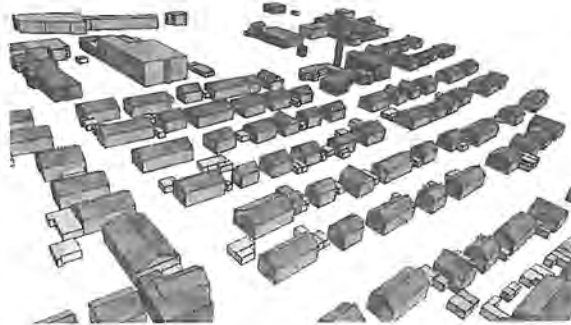


Abbildung 18: 3D-Gebäudehypothesen unter Berücksichtigung benachbarter Gebäude.



Abbildung 19: 3D-Gebäudehypothesen für einen Teilbereich von Stuttgart Vaihingen.

- Die Lage des Gebäudes zu einer Straße, da heutzutage die Firstrichtung meistens parallel zur Straßenrichtung verläuft.
- Die Nachbarschaft zu anderen, nicht angrenzenden, Gebäuden, da in den meisten Fällen benachbarte Gebäude (Häuserreihen) den gleichen Dachtyp, ähnliche Dachhöhe und gleiche Firstrichtung besitzen.
- Die Stadtlage des Gebäudes (Zentrum, Stadtrand, Industriegebiet) hat auch einen Einfluß auf die Dachform und Höhe eines Gebäudes.

Es fehlen jedoch zur Zeit noch Statistiken über die Häufigkeit von bestimmten Dachformen und ihre Abhängigkeit von Stadtlage und Gebäudenutzungsart. Ebenso fehlen noch Statistiken über die Abhängigkeit der Gebäudehöhe von der Stadtlage und Größe einer Stadt. Mit Hilfe solcher statistischen Maße könnte man ein stochastisches Stadtmodell aufstellen und die Hypothesenbildung erheblich verbessern. Anhand kleiner Gebiete sind wir dabei, solche Statistiken aufzustellen, aber in Anbetracht des Gesetzes von den großen Zahlen, ist es fraglich wie evident diese Werte sein werden. Die Einbeziehung räumlich benachbarter Straßen und Gebäude (Grundrisse, die nicht aneinander grenzen) für die Generierung der 3D-Gebäudehypothesen ist Ziel unserer nächsten Arbeiten.

3.2 Verifikation der Gebäudehypothesen

Zur Verifikation unserer 3D-Gebäudehypothesen führen wir ein Matching der Modellkanten und Modellflächen mit 3D-Kanten und 3D-Flächen aus dem DHM durch. Das DHM kann direkt durch einen Laserscanner oder indirekt durch eine Stereobildzuordnung erfaßt worden sein. Ein Beispiel für ein Laser-DHM ist in Abbildung 12 dargestellt. Abbildung 13 zeigt ein Beispiel für eine Stereozuordnung. Für die Extrahierung von Raumkanten und Ebenen aus Distanz- bzw. Höhendaten benutzen wir die Klassifikation der DHM-Punkte durch die Gauß'sche und mittlere Krümmung der Flächen. Für Anwendungen im Nahbereich werden diese Verfahren bereits seit einiger Zeit eingesetzt (Besl 1988). In diesem Bereich stehen schon länger Sensoren zur Verfügung, die eine genaue und dichte Erfassung der Oberflächengeometrie ermöglichen. Da DHM-Daten durch die mittlerweile verfügbaren flugzeuggetragenen Laserscanner mit ähnlicher Qualität bestimmt werden können, bietet sich eine Adaption der Verfahren für die Bearbeitung solcher Flächen an (Haala & Anders 1997).

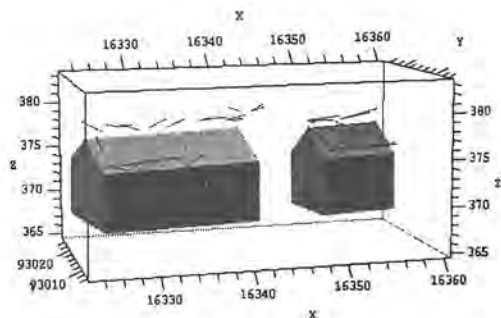


Abbildung 20: 3D-Ansicht der Gebäudehypothesen und zugeordneten DHM-Kanten.

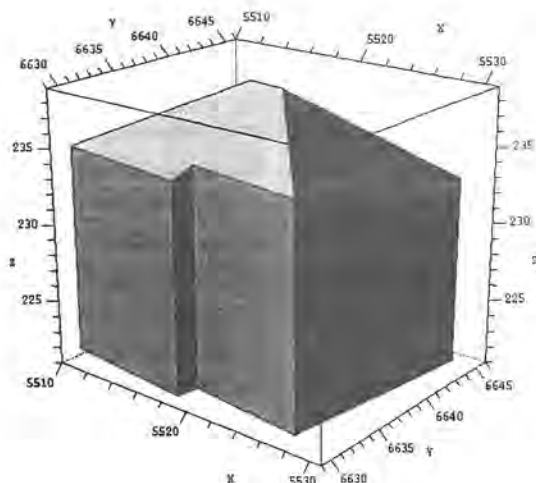


Abbildung 21: Zugeordnetes und verbessertes Gebäudemodell.

Durch die im DHM beobachteten Raumkanten und Ebenen führen wir nun eine Verifikation durch, d.h. wenn zu wenige Beobachtungen der 3D-Hypothese zugeordnet werden können verwerfen wir die Hypothese. Ansonsten verbessern wir die Hypothese durch Ausgleichung der Kanten und Ebenen. In Abbildung 21 ist ein so erzeugtes Gebäudemodell dargestellt. Die Projektion dieser Modellkanten in das Orthophoto, wie in Abbildung 22 dargestellt, zeigt die gute Übereinstimmung mit dem realen Gebäude auf.

4 Fortführung von ATKIS-Daten basierend auf ALK-Daten

In Deutschland wird ATKIS in drei unterschiedlichen Genauigkeitsgraden erfasst (1:25000, 1:200000, 1:1000000). Diese Daten umfassen topographische Objekte aus sieben Klassen (Siedlung, Verkehr, Vegetation, ...). Ebenso wird das amtliche Liegenschaftskataster (ALK) in den Maßstäben 1:1500 bis 1:2000 erfasst. Die ALK beinhaltet Flurstücksgrenzen, Gebäudegrundrisse, Nutzungsarten und Straßennamen. Da der Prozeß der Fortführung zeit- und kostenintensiv ist, entstand die Idee, ATKIS-Daten aus ALK-Daten abzuleiten. Somit müßte nur noch die detailliertere ALK manuell fortgeführt werden. Zur Zeit werden beide Datenbestände getrennt voneinander fortgeführt. Da es grundsätzlich möglich ist, ATKIS-Daten aus ALK-Daten abzuleiten, konnten wir anhand des ATKIS-Objektbereichs *Siedlung* aufzeigen. Durch die Informationen über Grundstücksgrenzen, Nutzungsarten und den implizit gegebenen geometrischen und topologischen Informationen enthält die ALK alle notwendigen Informationen, die man für die Ableitung von Siedlungsobjekten benötigt. In Abbildung 23 ist der von uns verwendete ALK-Datensatz abgebildet. Uns lag dieser Datensatz im Austauschformat *SQD-Format* des Geo-Informationssystems *SICAD/open* vor. Die Ableitung von ATKIS-Objekten des Typs *Wohnsiedlung* (ATKIS-Objektart 2111) aus ALK-Daten beinhaltet Generalisierungs- und Aggregationsoperationen, die im folgendem näher erläutert werden. Zur Beschreibung, wie räumliche Objekte in der ALK repräsentiert werden, benutzen wir die semantische Modellierung als eine konzeptionelle Methode um zu analysieren, wie ein Operateur diese Objekte erkennt. Abbildung 24 zeigt das von uns verwendete Semantische Netz für die Beschreibung von Flurstücken und Wohnsiedlungsbereichen.

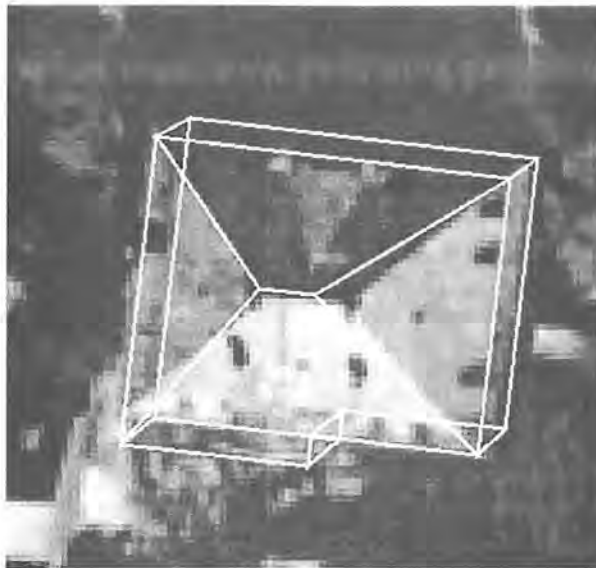


Abbildung 22: Projektion des erzeugten 3D-Modells in das zugehörige Orthophoto.



Abbildung 23: Ausschnitt aus einem ALK-Datensatz.

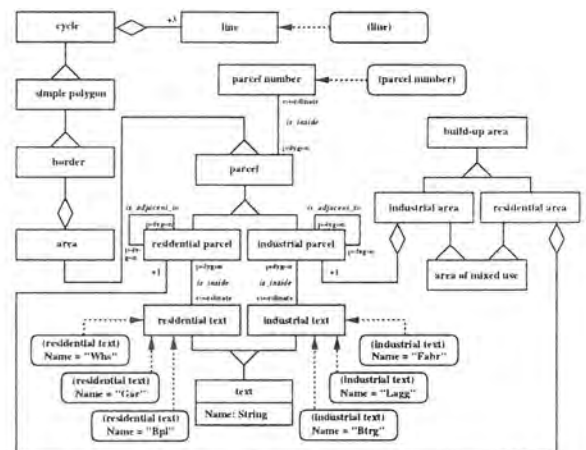


Abbildung 24: Semantisches Modell für Flurstücke und Wohnsiedlungen.

4.1 Aggregations- und Generalisierungsoperatoren

Zur Ableitung neuer räumlicher Objekte benötigt man im allgemeinen Operatoren zur Aggregation und Generalisierung von räumlichen Objekten (Regnauld 1996), (Molenaar 1996). Für die Aggregation räumlicher Objekte benötigt man eine geeignete Definition der *Objektnachbarschaft* und ein Aggregationskriterium, wie z. B. ein gleiches Objektattribut. Wir haben dazu in unserem objektorientierten Datenmodell Operatoren für die Aggregation bezüglich

- topologischer und
- räumlicher Nachbarschaft

implementiert. Bei der Berechnung der topologischen Nachbarschaft werden die Adjazenz-Relationen im Datenmodell genutzt. Die *räumliche Nachbarschaft* berechnen wir durch eine *Delaunay-Triangulation* (Preparata & Shamos 1985) aller Objektpunkte. Die Delaunay-Triangulation ermöglicht uns die Definition der räumlichen Nachbarschaft ohne Angabe eines Abstandsmaß, da diese Art der Triangulation Punkte nur mit ihren nächsten Nachbarn verbindet. Für die Generalisierung der geometrischen Form gegebenen oder aggregierten räumlichen Objekten haben wir Operatoren zur Erzeugung der *konvexen Hülle* (Preparata & Shamos 1985) und minimal umschließenden Rechteck implementiert. Im folgenden Abschnitt beschreiben wir unseren Ansatz zur Ableitung von Wohnsiedlungsobjekten aus ALK-Daten. Bei dieser Vorgehensweise wurde ausschließlich die topologische Nachbarschaft zur Aggregation räumlicher Objekte verwendet.

4.2 Ableitung der ATKIS-Objektart *Wohnsiedlung*

Das erste Problem war, daß in dem uns zur Verfügung gestellten ALK-Datensatz, die Flurstücke nicht als flächenhafte Objekte gespeichert waren. Nur die Flurstücksgrenzen waren als linienhafte Objekte gespeichert. Die Gebäudegrundrisse waren wiederum als Flächenobjekt gespeichert worden. Deshalb ist der erste Schritt in unserem Ansatz, anhand der Linienobjekte und deren topologischen Beziehungen untereinander, alle möglichen geschlossenen Flächen zu berechnen. Eine Fläche wird in unserem Fall durch ein einfaches Polygon repräsentiert. Das einfache Polygon wiederum stellt sich als geschlossene Masche in dem durch die Linienobjekte aufgespannten Netz dar.

Im nächsten Arbeitsschritt bestimmen wir, in welchen von diesen Flächen eine Flurstücknummer liegt. Dies wird durch einen Punkt-in-Polygon-Test für alle möglichen Kombinationen von Flächen und Flurstücksnummern erreicht. Durch eine raumbezogene Zugriffsstruktur kann der zeitliche Aufwand für solche geometrischen Operationen noch erheblich verringert werden. Das Ergebnis nach diesem Schritt ist in Abbildung 25 dargestellt. Nachdem alle Flurstücke ermittelt wurden, sind nun all diejenigen Flurstücke auszuwählen, die einem Wohnsiedlungsbereich zugeordnet werden können. Dazu wählen wir aus allen vorhandenen Textsymbolen im ALK-Datensatz die Symbole *Whs*, *Gar*, *Bpl* (Wohnhaus, Garage, Bauplatz) aus, und führen wieder einen Punkt-in-Polygon-Test für alle möglichen Kombinationen dieser Symbole und den Flurstücksflächen aus.

Im letzten Arbeitsschritt wird eine Gruppierung aller extrahierter Wohnsiedlungsflächen vorgenommen, um ATKIS-Objekte des Typs Wohnsiedlung zu erstellen. Die semantische Regel für die Gruppierung solcher Flächen ist das Prinzip der Adjazents (rechter Teil in Abb. 24). Mit anderen Worten, alle diese extrahierten Flächen, die eine gemeinsame Flurstücksgrenze besitzen, werden zusammengefaßt. Diese Berechnung kann einfach ausgeführt werden, indem die

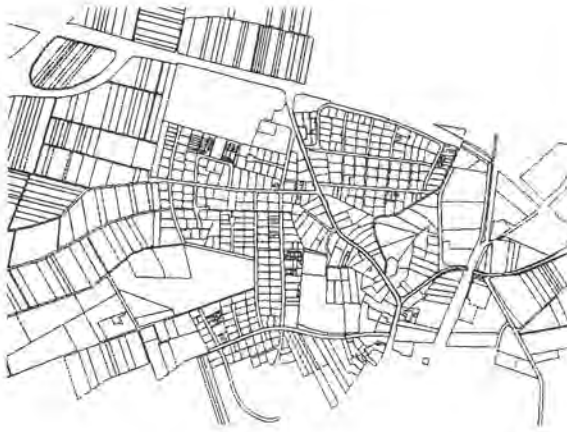


Abbildung 25: Ermittelte Flurstücke.



Abbildung 26: ALK-Daten mit erzeugten Wohnsiedlungen.

topologischen Relationen benutzt werden, die aus unserem objektorientierten Datenmodell direkt abgeleitet werden können. Abbildung 26 zeigt das Ergebnis dieser Gruppierung, überlagert mit den ALK-Daten. Dieses Ergebnis wurde allein durch Aggregation angrenzender Wohnsiedlungsflächen ermittelt. Der Vergleich dieser automatisch erzeugten ATKIS-Objekte mit original ATKIS-Objekten zeigt einige Unterschiede auf (Abb. 27). Ursachen für diese Unterschiede sind :

- Verschiedene Erfassungszeiträume der ALK- und ATKIS-Daten.
- Unterschiedliche Erfassungsregeln.
- Subjektive Interpretation des Operateurs bei der Erfassung der ATKIS-Daten aus Orthophotos.
- Die Grenzen der Wohnsiedlungsbereiche stimmen deshalb nicht exakt überein, da in dem ATKIS-Datensatz die Straßen nicht als Fläche erfaßt wurden, sondern durch ihre Mittelachsen repräsentiert werden. Da in ATKIS topologisch angrenzende Objekte durch die gleichen geometrischen Elemente dargestellt werden, treffen sich die Siedlungsgrenzen bei den Mittelachsen der Straßen. Unsere Grenzen entsprechen jedoch den genauen Grenzen zu den ALK-Straßenflächen. Man kann dieses Problem umgehen, indem man entweder gleichzeitig ATKIS-Straßenobjekte als Flächenobjekte aus den ALK-Daten ableitet oder einen Generalisierungsschritt einführt, der die Mittelachsen bestimmt und dann die Grenzen der Siedlungsflächen modifiziert. Man kann jedoch sagen, daß eine getrennte Ableitung von Siedlungsobjekten und Straßenobjekten nicht sinnvoll erscheint, sondern beide gemeinsam ermittelt werden müssen.
- Ein weiterer Unterschied entsteht dadurch, daß in diesem ersten Ansatz Flächen mit gemischter Nutzung (Industrie- und Wohngebäude in einem Flurstück) nicht modelliert wurden und somit ebenfalls in unserem Ergebnis enthalten sind. Wir erweiterten deshalb unser Modell um die ATKIS-Klassen *Wohnsiedlung*, *Industriegebiet* und *Fläche mit gemischter Nutzung*. Abbildung 28 zeigt das verbesserte Ergebnis.

Zusammenfassend kann man sagen, daß unsere Ergebnisse, die Verwendung großmaßstäbiger Daten (z. B. ALK) zur automatischen Fortführung von Daten mittlerem Maßstabs (z. B. ATKIS), bestätigen. Unser pragmatischer Ansatz zeigt, daß die Verknüpfung unterschiedlicher räumlicher Datenbestände effizient mit Hilfe eines semantischen Modells und räumlicher Aggregierungs-

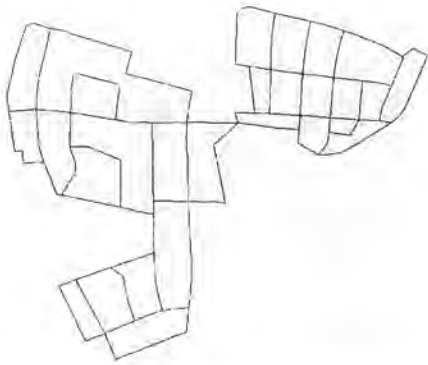


Abbildung 27: Überlagerung von original ATKIS Wohnsiedlungsbereichen (schwarz) und automatisch abgeleiteten Flächen (grau).

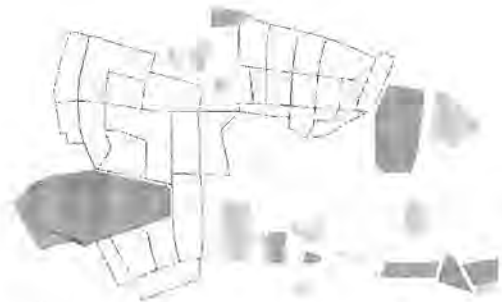


Abbildung 28: Automatisch abgeleitete Wohnsiedlungsbereiche (hellgrau), Industriegebiete (dunkelgrau) und gemischter Nutzung (grau).

und Approximationsoperatoren durchführbar ist. Ein geeignetes semantisches Modell ist jedoch nicht immer vorhanden (keine Erfassungsregeln vorhanden) oder kann nur schwer erstellt werden (Verknüpfung der Erfassungsregeln und dem verwendeten Datenbestand ist nicht direkt ersichtlich). Für solche Fälle ist es zwingend erforderlich, unser Vorgehen durch Methoden des *Maschinellen Lernens* (Michalski, Carbonell & Mitchell 1984) zu erweitern. Durch die Methode *Lernen durch Beispiele* könnten dann automatisch semantische Konzepte oder Regeln abgeleitet werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, von einer sehr allgemeinen Regel auszugehen, und beim Auftreten von Ausnahmen von dieser Regel, durch die Methode des *Inkrementelles Lernen*, das Verhalten des Systems zu verbessern. Zusätzlich ist es noch erforderlich, eine automatische Beurteilung der Ergebnisse zu ermöglichen; insbesondere bei der Verwendung maschineller Lernverfahren, da hier nur von *unscharfem Wissen* ausgegangen werden muß. Die Integration von maschinellen Lernverfahren und einer geeigneten Beurteilungsmethode sind die Ziele unseres Folgeantrags. Veröffentlichungen zu diesem Thema findet man in (Anders & Fritsch 1996) und (Anders & Sester 1997).

Literatur

- Anand, S., Bell, D. & Hughes, J. (1993), 'A general framework for database mining based on evidential theory', Internal Report, Dept. of Inf.Sys., University of Ulster at Jordanstown.
- Anders, K.-H. & Fritsch, D. (1996), Automatic Interpretation of Digital Maps for Data Revision, in: 'International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing', Vol. 31(4), ISPRS, Vienna, Austria, Seiten 90-94.
- Anders, K.-H. & Sester, M. (1997), Methods of Data Base Interpretation - Applied to Model Generalization from Large to Medium Scale, in: W. Förstner & L. Plümer, Hrsg., 'Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps / SMATI 97', Birkhäuser, Bonn, Germany, Seiten 89-103.
- ATKIS (1988), *ATKIS-Gesamtdokumentation: Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem – Das Vorhaben der Landesvermessungsverwaltungen zum Aufbau Digitaler Landschaftsmodelle und Digitaler Kartographischer Modelle*, Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen.

- Bell, D., Anand, S. & Shapcott, C. (1994), 'Database Mining in Spatial Databases', International Workshop on Spatio-Temporal Databases.
- Besl, J. (1988), *Surfaces in Range Image Understanding*, Springer series in perception engineering, Springer-Verlag, New York Berlin Heidelberg.
- Ester, M., Kriegel, H.-P. & Xu, X. (1995), Knowledge Discovery in Large Spatial Databases: Focusing Techniques for Efficient Class Identification, *in*: 'Advances in Spatial Databases (Proc. 4th Symp. SSD-95)', Portland, ME, Seiten 67–82.
- Ester, M., Kriegel, H.-P., Sander, J. & Xu, X. (1996), A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise, *in*: 'Proceedings of 2nd. International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)'.
- Fotheringham, S. & Rogerson, P. (1994), *Spatial Analysis and GIS*, Taylor and Francis.
- Fritsch, D. & Anders, K.-H. (1996), 'Objektorientierte Konzepte in Geo-Informationssystemen', *GIS GEO-Informationssysteme* 9(2), 2–14.
- Guan, J. & Bell, D. (1991), *Evidence Theory and its Applications*, Vol. 1, North-Holland.
- Haala, N. & Anders, K.-H. (1996), Fusion of 2D-GIS and Image Data for 3D Building Reconstruction, *in*: 'International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing', Vol. 31(3), ISPRS, Vienna, Austria, Seiten 285–290.
- Haala, N. & Anders, K.-H. (1997), Acquisition of 3D urban models by analysis of aerial images, digital surface models and existing 2D building information, *in*: 'SPIE Conference on Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision III', SPIE, Orlando, Florida, Seiten 212–222.
- Han, J., Nishio, S. & Kawano, H. (1994), Knowledge Discovery in Object-Oriented and Active Databases, *in*: F. Fuchi & T. Yokoi, Hrsg., 'Knowledge Building and Knowledge Sharing', Ohmsha/IOS Press, Seiten 221–230.
- Koperski, K., Adhikary, J. & Han, J. (1996), Knowledge Discovery in Spatial Databases: Progress and Challenges, *in*: 'Proceedings of Workshop on Research Issues on Data Mining and Knowledge Discovery', Montreal, QB.
- Koperski, K. & Han, J. (1995), Discovery of Spatial Association Rules in Geographic Information Databases, *in*: 'Advances in Spatial Databases (Proc. 4th Symp. SSD'95)', Portland, ME, Seiten 47–66.
- Lu, W., Han, J. & Ooi, B. (1993), Discovery of General Knowledge in Large Spatial Databases, *in*: 'Proc. of 1993 Far East Workshop on Geographic Information Systems (FEGIS'93)', Singapore, Seiten 275–289.
- Michalski, R., Carbonell, J. & Mitchell, T. (1984), *Machine Learning - An Artificial Intelligence Approach*, Springer-Verlag, Berlin.
- Mohan, L. & Kashyap, R. (1988), An Object-Oriented Knowledge Representation for Spatial Information, *in*: 'IEEE Transaction on Software Engineering', number 5 *in*: 'IEEE Transaction on Software Engineering', Seiten 675–681.
- Molenaar, M. (1996), The role of topologic and hierarchical spatial object models in database generalization, *in*: M. Molenaar, Hrsg., 'Methods for the Generalization of Geo-Databases', number 43, Netherlands Geodetic Commission, Delft, The Netherlands, Seiten 13–35.

- Ng, R. & Han, J. (1994), Efficient and Effective Clustering Method for Spatial Data Mining, in: 'Proc. of 1994 Int. Conf. on Very Large Data Bases (VLDB'94)', Santiago, Chile, Seiten 144-155.
- Preparata, F. & Shamos, M. (1985), *Computational Geometry: An Introduction*, Springer-Verlag, New York.
- Regnauld, N. (1996), Recognition of building clusters for generalization, in: M. M. Kraak, Hrsg., 'Proceedings of 7th Int. Symp. on Spatial Data Handling (SDH)', Vol. 2, Faculty of Geod. Engineering, Delft, The Netherlands.
- Rumbaugh, J., Blaha, M., Premerlani, W., Eddy, F. & Lorensen, W. (1991), *Object-Oriented Modeling and Design*, Prentice Hall, Inc.
- Shaw, G. & Wheeler, D. (1994), *Statistical Techniques in Geographical Analysis*, David Fulton, London.
- Spatial Archive and Interchange Format: Formal Definition Release 3.2* (1995), Surveys and Resource Mapping Branch Ministry of Environment, Lands and Parks, Province of British Columbia, Canada.

Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien unter ARC/INFO

Frank Anshelm und Thomas Gauger

Am Institut für Navigation der Universität Stuttgart wird im Auftrag des Umweltbundesamtes das Forschungsvorhaben „Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien in Deutschland“ bearbeitet. Ein Ziel des Projekts ist die Erstellung von Karten, die die Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien in Deutschland in ihrer räumlich differenzierten Ausprägung darstellen. Bei der Erstellung der Karten, sowie bei der Durchführung der den Karten zugrunde liegenden Berechnungen spielt die Anwendung Geographischer Informationssysteme eine gewichtige Rolle.

Rahmen und Inhalte des Forschungsvorhabens

Das Forschungsvorhaben „Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien in Deutschland“ ist eingebunden in Forschungsaktivitäten des „International Co-operative Programme on Effects on Materials, including Historic and Cultural Monuments (ICP Materials)“. Im Rahmen dieses unter dem Dach der UN-ECE (Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen) koordinierten Programms werden wissenschaftliche Grundlagen der Schadstoff-Rezeptor-Wirkungsbeziehungen zwischen Klima- und Luftschadstoffparametern einerseits und der Korrosion, respektive Verwitterung von an Kunst- und Bauwerken verwendeten Materialien andererseits erarbeitet (Nagel und Gregor 1998). Die deutschen Aktivitäten auf dem Gebiet der Kartierung von Critical Loads & Levels werden vom Umweltbundesamt in Berlin zusammengeführt.

Die Kartierungsarbeiten orientieren sich an einem von der Sonderarbeitsgruppe „Kartierung“ erarbeiteten Methodenhandbuch (Umweltbundesamt 1996), in welchem die Leitlinien der Kartierung von Critical Levels & Loads verbindlich festgelegt sind. Anhand der darin entwickelten Vorgaben wurde das in Abbildung 1 dargestellte Verfahrensschema erarbeitet. Das Verfahrensschema beschreibt den Arbeitsablauf bis zum derzeitigen Stand der Bearbeitung des Forschungsvorhabens.

Grundlage der Kartierungsarbeiten sind die Ergebnisse eines achtjährigen Expositionsversuchs, bei dem an 39 Standorten in Europa und Nordamerika Proben verschiedener an Kunst- und Bauwerken verwendeter Materialien den an den jeweiligen Standorten herrschenden Klima- und Luftschadstoffbedingungen ausgesetzt wurden. Aus den Ergebnissen des Expositionsversuchs konnten **Dosis-Wirkungsfunktionen** abgeleitet werden, die die Zusammenhänge zwischen der Immission beziehungsweise Deposition von Luftschadstoffen, klimatischen Faktoren und den an den Materialien aufgetretenen Korrosionsschäden quantitativ beschreiben (UN ECE 1998). Darüber hinaus wurde aus den Ergebnissen des achtjährigen Expositionsversuchs auf die natürlichen **Hintergrundkorrosionsraten** der verschiedenen Materialien geschlossen. Die Hintergrundkorrosionsraten geben die Größenordnung der Korrosionsschäden wieder, die unter quasi natürlichen Bedingungen, das heißt unter Ausschluß anthropogener Einflüsse auftreten würden. Mit der Berücksichtigung der Hintergrundkorrosionsraten wird der Tatsache Rechnung getragen, daß Korrosionsschäden selbst in Reinluftgebieten auftreten, die Korrosion mithin auch ein natürlicher, in der korrosiven Wirkung der Atmosphäre begründeter Vorgang ist. Innerhalb des UN ECE ICP on Materials wurde beschlossen, das unterste 10. Perzentil aller im Zuge des Materialexpositionsprogramms beobachteten Korrosionsraten als Hintergrundkorrosionsrate (K_{10}) festzulegen.

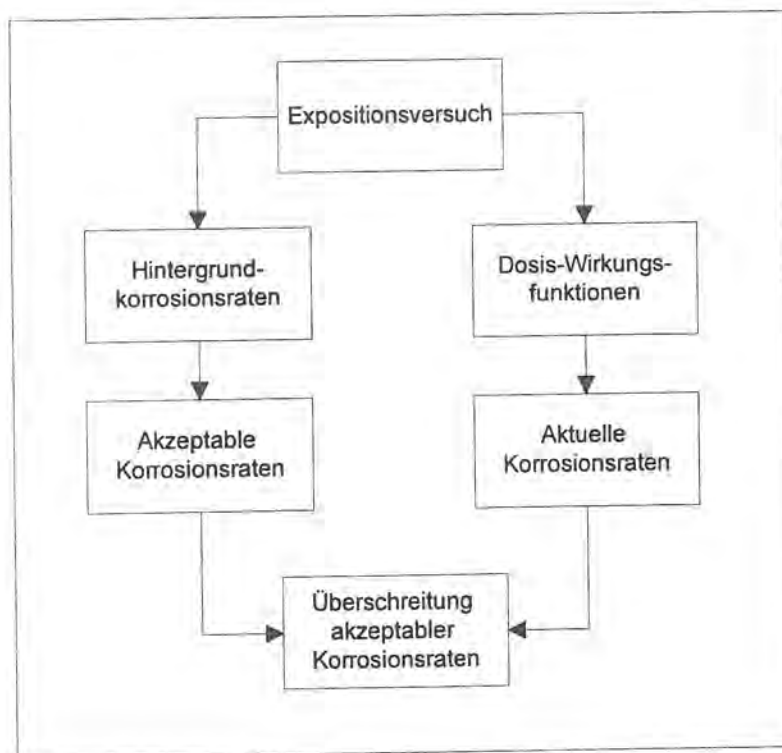


Abb. 1: Verfahrensablauf bis zum derzeitigen Stand der Bearbeitung des Forschungsvorhabens.

Durch Anwendung der Dosis-Wirkungsfunktionen können für die verschiedenen Materialien **aktuelle Korrosionsraten** (K_{act}) berechnet werden. Sie kennzeichnen die an den jeweiligen Materialien unter aktuellen Klima- und Luftschadstoffbedingungen zu beobachtende Korrosion. Unter Einbeziehung der Hintergrundkorrosionsraten wurden für die verschiedenen Materialien **akzeptable Korrosionsraten** (K_{acc}) ermittelt. Sie sind als Vielfache der Hintergrundkorrosionsraten (K_{10}) definiert und lassen sich gemäß $K_{acc} = K_{10} \cdot n$ berechnen. Der Gewichtungsfaktor „n“ soll gemäß Umweltbundesamt (1996) Werte zwischen 1,2 und 2 annehmen können. Akzeptable Korrosionsraten dienen der Kennzeichnung der Grenze zwischen der gerade noch akzeptablen und der nicht mehr zu tolerierenden Schädigung eines Materials durch Luftverunreinigungen. Die Lage der Akzeptanzgrenze wird in starkem Maße von den volkswirtschaftlichen Kosten bestimmt, die durch die Korrosionsschäden entstehen. Die Aufgabe einer ersten Abschätzung der durch Korrosionsvorgänge entstehenden **volkswirtschaftlichen Schäden** wurde als Unterauftrag an das Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart vergeben.

Durch Vergleich der aktuellen Korrosionsraten mit den akzeptablen Korrosionsraten können innerhalb Deutschlands diejenigen Gebiete, in denen die akzeptablen Korrosionsraten überschritten werden von den Räumen unterschieden werden, in denen die aktuellen Korrosionsraten unter den akzeptablen Korrosionsraten liegen. Zukünftig sollen auf europäischer Ebene **Toleranzgrenzwerte für die Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien** erarbeitet werden, das heißt es sollen Werte der Luftschadstoff-Immission, beziehungsweise – Deposition bestimmt werden, die nicht überschritten werden dürfen, da ansonsten Materialschäden und damit Kosten in einem nicht mehr zu tolerierenden Ausmaß entstehen würden. Die zu erarbeitenden Toleranzgrenzwerte sollen sich an dem in den achtziger Jahren im Rahmen der europäischen Luftreinhaltepolitik entwickelten **Critical Levels- und Loads-Konzept** rezeptororientierter ökologischer Belastungsgrenzen orientieren (siehe hierzu den

rezeptororientierter ökologischer Belastungsgrenzen orientieren (siehe hierzu den Beitrag "Gauger Th und Anshelm F: Kartierung kritischer Luftbelastungen unter ARC/INFO" in diesem Heft).

Kartenbeispiele

Die Abbildungen 2 bis 4 zeigen einige der im Zuge des oben beschriebenen Projekts erstellten Karten. Sämtliche Berechnungen wurden mit **ARC/INFO 7.2.1 unter Digital Unix 4.0b** durchgeführt. Die Layouts der Karten wurden mit **ArcView 3.0a** erstellt.

In Abbildung 2 ist die SO₂-Immission in Deutschland für die Jahre 1993, 1994 und 1995, sowie die Lage der SO₂-Meßstationen, für die im jeweiligen Jahr Meßwerte zur Verfügung standen, dargestellt. Die Koordinaten der SO₂-Meßstationen, sowie die an den Stationen gemessenen SO₂-Immissionswerte wurden in ARC/INFO eingelesen, um daraus zunächst die in der unteren Kartenreihe dargestellten Point-Coverages zu generieren. Um ausgehend von den Punktdaten der Point-Coverages zu den in der oberen Reihe dargestellten Rasterkarten (Grids) der SO₂-Immission zu gelangen, mußte für jeden Jahrgang eine räumliche Interpolation durchgeführt werden. Hierzu wurde unter ARC/INFO das Kriging-Verfahren angewendet. Die an den SO₂-Meßstationen gemessenen Werte der SO₂-Immission dienten als Stichprobe, mit Hilfe derer die SO₂-Immission an denjenigen Punkten innerhalb Deutschlands geschätzt wurden, für die keine gemessenen Werte vorlagen. Die Karten haben eine Auflösung von 1 · 1 km, das heißt für jede Rasterzelle von 1 km² Größe wurde ein Wert der SO₂-Immission berechnet. Schließlich wurden die interpolierten Karten der SO₂-Immission der Einzeljahre 1993, 1994 und 1995 (Abb. 2, obere Reihe) zu einer Karte der mittleren SO₂-Immission für die Periode 1993-1995 (Abb. 3) verschnitten.

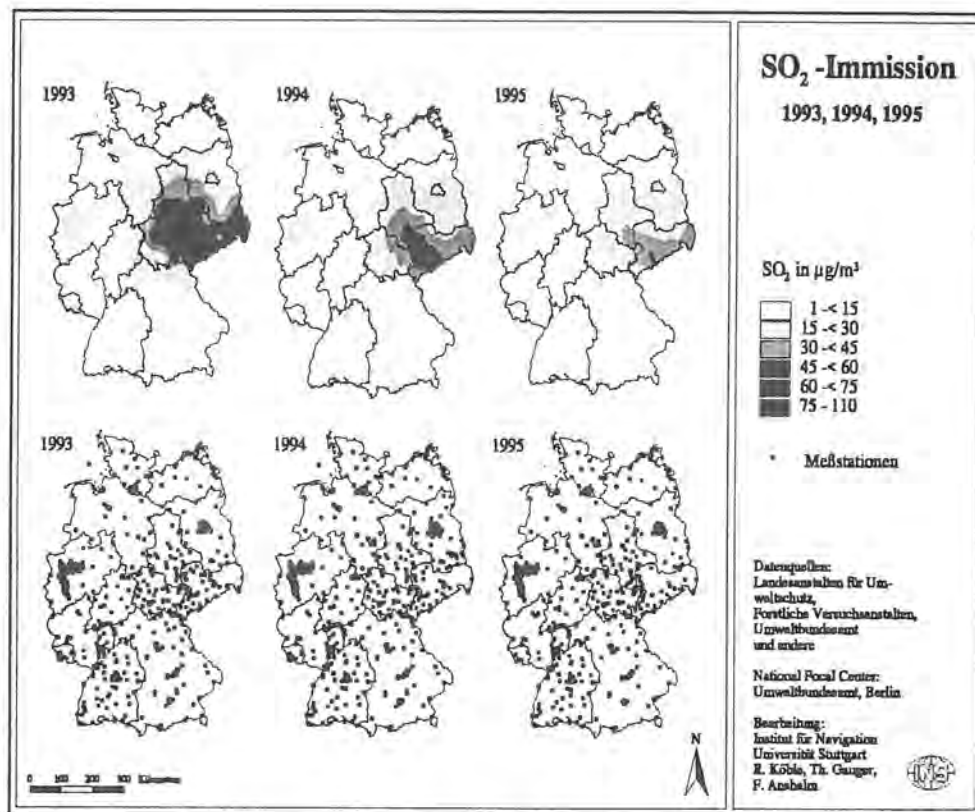


Abb.2: SO₂-Immission in Deutschland 1993, 1994, 1995 und Lage der SO₂-Meßstationen.

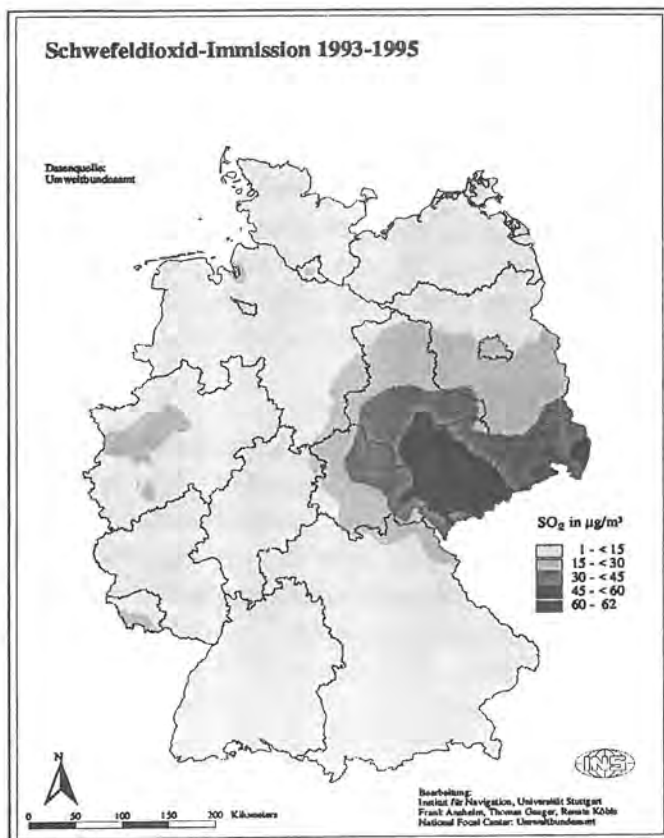


Abb.3: SO_2 -Immission in Deutschland 1993-1995

Analog zur Erstellung der Karte der mittleren SO_2 -Immission der Periode 1993-1995 wurden für denselben Zeitraum Rasterkarten der mittleren Ozon-Immission, der mittleren Chlorid-Konzentration im Niederschlag und der mittleren Protonen-Konzentration im Niederschlag berechnet. Die Grids zu den Jahresmitteln der Klimaparameter Temperatur, Niederschlag und Relative Luftfeuchte konnten beim Deutschen Wetterdienst akquiriert werden.

Die Rasterkarten der verschiedenen Klima- und Luftschadstoffparameter wurden entsprechend der aus den Ergebnissen des achtjährigen Expositionsversuchs ermittelten Dosis-Wirkungsfunktionen miteinander verrechnet. Nähere Informationen zu den Dosis-Wirkungsfunktionen sind Anshelm et al. (1998) und UNECE (1998) zu entnehmen.

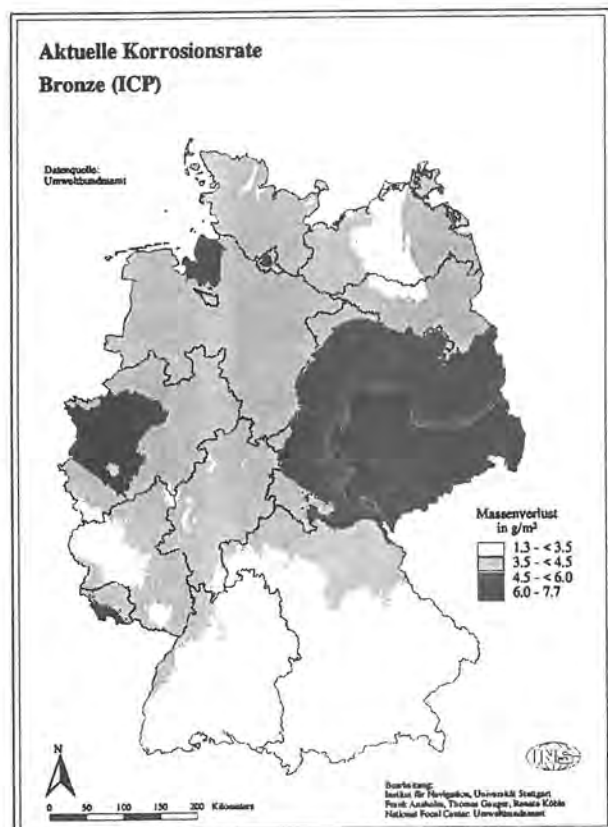


Abb. 4: Aktuelle Korrosionsrate-Bronze

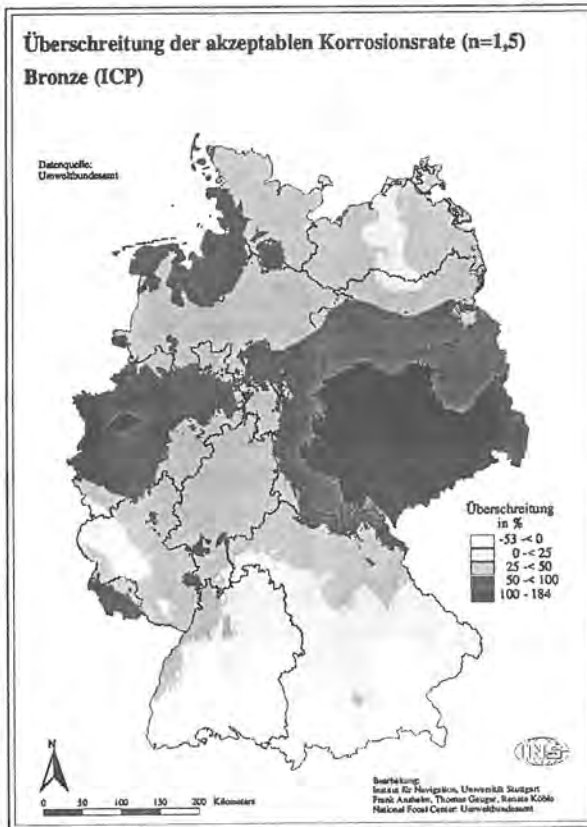


Abb. 5: Überschreitung der akzeptablen Korrosionsrate-Bronze.

Die in Abbildung 4 dargestellten Kartierungsergebnisse basieren auf der Anwendung einer aus Resultaten des achtjährigen Expositionsversuchs abgeleiteten Dosis-Wirkungsfunktionen für das Material Bronze. Die aktuelle jährliche Korrosionsrate wird als Massenverlust in g/m^2 angegeben. Höchste aktuelle Korrosionsraten sind in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt, relativ geringe aktuelle Korrosionsraten in Bayern und Baden-Württemberg zu verzeichnen. Die Verteilung der Gebiete mit hohen, beziehungsweise niedrigen aktuellen Korrosionsraten orientiert sich stark an den räumlichen Mustern der SO_2 -Immission. Damit wird der aus den Ergebnissen des achtjährigen Expositionsversuchs abgeleiteten großen Bedeutung des Luftschadstoffs SO_2 für das Korrosionsverhalten von Bronze Rechnung getragen. Die Forschungsarbeiten zu den Dosis-Wirkungsfunktionen sind noch nicht abgeschlossen. Die hier vorgestellten Resultate (Abb. 4 und 5) sind daher als vorläufige Zwischenergebnisse zu werten.

Abbildung 5 zeigt die prozentuale Überschreitung einer akzeptablen Korrosionsrate für das Material Bronze. Als akzeptable Korrosionsrate wurde in diesem Testlauf der 1,5-fache Wert der natürlichen Hintergrundkorrosionsrate definiert. Während in Baden-Württemberg und Bayern die aktuelle jährliche Korrosionsrate um bis zu 53 % unter der als akzeptabel definierten Marke bleibt, wird im Süden der neuen Bundesländer und im Ruhrgebiet die akzeptable Korrosionsrate um mehr als 100 % überschritten. Die Ermittlung der Flächenanteile mit Über-, beziehungsweise Unterschreitung der akzeptablen Korrosionsrate für Bronze ergab, daß die akzeptable Korrosionsrate (1,5-fache Hintergrundkorrosionsrate) während der Periode 1993-1995 auf 92 % der Fläche der BRD überschritten wurde. Definiert man hingegen den 2-fachen Wert der natürlichen Hintergrundkorrosionsrate als akzeptable Korrosionsrate, so verringert sich der Flächenanteil mit Überschreitungen der akzeptablen Korrosionsrate auf 68,3 % der Gesamtfläche der BRD. Auf diese Weise können unter ARC/INFO verschiedene Szenarien durchgespielt werden. Analog dazu ließe sich beispielsweise auch ermitteln, wie sich eine flächendeckende Reduzierung der SO_2 -Immission um x % auf die Überschreitung bestimmter Toleranzgrenzwerte in verschiedenen Regionen Deutschlands auswirken würde. Für Immissionsminderungsszenarien dieser Art sollten jedoch die Ergebnisse weiterer Forschungen auf dem Gebiet der Dosis-Wirkungsfunktionen abgewartet werden.

Literatur:

- Anshelm F, Droste-Franke B, Gauger Th, Köble R und Mayerhofer P (1998): Endbericht zum Forschungsvorhaben FKZ 108 07 034 „Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien in Deutschland“. Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin.
- Nagel H-D und Gregor H-D (Eds., 1998): Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels.- Berlin/Heidelberg. Springer. 320 S.
- Umweltbundesamt (1996): Manual on methodologies for Mapping Critical Loads/Levels and geographical areas where they are exceeded. Umweltbundesamt, Texte 71/96. Berlin. 144 S.
- UN ECE (1998): International co-operative programme on effects on materials, including historic and cultural monuments. Report No. 30: Statistical Analysis of 8 year materials exposure and acceptable deterioration and pollution levels.- Swedish Corrosion Institute, Stockholm.

Kartierung kritischer Luftbelastungen unter ARC/INFO

Thomas Gauger und Frank Anshelm

Detaillierte Forschungen im Hinblick auf die Auswirkungen anthropogener Schadstoffbelastungen in der Atmosphäre haben in den letzten Jahren zur Entwicklung des Critical Levels & Loads Konzeptes geführt. Dieses Konzept basiert auf Belastungs-Wirkungs-Beziehungen, ökologische Grenzen der Belastbarkeit werden formuliert. Seine Anwendung auf nationaler und internationaler Ebene beinhaltet umfangreiche Kartierungsprogramme, mit deren Hilfe die Belastungen durch und Wirkungen von Luftverunreinigungen räumlich beschrieben werden. Das GIS ARC/INFO wird als wesentliches Werkzeug bei der Kartierung der Critical Levels & Loads zur Datenhaltung, -verarbeitung und Präsentation der Ergebnisse genutzt.

Rahmen und Inhalte des Forschungsvorhabens

Am Institut für Navigation wird im Auftrag des Umweltbundesamtes das Forschungsvorhaben „Kritische Luftschadstoff-Konzentrationen und Eintragsraten sowie ihre Überschreitung für Wald und Agrarökosysteme sowie naturnahe waldfreie Ökosysteme“ (UFOPLAN Nr. 108 03 079) bearbeitet. Projekthinhalte sind die bundesweite Datenerfassung, -aufbereitung und kartographische Darstellung der Immissionsbelastung und die Berechnung der Überschreitung der kritischen Luftschadstoff-Konzentrationen - **Critical Levels** - sowie die Erfassung der Depositionsfrachten atmosphärischer Schadstoffe in verschiedene Ökosysteme. Letztere dienen als Input zur Berechnung der Überschreitung der kritischen Eintragsraten - **Critical Loads** - in Deutschland. Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens werden in enger Kooperation mit der Gesellschaft für Ökosystemanalyse und Umweltdatenmanagement mbH (ÖKO-DATA) in Strausberg und dem National Institute of Public Health and the Environment (RIVM) in Bilthoven, Holland, erarbeitet und fließen als nationaler Beitrag in die gesamteuropäische Kartierung von Critical Levels & Loads ein (Details hierzu in Nagel und Gregor (1998a)).

Das Konzept der Critical Levels und Critical Loads wurde für das europäische Luftreinhalteabkommen der UN-Wirtschaftskommission (UN-ECE) entwickelt. Sowohl das nationale als auch das gesamteuropäische Kartierungsprogramm gemäß dem Critical Levels und Critical Loads Konzept dient als ökologisch begründetes Instrument der Steuerung und Erfolgskontrolle von Emissionsminderungsmaßnahmen (Gregor 1998, Smiatek et al. 1995). Die Erarbeitung der Kartierungsverfahren und die Festlegung der Belastungsgrenzen wird innerhalb des Rahmens des Genfer Luftreinhalteübereinkommens (UN-ECE Convention on Long Range Transboundary Air Pollution, Genf 1979) von der Arbeitsgruppe „Wirkungen“ (Working Group on Effects) wahrgenommen und der UN-ECE Sonderarbeitsgruppe „Kartierung“ (Task Force on Mapping), der die Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Umweltbundesamt, vorsitzt (Nagel und Gregor 1998a). Das international abgestimmte Kartierungsverfahren ist in der zur Zeit gültigen Fassung als Methodenleitfaden veröffentlicht (Umweltbundesamt 1996). Eine Fortschreibung der eingesetzten Methodik entsprechend neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse, iterativer Neubewertung des Wissens sowie durch Fortschritte innerhalb des praktisch erprobten Kartierungsverfahrens selbst, ist wesentlicher Bestandteil der Vorgehensweise innerhalb des Critical Levels und Critical Loads Ansatzes (Gregor 1998).

Von vielen in die Atmosphäre abgegebenen (emittierten) Substanzen gehen schädigende Wirkungen aus, wenn sie über einen längeren Zeitraum einwirken, oder wenn Luftschadstoffe eine bestimmte Konzentration überschreiten, und das Rezeptorsystem (Organismus, Ökosystem, etc.) die Einwirkung nicht mehr ausgleichen kann. Diese Wirkungsschwelle kann prin-

ziell für jeden Schadstoff und jeden Rezeptor bestimmt werden, wenn Wirkungsmechanismen des Schadstoffes und Kompensationsvermögen des Rezeptors hinreichend bekannt sind. **Critical Levels** sind die quantitative Abschätzung der Konzentration von Schadstoffen in der Atmosphäre (Immission), oberhalb derer direkte Schadeffekte an Rezeptoren (Menschen, Pflanzen, Tiere, Ökosysteme, Materialien) nach derzeitigem Wissen zu erwarten sind. **Critical Loads** sind die quantitative Abschätzung der Deposition eines oder mehrerer Schadstoffe, unterhalb derer nach bisherigem Wissen keine schädigenden Wirkungen an spezifizierten Rezeptoren nachweisbar sind (Nagel und Gregor 1998b, Umweltbundesamt 1996). Diese ökologischen Wirkungsschwellen von Luftschadstoffen (Critical Loads und Critical Levels) liegen u.a. für Waldökosysteme vor (Umweltbundesamt 1996). Entstehung (Emission), Verfrachtung, Umwandlung in der Atmosphäre und Verbleib der Luftschadstoffe als Schadstoffgehalt in der Atmosphäre (Immission) sowie Entfernen der Stofffracht aus der Atmosphäre (Gesamtd deposition) durch Auswaschen mit dem Regenniederschlag (nasse Deposition), oder durch trockene Ablagerung von Partikeln und Gasen auf Pflanzen und anderen Oberflächen (trockene Deposition) sind direkt meßbare Größen. In umfangreichen Meßnetzen in Deutschland werden sie routinemäßig ermittelt oder indirekt, mit Hilfe von Schadstoffausbreitungsmodellen, berechnet. Innerhalb des genannten Forschungsprojektes werden auf der Datengrundlage von Meß- und Modelldaten flächendeckende Karten der wirkungsrelevanten Luftschadstoffe in Deutschland erstellen Spranger und Köble (1998) Die Kartierung dient der Ermittlung der regional differenzierten jährlichen Schadstoffdosis, der die verschiedenen Ökosysteme ausgesetzt sind, und der Bestimmung der Überschreitung der Critical Loads und Critical Levels der betrachteten Ökosysteme (s. Abb. 1).

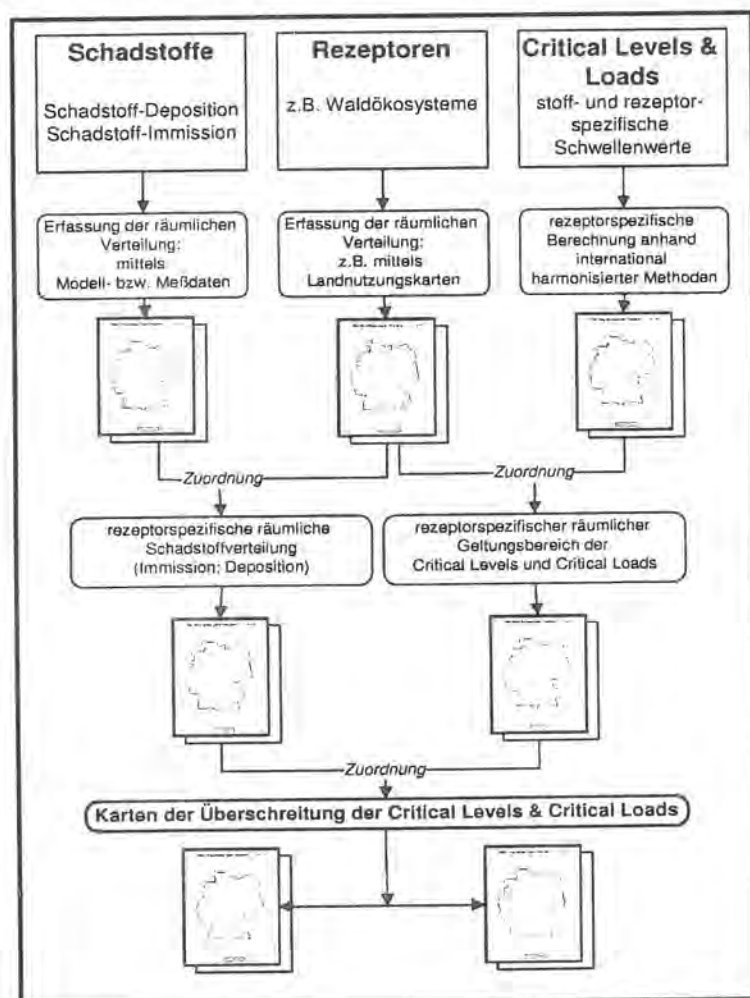


Abb. 1: Prinzip der Kartierung der Critical Levels und Critical Loads Überschreitungen in Deutschland

Für die komplexen Aufgaben, die für die wirkungsorientierte Kartierung von Luftschadstoffen zu bewältigen sind, die große Sachdatenmenge (verschiedene Schadstoffe), die geforderte zeitliche (mehrere Jahre) und hohe räumliche Auflösung (z.B. $1 \times 1 \text{ km}^2$) der Kartierungsergebnisse im nationalen Maßstab, ist der Einsatz eines leistungsfähigen Geographischen Informationssystems (GIS) unerlässlich. Im folgenden wird weniger auf die Sachinhalte der Kartierung eingegangen, sondern wesentlich auf die Kartierungsprozeduren unter ARC/INFO und die graphische Darstellung der Kartierungsergebnisse.

Datenbasis, Datenverarbeitung mit ARC/INFO und Datenpräsentation mit ArcView und ArcPlot

Die Datenbasis der Kartierung bilden einerseits **Punktmeßdaten** der Luftqualität, die in den verschiedenen lokalen, regionalen und überregionalen Meßnetzen von Niederschlagsbeschaffenheit (nasse Deposition) und Immission ermittelt werden. Andererseits ist die Einbindung **flächenhafter Modelldaten** (z.B. Niederschlagskarten des DWD; mittels Schadstoffausbreitungsmodellen erzeugte Karten der trockenen Deposition etc.) und weiterer **flächenhafter Grunddaten** (z.B. CORINE Land Cover Landnutzungskarte) erforderlich (Gauger et al. 1997).

Als Ergebnis der Kartierung erhält man für jeden der betrachteten Schadstoffe Karten, die die Belastung (Depositionsfrachten; Immissionskonzentrationen), die Belastbarkeit (Critical Levels; Critical Loads) des betrachteten Rezeptors, und – als Differenz zwischen Belastung und Belastbarkeit – die Höhe der Überschreitung der Critical Levels und Critical Loads räumlich differenziert darstellen (Spranger und Köble 1998). Primäre Ziele der aktuellen Kartierungsarbeiten unter ARC/INFO sind im einzelnen:

- die Berechnung und graphische Darstellung der Critical Levels für Ozon (O_3), reduzierten (NH_3) und oxydierten Stickstoff (NO_x) und Schwefeldioxid (SO_2) in Agrar- und Waldökosystemen
- die Berechnung und graphische Darstellung der Konzentrationen der Luftschadstoffe (Immission)
- die Berechnung und graphische Darstellung der Depositionsfrachten (Deposition Loads) von Sulfatschwefel (SO_4^{2-}), Ammonium- (NH_4^+) und Nitratstickstoff (NO_3^-), Kalzium (Ca^{2+}), Magnesium (Mg^{2+}), Kalium (K^+), Chlorid (Cl^-), Natrium (Na^+), Protonen (H^+) und der Schwermetalle Cadmium (Cd^{2+}) und Blei (Pb^{2+})
- die Berechnung und graphische Darstellung der Critical Loads für versauernd wirkende Schadstoffe und eutrophierenden Stickstoff in (Wald-) Ökosystemen
- die Berechnung und graphische Darstellung der Überschreitung der Critical Loads durch die aktuellen Depositionsfrachten für versauernd wirkende Schadstoffe und eutrophierenden Stickstoff in Waldökosystemen
- graphische Darstellung anderer Daten (Landnutzungskarte, Niederschlagskarte), die in der Berechnung der Critical Levels und Deposition Loads eingesetzt werden
- Bereitstellung topographischer Grunddaten und kartographischer Elemente; Speicherung der Sachdaten, Geometriedaten und Projektionen

Der graphische Output der erstellten Karten am Bildschirm oder als Postscript-Datei wird realisiert unter ArcView oder mit Hilfe des Critical Levels and Deposition Loads Information System (Informationssystem CANDIS) unter ArcPlot. CANDIS wurde zur kartographischen Bearbeitung und Präsentation der Karten vollständig unter der ARC/INFO-AML-Makrosprache aufgebaut erforderlich (Gauger et al. 1997).

Kartierungsbeispiel: Nasse Deposition von Luftschadstoffen

Aus den oben genannten Kartierungsarbeiten sei als Beispiel die Kartierung der nassen Deposition ausgewählt erforderlich (Gauger et al. 1997, 1998). In Abbildung 2 ist der Ablauf der Kartierung der nassen Deposition von Luftschadstoffen in Deutschland dargestellt und in Ab-

bildung 3 (Karten A bis E) sind einzelne Zwischenergebnisse illustriert. Alle Arbeiten der Kartenerstellung unter ARC/INFO sind in der AML-Makrosprache formuliert. Damit sind große Vorteile in Anbetracht der Fülle von Einzelschritten bei der Berechnung der zahlreichen Karten verbunden.

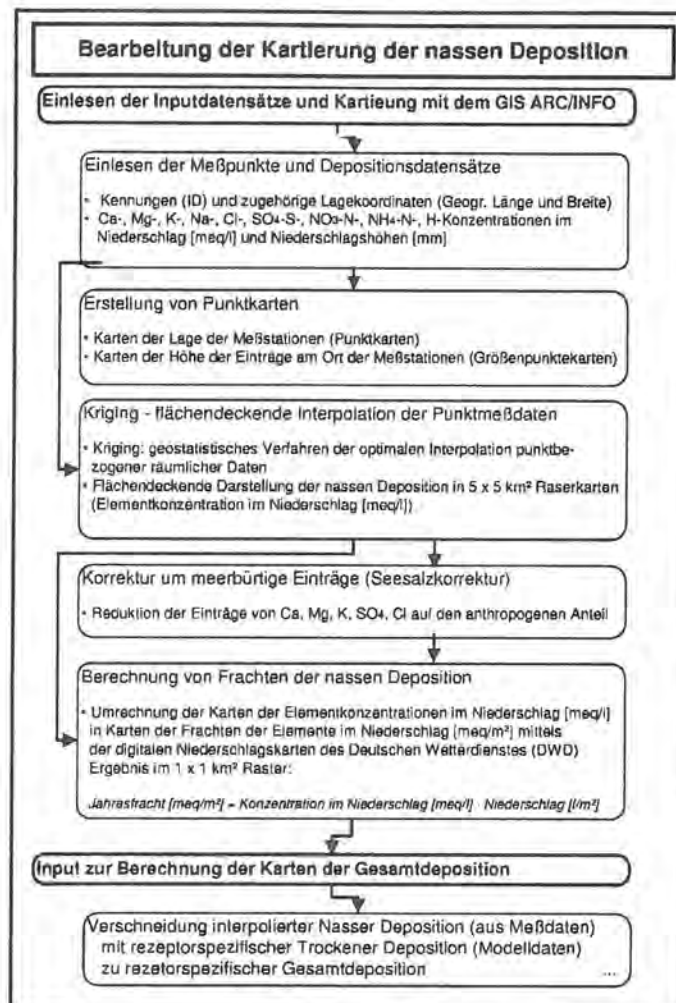


Abb. 2: Ablauf der Bearbeitung der Kartierung der nassen Deposition

Als Basisdaten der nassen Deposition dienen ausschließlich Meßdaten, die in den bestehenden Meßnetzen mittels im Freiland aufgestellter Niederschlagssammlergefäße kontinuierlich ermittelt werden (Gauger et al. 1997, 1998). Die Analysendaten der mit dem Niederschlag aus der Atmosphäre ausgewaschenen Luftschadstoffe liegen als Jahressumme der jeweiligen Stoffkonzentration im Niederschlag vor (Depositionsdatsatz). Die Lage jedes einzelnen Meßpunktes ist in geographischen Koordinaten erfaßt. Nach dem Einlesen der Datensätze können Größenpunktekarten (s. Abb. 3, A) erstellt werden. Sie geben einen Überblick der Lage und Eintragshöhe an den einzelnen Meßstationen. Gemeinsam mit einer statistischen Analyse lassen sich mit Hilfe dieser Karte z.B. „Ausreißer“ (unverhältnismäßig hohe oder niedrige Meßwerte) in ihrem regionalen Kontext analysieren und gegebenenfalls aus dem Datensatz eliminieren.

Die Interpolation der Meßdaten erfolgt mittels Kriging, einem geostatistischen Verfahren der optimalen flächenhaften Schätzung aus punktbezogenen räumlichen Daten. Das Ergebnis ist

die flächendeckende Darstellung der nassen Deposition in einer Rasterkarte mit 5×5km² Auflösung (Abb. 3, B).

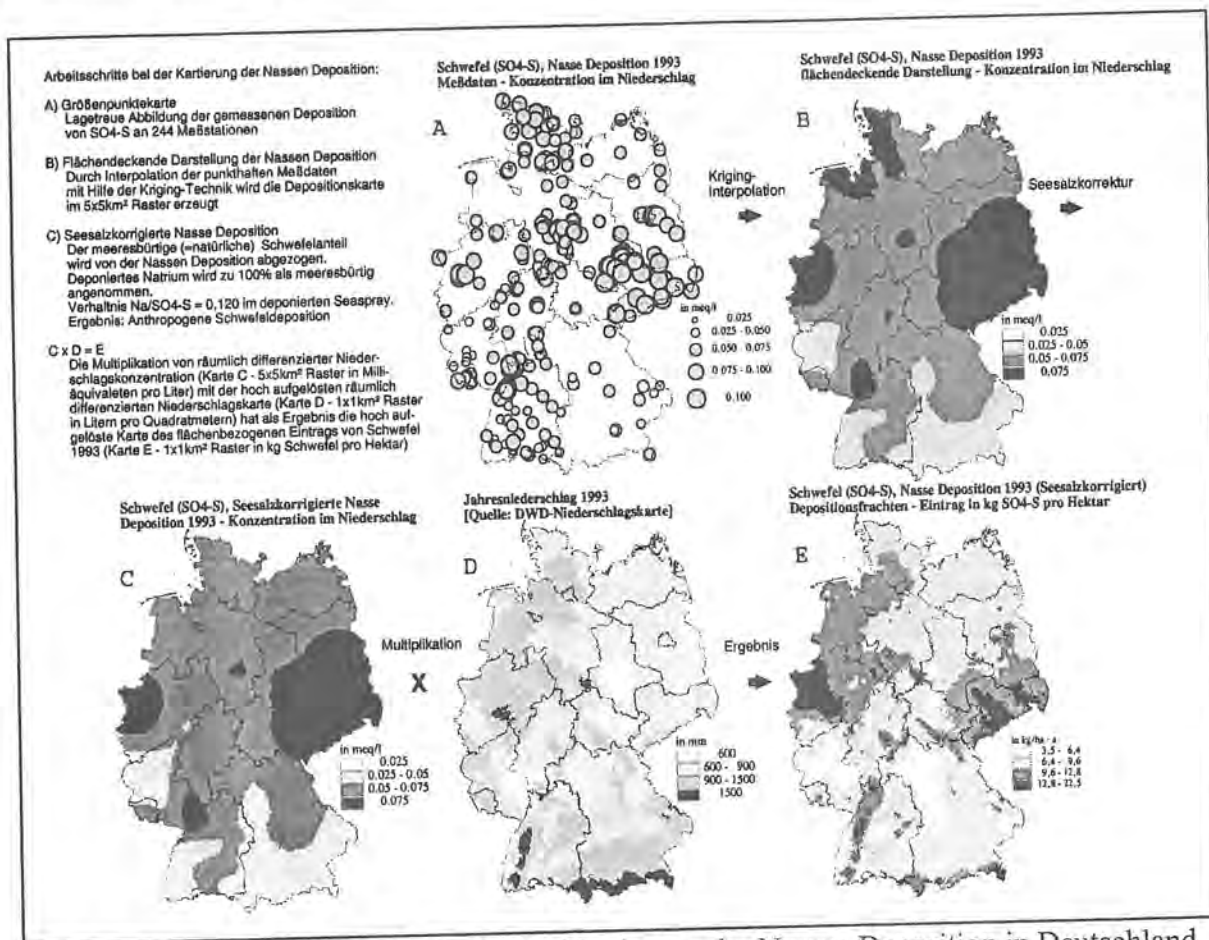


Abb. 3: Illustration der Arbeitsschritte der Kartierung der Nassen Deposition in Deutschland

Sollen nur die anthropogenen Anteile an der Deposition – nur diese können z.B. mit technischen Maßnahmen der Emissionsminderung reduziert werden – dargestellt werden, muß der aus natürlichen Quellen stammende Anteil der deponierten Stoffe ermittelt und vom Ergebnis abgezogen werden. Eine natürliche Quelle für Schwefel sind die Meere, die die Atmosphäre mit Bestandteilen des Seesalz („Seaspray“) befrachten. Mit der „Seesalzkorrektur“ wird der „Seaspray-Anteil“ berechnet und von der flächenhaften nassen Deposition abgezogen. Dazu muß die flächendeckende nasse Deposition von Natrium (Na_{dep}) vorliegen. Natrium gilt als zu 100% meeresbürtige Substanz. Das Verhältnis von Natrium zu den übrigen z.T. meeresbürtigen Stoffen im „Seaspray“ wird für die Seesalzkorrektur (ssk) zugrundegelegt. Das Natrium/Schwefel-Verhältnis ist 0,120 (Umweltbundesmat 1996). An jedem Ort (auf der Karte Abb.3, B) wird die Schwefeldeposition (SO₄-S_{dep}) dementsprechend auf den anthropogenen Beitrag vermindert durch Verschneidung der Karten nach der Formel:

$$SO_4-S_{ssk} = SO_4-S_{dep} (Na_{dep} \times 0,120).$$

Küstennah liegen die Anteile anthropogenen Schwefels in der Regel bei unter 25%, während in Süddeutschland nur zu geringem Anteil meeresbürtiger Schwefel (um bis zu 5%) mit dem Niederschlag deponiert wird (Gauger et al. 1997) (vgl. Abb.3, B und C).

Die Berechnung von Depositionsfrachten (flächenbezogener Eintrag, in kg Schwefel pro Hektar und Jahr) geschieht durch Multiplikation der interpolierten Konzentration von SO₄-S

im Niederschlag (Abb. 3, C) mit dem Jahresniederschlag. Für die Niederschlagshöhen liegen sehr genaue Niederschlagskarten (Abb. 3, D) vor, die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) auf der Basis des engmaschigen Niederschlagsmeßnetzes unter Berücksichtigung topographischer Effekte modelliert werden (Müller-Westermeier 1995). Das Ergebnis der Verschneidung dieser beiden Karten ist die räumlich differenzierte Karte des Schwefeleintrags [$\text{kg SO}_4\text{-S / ha} \cdot \text{a}$] mit der nassen Deposition in einer Rasterauflösung von $1 \times 1 \text{ km}^2$ (Abb. 3, E). Wie in Abb. 2 unten angedeutet, ist hier nur ein kleiner Ausschnitt der Arbeiten im Zusammenhang der Critical Levels und Critical Loads Kartierungen in Deutschland beispielhaft vorgestellt. Für weitere Details, Beispiele und Ergebnisse sei auf die angeführte Literatur verwiesen, sowie auf den Artikel "Anshelm F und Gauger Th: Kartierung von Toleranzgrenzwerten der Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien unter ARC/INFO" in diesem Heft.

Literatur:

- Gauger Th, Köble R und Smiatek G (1997): Kartierung kritischer Belastungskonzentrationen und -raten für empfindliche Ökosysteme in der Bundesrepublik Deutschland und anderen ECE-Ländern. Endbericht zum Forschungsvorhaben 106 01 061 im Auftrag des Umweltbundesamtes. Institut für Navigation der Universität Stuttgart. - Teil 1: Deposition Loads. 126 S. - Teil 2: Critical Levels. 75 S. - Teil 3: Informationssystem CANDIS. 27 S.
- Gauger Th, Köble R und Smiatek G (1998): Erfassung der nassen Deposition. In: Nagel H-D, Gregor H-D (eds., 1998a): Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Springer-Verlag. 320 S.
- Gregor H.-D. (1998): Konzepte für die Luftreinhaltepolitik. In: Nagel H-D, Gregor H-D (eds., 1998a): Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Springer-Verlag. 320 S.
- Müller-Westermeier G (1995): Numerisches Verfahren zur Erstellung klimatologischer Karten. Berichte des Deutschen Wetterdienstes (DWD) Nr. 193. Offenbach.
- Nagel H-D, Gregor H-D (eds., 1998a): Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Springer-Verlag. 320 S.
- Nagel H-D, Gregor H-D (1998b): Ökologische Wirkungsschwellen und Grenzen der Belastbarkeit. In: Nagel H-D, Gregor H-D (eds., 1998a): Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Springer-Verlag. 320 S.
- Smiatek G, Köble R und Gauger Th (1995): Das Critical Loads Levels-Konzept. In: Arndt U, Böcker R und Kohler A (eds., 1995): Grenzwerte und Grenzwertproblematik im Umweltbereich. 27. Hohenheimer Umwelttagung, 27. Januar 1995. Verlag G. Heimbach. S. 111 – 119.
- Spranger T, Köble R (1998): Überschreitungen von Critical Levels und Critical Loads durch aktuelle Belastungen. In: Nagel H-D, Gregor H-D (eds., 1998a): Ökologische Belastungsgrenzen – Critical Loads & Levels. Ein internationales Konzept für die Luftreinhaltepolitik. Springer-Verlag. 320 S.
- Umweltbundesamt (1996): Manual on Methodologies and Criteria for Mapping Critical Levels/Loads and Geographical Areas Where They Are Exceeded. Werner B, Spranger T (eds): UBA-Texte 71/96. Umweltbundesamt Berlin. 216 S.

Hybride Modellierung und Analyse von unsicheren Daten

Michael Glemser, Ulrike Klein
Institut für Photogrammetrie
Universität Stuttgart

1 Einführung

Die Verfügbarkeit digitaler räumlicher Daten hat sich mit steigender Anzahl an Anwendungsbereichen ständig verbessert. So kann heute auf Datenbanken zugegriffen werden, die Basisdaten für vielfältige Zwecke bereitstellen. Beispiele sind amtliche Daten zu den Themen Topographie (z. B. ATKIS), Liegenschaften (z. B. ALK mit ALB), Geologie (z. B. Digitale Geologische Karte, Digitale Bodenkarte), Umwelt (z. B. Umweltinformationssysteme der Länder und Kommunen) und kommerzielle Daten wie Straßendaten (z. B. NavTech, Scout), Satellitenbilder (Landsat, Spot, MOMS) und Marketinginformationen (Kaufkraftdaten, Daten zum Konsumverhalten)). Ein potentieller Anwender kann prinzipiell alle diese Daten nutzen, um seine spezifische Aufgabe zu lösen. Im Idealfall könnte er vollständig auf eine eigene Erfassung verzichten und seine Analysen ausschließlich mit Fremddaten betreiben. Für Anwendungen mit komplexen Fragestellungen ist dazu die Kombination vieler unterschiedlicher Datenquellen notwendig. Betrachtet man das Wachstum der Computernetzwerke, so kann man sich vorstellen, daß Datenaustausch und Zugriff auf externe Datenbanken in naher Zukunft direkt und unmittelbar erfolgen werden. Entsprechende technische Spezifikationen werden momentan dazu erarbeitet (McKee, Kuhn, 1997; OpenGIS, 1999). Der problemlose Zugriff auf an beliebigen Orten und mit unterschiedlichsten Inhalten bereitgestellten Daten birgt aber auch ein beträchtliches Risiko in sich. Es können Daten fehlerhaft genutzt und zu falschen oder widersprüchlichen Ergebnissen kombiniert werden. Aus diesem Grund sind Überprüfungen der Qualität der Daten und darauf basierender Ergebnisse von unerläßlicher Bedeutung.

Von Anwenderseite lassen sich dabei zwei Problemstellungen unterscheiden. Der *Angebotsaspekt* ist für alle Anwender von Bedeutung, die fremde Daten nutzen wollen. Sie haben zu entscheiden, ob die verfügbaren Daten für ihre eigenen Zwecke geeignet sind. Treten konkurrierende Anbieter auf (z. B. im kommerziellen Bereich), so sind die besten Daten zu ermitteln. Dies gelingt durch Ergänzung der Daten um zusätzliche Qualitätsbeschreibungen (Metadaten), anhand denen der Anwender eine Prüfung durchführen kann. Es liegt in der Verantwortung des Anbieters, die entsprechenden Informationen bereitzustellen. Der *Nutzungsaspekt* wird dann relevant, wenn Daten analysiert werden. Die neu erzielten Informationen sind qualitativ zu beurteilen. Dazu ist die Qualität der Eingangsdaten über die Analyse hinweg auf das Ergebnis zu übertragen und als weitere Information mit darzustellen. So können Informationen nach Wert und Güte unterschieden und eventuelle Fehlentscheidungen vermieden werden. Die folgenden Ausführungen konzentrieren sich auf den Nutzungsaspekt, als das schwierigere der beiden Probleme.

2 Geometrische und thematische Unsicherheit

Vektor- und Rasterdaten als wichtigste Datenarten in GIS setzen sich jeweils aus geometrischen und thematischen Anteilen zusammen (Bill, Fritsch, 1991). Bei den Rasterdaten wird die Geometrie durch das Enumerationsverfahren bestimmt, das eine gleichmäßige Unterteilung des Raumes in Rasterzellen vorsieht. Als Verwaltungsstruktur bietet sich eine Matrixform an. Der

Raumbezug ist diskret durch die Position der Zelle im Raster gegeben. Bei den Vektordaten setzt sich die Geometrie auf der Basis geometrischer Primitive (Punkt, Linie, Fläche) zusammen. Dabei kommt das Prinzip der Randbeschreibung zum Einsatz, bei dem ein höherdimensionales Element immer durch seinen Rand repräsentiert wird (z. B. eine Fläche durch ihre Umringslinien). Die Thematik wird bei beiden Datenarten durch Attribute beschrieben. Sie besitzen entweder diskrete oder kontinuierliche Werte. Entsprechend können sie der nominalen oder ordinalen Skala (bei diskreten Werten) bzw. der Intervall- oder Ratio-Skala (bei kontinuierlichen Werten) zugeordnet werden.

Sowohl die Geometrie- als auch die Thematisierungskomponente sind Einflüssen unterworfen, die Unsicherheiten in den Daten hervorrufen. In den nachfolgenden Abschnitten wird getrennt für beide Komponenten auf Ursachen, Größen und mögliche Parameter eingegangen. Ziel ist dabei, Modelle für jede Komponente zu formulieren, mit denen eine Beschreibung der Unsicherheit in GIS zu realisieren ist.

2.1 Geometrische Unsicherheit

Die Unsicherheit in der Geometrie eines Objektes kann visuell veranschaulicht werden, indem man die Erfassung mehrmals unabhängig voneinander durchführt (Abbildung 1). Überlagert man anschließend alle Erfassungen, so zeigen sich deutliche Unterschiede zueinander. Keine Erfassung gleicht der anderen. Es entsteht vielmehr ein Bereich, in dem die Geometrie streut. Dieser Bereich repräsentiert die Variation und damit die Unsicherheit in der Geometrie des Objektes.

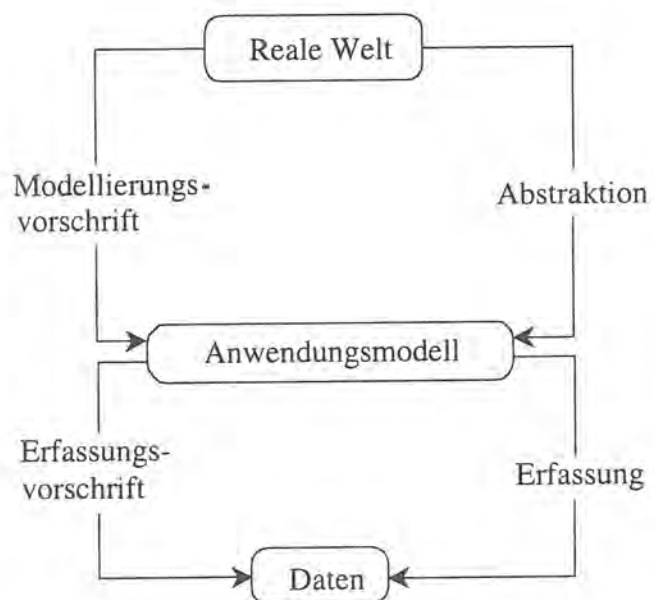
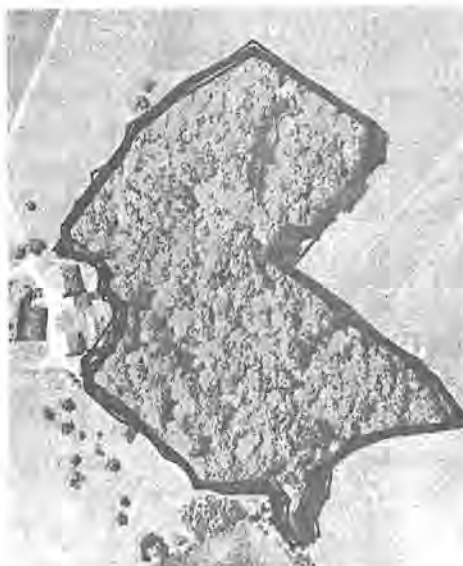


Abbildung 1: Erfassungsvorgang als Quelle für Datenunsicherheit

Es existieren verschiedene Ursachen, die auf die Größe der Variation einwirken. Im besonderen trägt der Erfassungsvorgang hierzu bei. Er definiert eine Abbildung der realen Welt in ein GIS-Modell (Abbildung 1). Wie bei allen Modellbildungen findet auch hier eine Abstraktion statt, die dazu führt, daß Modell und Wirklichkeit Differenzen aufweisen. Der Gesamtvorgang läßt sich in verschiedene Stufen untergliedern, die jeweils charakteristische Einflüsse beinhalten (Caspary, 1992). Ausgehend von der realen Welt ist als erstes das zu erfassende Objekt räumlich von Nachbarobjekten abzugrenzen. Im Anschluß daran ist der gedachte Verlauf der Grenzlinie durch die Bestimmung markanter Punkte in diskreter Form festzulegen. In der letzten Stufe werden dann die gefundenen Punkte digitalisiert. Digitalisierung ist ein Meßprozeß, dessen Genauigkeit von den eingesetzten Geräten und Methoden abhängig ist. Diese Einflüsse

sind im allgemeinen zufälliger Natur. Das Ergebnis der Diskretisierung hängt von der Form der zu erfassenden Grenzlinie (kontinuierlich oder diskret) ab. Ihr Einfluß wirkt sich systematisch auf die Unsicherheit aus und kann bei angepaßter Anzahl und Auswahl der Punkte vernachlässigbar klein gehalten werden. Bei der Abgrenzung spielt die Art des Objektes eine wichtige Rolle. Künstliche (von Menschen geschaffene) Objekte lassen sich besser von anderen Objekten unterscheiden, als dies für natürliche Objekte der Fall ist. Zwischen natürlichen Objekten existiert im allgemeinen ein fließender Übergang, der eine Zone definiert, innerhalb der die Geometrie variieren kann. Weitere Einflüsse ergeben sich durch mögliche Verdeckungen von Informationen oder durch die erfasserspezifische Interpretation.

Wichtig festzuhalten ist, daß alle Geometriedaten zu einem gewissen Grad mit Unsicherheit behaftet sind. Die Berücksichtigung der Unsicherheit erfordert die Bereitstellung eines geeigneten Modells. Eine Reihe möglicher Modelle sind bereits definiert (Glemser, 1994). Als Grundlage für diese Arbeit dient das *stochastische Modell*. Darin wird eine Linie als stochastische Variable (Zufallsvariable) angesehen, deren Variation sich durch eine Verteilung charakterisieren läßt (Caspary, Scheuring, 1992; Glemser, 1996). Als mögliche Verteilung kann die Normalverteilung angenommen werden. Zu deren Beschreibung ist als Parameter die Varianz zu bestimmen. Mit Hilfe der Verteilungsfunktion können dann Wahrscheinlichkeiten für die Zugehörigkeit beliebiger Punkte zum Objekt ermittelt werden.

Die Varianz als wichtigster Parameter der Verteilung kann prinzipiell als ein zusätzliches Attribut angesehen und so verwaltet werden (Drummond, 1995). Eine anschauliche Darstellung ist zu erzielen, wenn auf die erwähnten Wahrscheinlichkeiten übergegangen wird (Kraus, Haussteiner, 1993). Sie definieren eine räumlich-kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsfunktion, die zu diskretisieren ist. Die Größe des dazu einzusetzenden Diskretisierungsintervalls Δ ist abhängig von der Varianz σ^2 der Liniengeometrie. Die Festlegung zu $\Delta = \sigma/4$ gewährleistet eine ausreichende Genauigkeit für eine eventuelle Rekonstruktion der Funktion. Mit Hilfe des Intervalls Δ wird über das Objekt ein gleichmäßiges Raster gelegt, dessen einzelne Pixel den Punkten entsprechen, für die die Wahrscheinlichkeiten berechnet werden müssen.

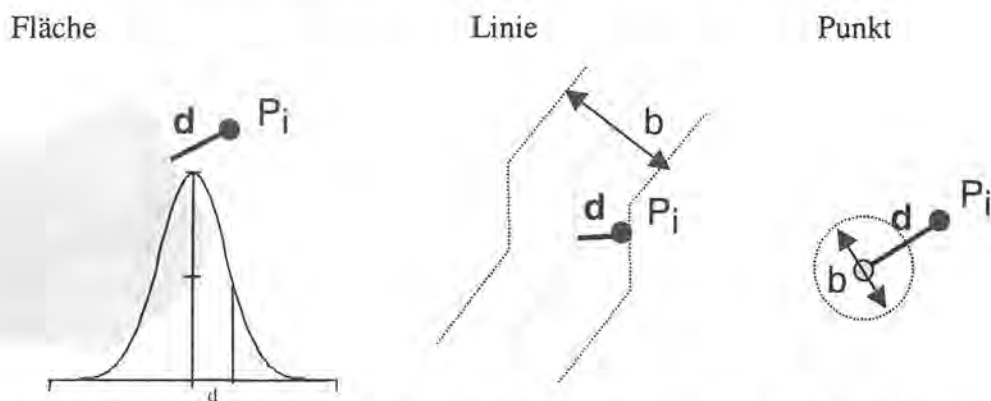


Abbildung 2: Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für verschiedene Objekttypen

Die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten erfolgt jeweils in Abhängigkeit vom Objekttyp (Abbildung 2):

- Für Flächenobjekte ergibt sich die Wahrscheinlichkeit $p(x, y)$ mit der ein Punkt $P(x, y)$ zum Objekt gehört aus

$$p(x, y) = p(d) = \int_{-\infty}^d f(t) dt = F(d)$$

mit

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}.$$

Bei $f(t)$ handelt es sich um die Dichtefunktion der Normalverteilung und bei $F(d)$ um deren Verteilungsfunktion. Für den Abstand d zur mittleren Grenzlinie gilt, daß er innerhalb des Objektes positiv und außerhalb negativ sein soll.

- Linien- und Punktoobjekte benötigen zusätzlich eine Annahme über die Breite b des Objektes in der Wirklichkeit. Entsprechend ergibt sich die Wahrscheinlichkeit $p(x, y)$ bezüglich eines Linienobjektes zu

$$p(x, y) = p(d, b) \cdot p(-d, b) = F\left(\frac{b}{2} + d\right) \cdot F\left(\frac{b}{2} - d\right)$$

mit

$$p(d, b) = \int_{-\infty}^{\frac{b}{2}+d} f(t) dt = F\left(\frac{b}{2} + d\right)$$

mit Breite b des Objektes und Abstand d zur mittleren Linie.

- Bei Punktoobjekten berechnet sich die gesuchte Wahrscheinlichkeit $p(x, y)$ aus

$$p(x, y) = p(d, b)^2 \cdot p(-d, b)^2 = F\left(\frac{b}{2} + d\right)^2 \cdot F\left(\frac{b}{2} - d\right)^2,$$

wobei die Wahrscheinlichkeiten $p(d, b)$ und $p(-d, b)$ wie beim Linienobjekt berechnet werden.

Die so entstehenden Wahrscheinlichkeitsmatrizen können auch zum Zwecke der Verwaltung genutzt werden. Sie ersetzen die Varianz als Parameter der Unsicherheit. Ein solcher Ansatz hat bei der Anwendung innerhalb eines hybriden GIS einige Vorteile, auf die in Abschnitt 3 näher eingegangen wird. Abbildung 3 enthält beispielhafte Darstellungen von Wahrscheinlichkeitsmatrizen für die verschiedenen Objekttypen.

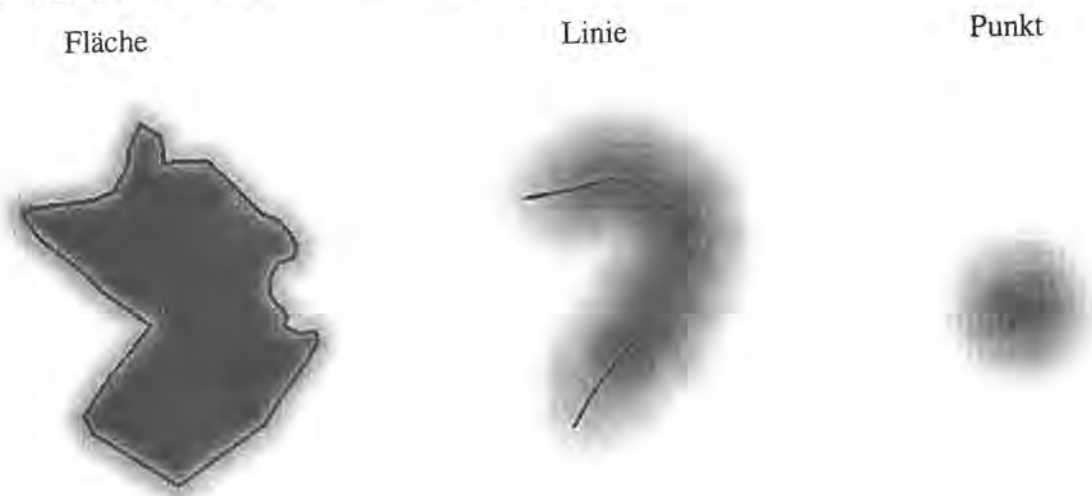


Abbildung 3: Beispiele zur Darstellung der Wahrscheinlichkeiten

2.2 Thematische Unsicherheit

Die Beschreibung der Thematik erfolgt durch Attribute, die entweder diskrete oder kontinuierliche Werte annehmen können. Eine wichtige Datenquelle für die Erstellung thematischer Karten sind multispektrale Fernerkundungsaufnahmen, die als Ausgangsdaten für die nachfolgenden Untersuchungen dienen. Die Auswertung von Fernerkundungsdaten beinhaltet die Definition von Klassen, z. B. Landnutzungsklassen, und die Bestimmung der Zugehörigkeit der flächenhaft erfaßten Ausschnitte der Erdoberfläche zu diesen Klassen. Fehlereinflüsse in beiden Schritten führen zur thematischen Unsicherheit. Bei der Definition der Klassen besteht das Problem, aus der Vielzahl an möglichen Objektarten eine endliche Anzahl von Klassen festzulegen. So stellt sich beispielsweise im Grenzbereich zwischen Wald und Wiese die Frage, ab welcher Häufigkeit von Bäumen die Klasse Wald vorliegt und ob es nicht sinnvoll sein könnte, Mischformen zu definieren.

Durch Klassifizierungsverfahren, z. B. die Maximum-Likelihood-Methode (Richards, 1993), werden dann Maßzahlen für die Zugehörigkeiten der betrachteten Bildelemente zu den einzelnen Klassen berechnet. Bei den gegenwärtigen Klassifizierungsmethoden wird mit Hilfe eines Entscheidungskriteriums - im Falle des genannten Verfahrens ist es die größte Wahrscheinlichkeit - jedem Bildelement eine einzige Klasse zugewiesen. Ausschließlich diese ermittelte Landnutzungs-kategorie wird als Ergebnis der Klassifizierung für jedes Bildelement festgehalten, jedoch nicht der Grad der Zugehörigkeit. Diese Vorgehensweise ist mit einem Informationsverlust verbunden. So ist nicht möglich, zu beurteilen, ob eine starke Zugehörigkeit (z. B. 0.90 Wald und 0.10 Wiese) oder eine schwache Zugehörigkeit (z. B. 0.51 Wald und 0.49 Wiese) vorliegt. Darüber hinaus kann keine Aussage über eine potentielle alternative Klasse gemacht werden. Abbildung 4 zeigt ein Testgebiet (a) mit dem Ergebnis der Klassifizierung (b) der Landnutzungs-klassen Acker, Siedlung und Wald.

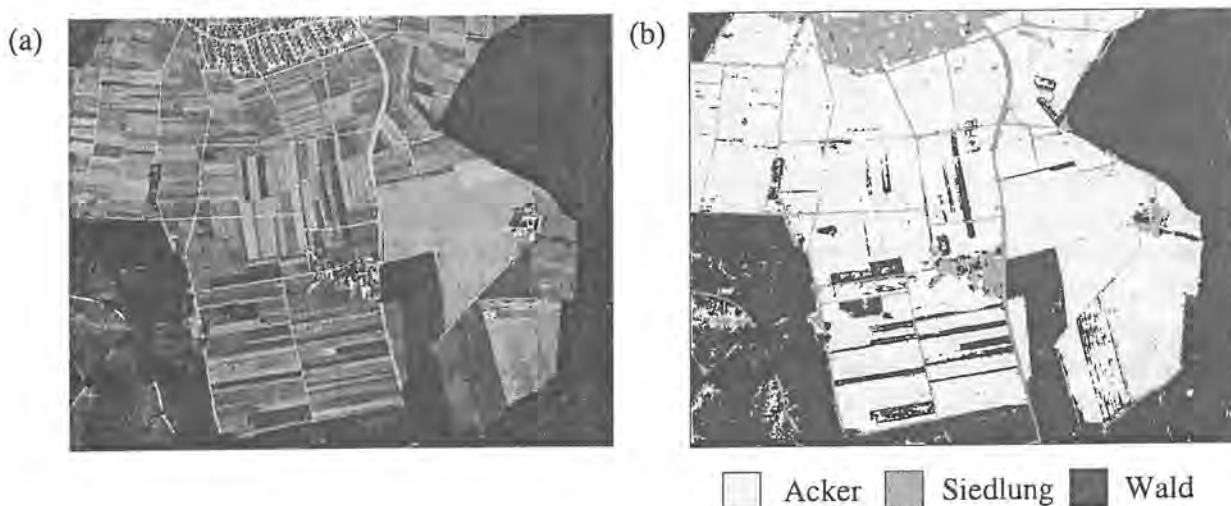


Abbildung 4: Testgebiet (a) und Ergebnis der Klassifizierung (b)

Zur Beurteilung der Qualität der Klassifizierung ist es üblich, Gebiete bekannter Thematik (Kontrollgebiete) mit dem Ergebnis der Klassifizierung zu vergleichen und das Ergebnis dieses Vergleichs in der Konfusionsmatrix bereitzustellen. Zusätzlich werden aus der Konfusionsmatrix verschiedene Kenngrößen abgeleitet, die die Genauigkeit der Klassifizierung zusammenfassend beurteilen (Congalton, 1991, Stehman, 1997). Zur globalen Beurteilung eignen sich der Anteil der korrekt klassifizierten Pixel und der Kappa-Koeffizient. Zur klassenweisen Beurteilung der Güte werden die Produzenten- und die Nutzergenauigkeit verwendet. Diese individuellen Maße können zu sehr unterschiedlichen Beurteilungen der Genauigkeiten der Klassen führen. Diese Genauigkeitsmaße fassen die in der Konfusionsmatrix enthaltene Information unterschiedlich zusammen, aber keines dieser Maße ist für die Beurteilung der erreichten Ge-

Genauigkeit universell am besten geeignet. Die Konfusionsmatrix und die abgeleiteten Kenngrößen können als externe Genauigkeitsmaße bezeichnet werden, da zu ihrer Berechnung externe Informationen verwendet werden.

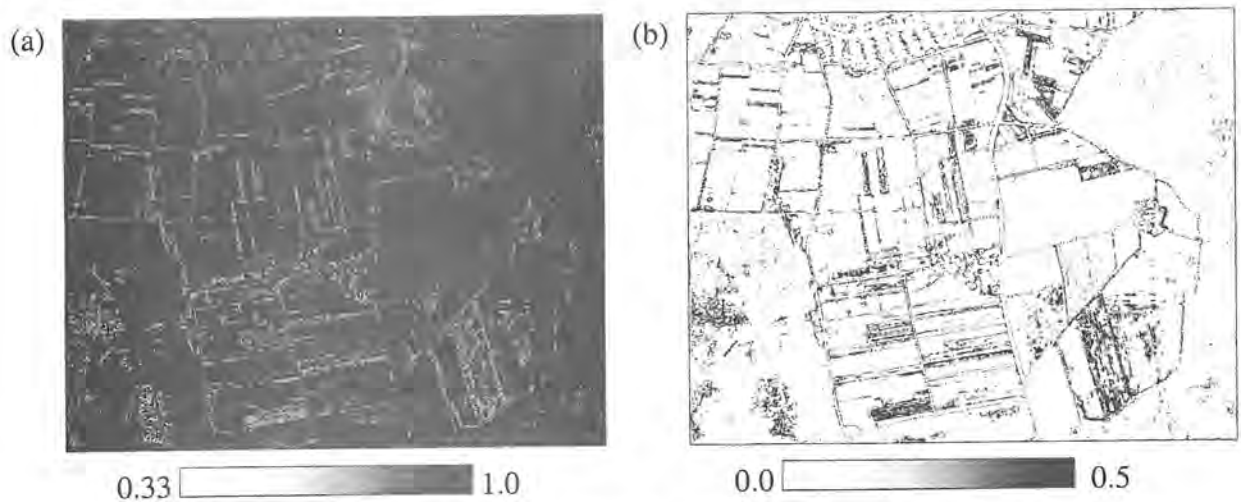


Abbildung 5: Darstellung der größten (a) und zweitgrößten (b) Wahrscheinlichkeiten

Alternativ können die im Rahmen der Klassifizierung berechneten Maßzahlen für die Zugehörigkeit der Bildelemente zu den einzelnen Klassen als Indikatoren für die Genauigkeit der Zuweisung der Thematik verwendet werden. Bei der Maximum-Likelihood-Klassifizierung lassen sich die Wahrscheinlichkeiten jedes einzelnen Bildelementes in einem sogenannten Wahrscheinlichkeitsvektor zusammenfassen. Er enthält die Wahrscheinlichkeiten, mit denen das zugehörige Bildelement den definierten Landnutzungsclassen zugewiesen werden kann. Die Dimension des Wahrscheinlichkeitsvektors entspricht der Anzahl n der Klassen. Der Wertebereich der größten Wahrscheinlichkeit liegt im Intervall $[1/n, 1.0]$, der der zweitgrößten Wahrscheinlichkeit im Intervall $[0.0, 0.5]$ und der der drittgrößten Wahrscheinlichkeit im Intervall $[0.0, 0.33]$. Die Summe sämtlicher Wahrscheinlichkeiten pro Bildelement ergibt 1.0. Im Gegensatz zu den externen Genauigkeitsmaßen werden die Wahrscheinlichkeiten für die Klassenzugehörigkeiten als interne Genauigkeitsmaße bezeichnet. In Abbildung 5 sind die jeweils pro Bildelement größten (a) und zweitgrößten (b) Wahrscheinlichkeiten durch Grauwerte dargestellt. Die dunklen Bereiche zeigen eine hohe Wahrscheinlichkeit an, während die hellen Regionen einen hohen Grad an Unsicherheit aufweisen. Linienhafte Unsicherheit tritt entlang des Grenzverlaufes zwischen benachbarten Objekten auf und kann durch die geometrische Auflösung der Fernerkundungsdaten begründet werden. Flächenhafte Unsicherheit kommt im Beispiel hauptsächlich in der Landnutzungsclass Acker vor und läßt eventuell auf eine unzureichende Anzahl an Objektklassen in der durchgeführten Klassifizierung schließen.

In den unsicheren Bereichen stellt sich die Frage, welche Klasse alternativ mit welcher Wahrscheinlichkeit zugewiesen werden kann. Eine ausreichende Beschreibung der inneren Genauigkeit ist nur dann gewährleistet, wenn die Alternativklassen mitsamt ihren Wahrscheinlichkeiten als zusätzliche Information bereitgestellt und in nachfolgenden Analysen auch mitverwendet werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, sämtliche Wahrscheinlichkeiten pro Bildelement, die größer als ein vorgegebener Grenzwert sind, als Informationen zur Genauigkeitsbeschreibung der jeweiligen Landnutzungsclass zu verwenden. Ergeben sich z.B. für ein Bildelement die Wahrscheinlichkeiten für Acker und Siedlung zu 0.60 und 0.40, so kann dieses Bildelement mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten sowohl der Klasse Acker als auch der Klasse Siedlung zugehören. Dies führt dazu, daß sich die Landnutzungsclassen räumlich überlappen können. Dies ist als ein Vorteil zu sehen, da dadurch Mischpixel, die längs der Grenzlinie zwischen verschiedenen Landnutzungsclassen auftreten, modelliert werden können, ohne zusätzliche Klassen definieren zu müssen.

3 Hybrides Datenmodell mit Modellierung der Datenunsicherheit

3.1 Hybrides Datenmodell

Eine einfache Charakterisierung eines GIS-Systems wird dann erhalten, wenn die Datenart des Systems bekannt ist. Sind dies Rasterdaten, so spricht man von einem Raster-GIS, während es sich bei Vektordaten um ein Vektor-GIS handelt. Beide Typen basieren auf einem unterschiedlichen Datenmodell, das entsprechend Vektor-Modell oder Raster-Modell genannt werden kann (Abbildung 6). Eine Vielzahl von Anwendungen läßt sich mit dem einen oder anderen System erledigen. Doch gibt es eine Reihe von z. T. neuen Bereichen, die eine gemeinsame Verarbeitung von Raster- und Vektordaten in einem System erfordern. Dies führte zum Begriff des hybriden GIS (Fritsch, 1988).

Ein hybrides GIS erlaubt die Integration sowohl von Vektor- als auch von Rasterdaten. In der Form der Integration bestehen jedoch Unterschiede. Sie kann in verschiedenen Stufen ausgeführt werden (Ehlers et al., 1989):

- Die erste Stufe verfügt über die Möglichkeit, die jeweils andere Datenart einzulesen und als Zusatzinformation zu visualisieren, z. B. das Darstellen eines Rasterbildes im Hintergrund in einem Vektor-GIS. Es handelt sich dabei um eine einfache Überlagerung der Daten, ohne daß weitergehende Verarbeitungsoperationen möglich sind.
- In der zweiten Stufe wird zusätzlich eine Konversion bereitgestellt, mit deren Hilfe die systemfremde Datenart in die eigene Datenart umgewandelt werden kann. Somit können beispielsweise Vektordaten zum Zwecke der Analyse in einem Raster-GIS über den Weg einer Vektor-Raster-Konversion in Rasterdaten konvertiert werden. Sie lassen sich dadurch wie Rasterdaten im Datenmodell integrieren.
- Die dritte und höchste Stufe der Integration wird erreicht, wenn das im System angewandte Datenmodell selbst hybrid ist. Dazu sind die beiden bisher getrennten Datenmodelle für Vektor- und Rasterdaten zu vereinigen. Es entsteht ein gänzlich neues, jetzt hybrides Modell. Nur wenn die dritte Integrationsstufe in einem System realisiert wurde, kann die Integration als vollständig bezeichnet werden. Die darin enthaltenen Funktionen arbeiten unabhängig von der Datenart und erlauben somit die Ausnutzung der Vorteile beider Datenmodelle. Die Umsetzung dieser Integrationsstufe bedeutet für bestehende Systeme häufig eine komplette Neuentwicklung der Funktionalitäten. Aus diesem Grund ist kein heute gängiges System dieser Stufe zuzuordnen.

Im folgenden wird ein hybrides Datenmodell beschrieben, das als Basis für eine solche Neuentwicklung dienen kann. Ein hybrides Datenmodell ergibt sich aus der Vereinigung der beiden Modelle für Raster- und Vektordaten. Schwierigkeiten treten hierbei aufgrund der folgenden Unterschiede auf. Das Rasterdatenmodell verbindet Geometrie und Thematik durch die Zuweisung genau eines Attributwertes zu jeder Rasterzelle. Zelle und Wert definieren dabei eine untrennbare Einheit. Im Vektormodell sind Thematik und Geometrie über den Begriff des Objektes gekoppelt. Eine direkte Verbindung wie im Rastermodell besteht nicht mehr. Es ist durchaus denkbar, daß Geometrie und Thematik unabhängig voneinander gespeichert und verarbeitet werden. Ein Beispiel hierfür ist die häufig anzutreffende Aufteilung in der Datenhaltung. Sachdaten (Attribute) werden dabei in einer Datenbank, Geometriedaten in einem Dateisystem verwaltet. Ein weiterer Unterschied besteht darin, daß im Rastermodell im allgemeinen nur ein Attributwert (bzw. eine Thematik) jeder Rasterzelle beigelegt werden kann. Dagegen erlaubt das Vektormodell die Beschreibung beliebig vieler Thematiken zu jedem Objekt.

Als Grundlage für das nachfolgend definierte hybride Modell wird auf ein bereits bestehendes Konzept aufgebaut (Molenaar, Fritsch, 1991). Ansatzpunkt für die Vereinigung stellt dabei die Ausdehnung des Objektbegriffes auch auf Rasterdaten dar. Dazu ist es notwendig, daß innerhalb des Rasterdatenbestandes eine Objektbildung durchgeführt wird. Damit wird eine gemeinsame Basis durch den Oberbegriff des Objektes geschaffen, mit deren Hilfe sich dann die entsprechenden Daten strukturieren lassen.

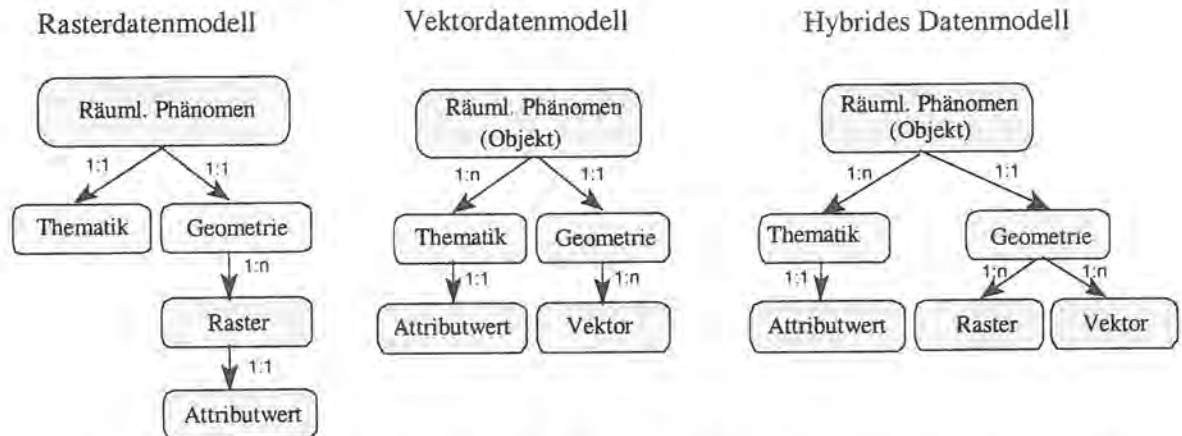


Abbildung 6: Gegenüberstellung des Raster-, Vektor- und hybriden Datenmodells

Abbildung 6 veranschaulicht schematisch die entwickelte Modellierung. Sie besitzt deutliche Ähnlichkeiten zum Vektormodell. Erweiterungen sind in der Geometriekomponente vorhanden. Die geometrische Beschreibung eines Objektes kann nun zusätzlich in Form einer Rasterdarstellung erfolgen. Raster- und Vektorgeometrie stellen dabei völlig gleichberechtigte Möglichkeiten dar. Die Thematikkomponente wurde unverändert aus dem Vektormodell übernommen.

Beispiele für die Modellierung von Raster- bzw. Vektordaten im hybriden Modell sind der Abbildung 7 zu entnehmen.

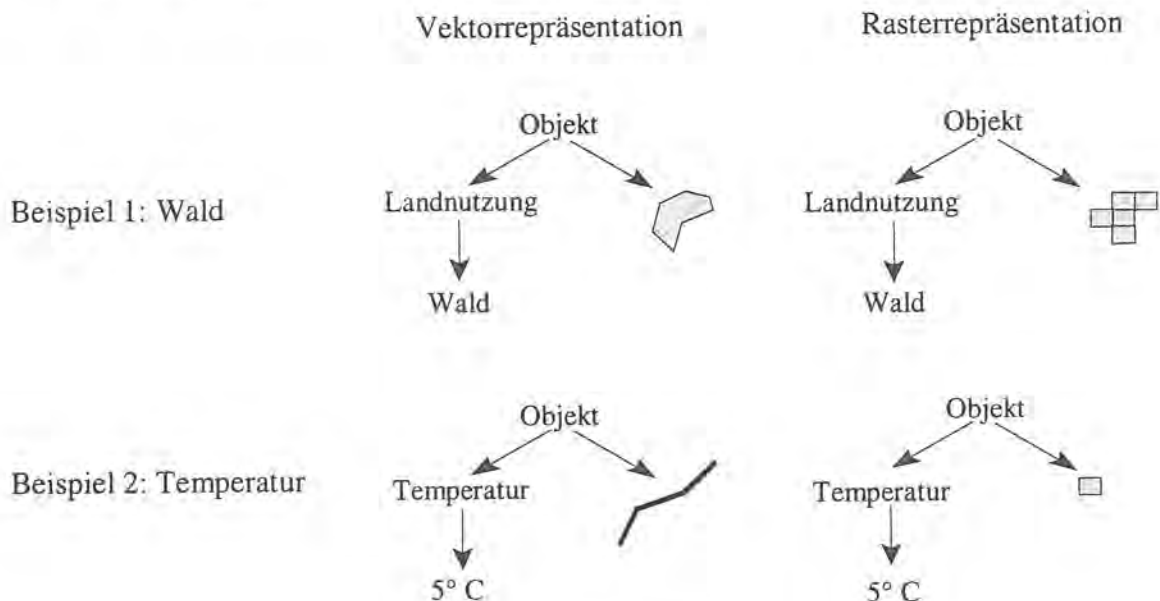


Abbildung 7: Beispiele zur hybriden Modellierung

Sehr anschaulich und für viele Zwecke geeignet kann das Modell dem Stand der heutigen Technik entsprechend in objektorientierter Form beschrieben werden. Sie erfolgt hier (Abbildung 8) unter Nutzung der bekannten OMT-Notation (Object Modelling Technique

(Rumbaugh et al., 1991)). Objektorientierte Modelle müssen aber nicht notwendigerweise mit Hilfe der objektorientierten Programmierung oder auf einer objektorientierten Datenbank implementiert werden (Fritsch, Anders, 1996). Sie definieren vielmehr allgemeine Beschreibungsmodelle, die sich in vielfältiger Weise umsetzen lassen.

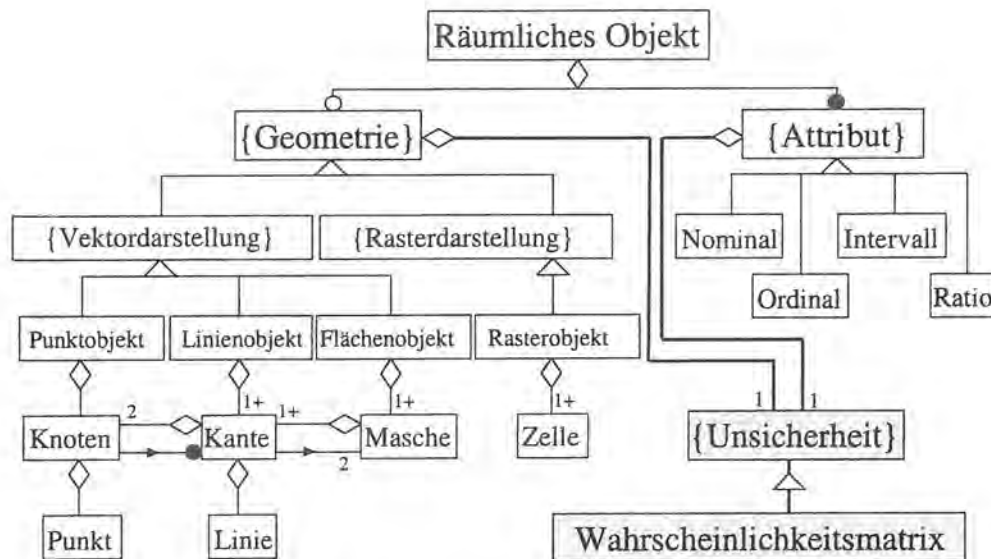


Abbildung 8: Hybrides Datenmodell mit Unsicherheitsmodellierung

3.2 Modellierung der Datenunsicherheit in einer hybriden Systemumgebung

Raster- und Vektordaten enthalten beide jeweils Anteile zur Geometrie und zur Thematik. Damit wirken prinzipiell auf beide Datenarten Einflüsse zur geometrischen und thematischen Unsicherheit ein. Dies führt dazu, daß im hybriden Datenmodell Beschreibungen zur Unsicherheit der beiden Komponenten, Geometrie und Thematik, unabhängig von der Datenart eingefügt werden müssen. Untersucht man die Annahmen, die zur Erfassung der Daten getroffen werden, so ergibt sich hier eine vereinfachte Situation. Generell gilt bei der Erfassung das Prinzip, daß eine der beiden Komponenten als fest, die andere als variabel angenommen wird (Chrisman, 1991). Die jeweils variable Komponente ist dann zu messen. Vektordaten entstehen, indem zu vorgegebenen Attributwerten die Ausdehnung dieser Attribute erfaßt wird. Rasterdaten geben dagegen eine fest definierte Form der Geometrie vor (nämlich die Vektorform), so daß die entsprechenden Attributwerte zu jeder Zelle zu bestimmen sind. Da feste Werte keine Unsicherheiten beinhalten, müssen nur jeweils die Unsicherheiten in der gemessenen Komponente berücksichtigt werden. Für Rasterdaten ist somit die Unsicherheit der Thematik, für Vektordaten die Unsicherheit der Geometrie zu modellieren. Entsprechende Erweiterungen sind dem hybriden Datenmodell beizufügen.

Die Unsicherheit der Geometrie wird innerhalb dieser Arbeit durch die Varianz der Liniengeometrie ausgedrückt, die einfach in Wahrscheinlichkeitswerte umgewandelt werden kann. Wahrscheinlichkeiten bewerten die Zugehörigkeit von beliebigen Positionen zum Objekt und können in Form von Wahrscheinlichkeitsmatrizen strukturiert werden. Mit der Umrechnung der Wahrscheinlichkeiten in diskrete Grauwerte läßt sich die enthaltene Variation besonders anschaulich visualisieren.

Der Parameter für die Unsicherheit der behandelten diskreten Attributwerte ist die Wahrscheinlichkeit des Zutreffens des Wertes. Jedem Wert ist eine Wahrscheinlichkeit beizufügen. Da nur Rasterdaten von der thematischen Unsicherheit beeinflußt werden, können die Wahrscheinlichkeitswerte wiederum in Matrizenform (passend zum Raster) strukturiert werden.

Durch die Nutzung von Wahrscheinlichkeiten ist ein gemeinsamer Parameter definiert, der sowohl die Unsicherheit von Vektor- als auch von Rasterdaten beschreibt. In beiden Fällen können Wahrscheinlichkeitsmatrizen zur Strukturierung eingesetzt werden. Es bietet sich somit an, diesen Parameter zur Beschreibung der Unsicherheit einzusetzen. Eine diesbezügliche Erweiterung des vorgestellten hybriden Datenmodells (Fritsch et al., 1998) ist ebenfalls in Abbildung 8 enthalten.

Die Nutzung desselben Parameters weist einige wichtige Vorteile auf. Die Erweiterung des hybriden Datenmodells läßt sich deutlich vereinfachen, da identische Konzepte innerhalb der Geometrie- und Thematikkomponente einzusetzen sind. Zusätzlich können gleiche Methoden zur Verwaltung, Bearbeitung und Visualisierung genutzt werden. Dies wirkt sich besonders positiv auf den Aufwand bei der Implementierung des Modells aus. Ein weiterer Vorteil ergibt sich erst im Zusammenhang mit der in Abschnitt 4.1 diskutierten Vektor-Raster- und Raster-Vektor-Konversion. Die ebenfalls notwendige Konversion der Unsicherheiten wird durch die Nutzung des gleichen Parameters mit Hilfe einer einfachen Übertragung der Wahrscheinlichkeitsmatrizen realisiert. Dabei werden keine weiteren Berechnungen notwendig.

4 Anwendungen

Nachdem zunächst auf Modellbildung und Verwaltungsaspekte eingegangen wurde, soll in diesem Abschnitt der Einfluß der Unsicherheit auf verschiedene Funktionen eines GIS diskutiert werden. Dazu werden beispielhaft einige wichtige Grundfunktionen eines hybriden Systems ausgewählt.

4.1 Konversionen zwischen Vektor- und Rasterdaten

Zwei wichtige Komponenten innerhalb der hybriden Datenverarbeitung stellen die Vektor-Raster-Konversion und die Raster-Vektor-Konversion dar. Sie ermöglichen es, Daten vom einen in das andere Format zu transformieren. Dies hat den Vorteil, daß Daten, die in verschiedenen Formaten vorliegen, in eine einheitliche Beschreibung umgeformt werden können. Nur so lassen sich die in einem GIS bereitgehaltenen Analysemethoden auch weiterhin nutzen, da sie im allgemeinen das Vorliegen der Daten in einem bestimmten Format voraussetzen und speziell dafür konzipiert wurden (z. B. ist die Flächenberechnung im Vektor-GIS nur mit Vektordaten ausführbar). Ein weiterer Vorteil ist, daß der Nutzer die Operationen, die er auf seine Daten anwenden möchte, unabhängig von dem benötigten Format wählen kann. Somit ist er in der Lage, die am besten geeignete Methode für sein Problem auszusuchen und zu nutzen. Ein Beispiel, das diesen Vorteil verdeutlicht, ist die geometrische Verschneidung. Bei Anwendung der Verschneidung im Rasterbereich ergibt sich ein einfach durchzuführender Prozeß, bei dem nur die entsprechenden Rasterzellen überlagert werden müssen. Im Gegensatz dazu benötigt die Lösung im Vektorbereich aufwendige geometrische Berechnungen, um ein identisches Ergebnis zu erzielen. Netzwerkanalysen sind dagegen ein Bereich, in dem die Vektordatenverarbeitung Vorteile besitzt.

Die Konversion ist, je nachdem in welcher Richtung sie erfolgen soll, unterschiedlich schwierig durchzuführen. Die Erzeugung von Raster- aus Vektordaten (Vektor-Raster-Konversion) stellt sich als der einfachere Prozeß dar, da sie in einem Schritt ablaufen kann. In der Praxis wird diese Form der Konversion recht häufig eingesetzt. Zum Beispiel verfügt jedes Raster-GIS standardmäßig über eine solche Möglichkeit, die als wichtige Eingabeschnittstelle genutzt wird. Desweiteren hält im Prinzip jede Graphikkarte eines Computers eine solche Funktionalität bereit. Fast alle Bildschirme basieren heutzutage auf Rastertechniken, während in den Anwendungsprogrammen die graphischen Darstellungen meistens in vektorieller Art gegeben

werden (siehe auch graphische Standards wie z. B. Phigs). Aus diesem Grund ist hier eine schnelle Konversion einzusetzen.

Demgegenüber bereitet die umgekehrte Richtung von Raster- zu Vektordaten (Raster-Vektor-Konversion) mehr Probleme. Sie kann nur als mehrstufiger Prozeß ausgeführt werden, der oftmals mehrdeutige Lösungen erzeugt. Die Eindeutigkeit muß dann anhand von Parametereinstellungen problemspezifisch hergestellt werden. Dazu sind Expertenwissen und interaktive Eingriffe notwendig, die einer Automatisierung des Ablaufes im Wege stehen. Deshalb ist es nicht verwunderlich, daß bisher noch kein allgemeingültiger Algorithmus entwickelt wurde, der wie für die Vektor-Raster-Konversion stets zuverlässige Ergebnisse liefert. Vielmehr gibt es eine Reihe problemorientierter Ansätze, die entsprechend nur im jeweiligen Anwendungsumfeld optimierte Lösungen erzielen.

4.1.1 Vektor-Raster-Konversion

Da es sich bei der Konversion von Vektor nach Raster um einen häufig benutzten Weg handelt, existieren auch zahlreiche Algorithmen zur Lösung des Problems. Sie weisen zumeist deutliche Ähnlichkeiten auf und liefern im allgemeinen identische Ergebnisse. Einer der bekanntesten ist der Bresenham-Algorithmus (Jäger, 1990). Er transformiert nach Festlegung der Rastergröße zuerst Anfangs- und Endpunkt einer Linie in das Raster und schreitet danach zeilenweise voran und bestimmt zu jeder Zeile, welche Spalte von der Linie durchquert wird. Das entsprechende Pixel zählt zu den gesuchten Linienpixeln. Alle Linienpixel zusammen definieren die gesuchte Rastergeometrie der Linie. Die beschriebene Standardaufgabe für eine Linie vereinfacht sich, wenn ein punktförmiges Objekt konvertiert werden soll (entsprechend nur Übertragung eines Punktes ins Raster). Bei flächenförmigen Objekten müssen zuerst alle Begrenzungslinien einzeln konvertiert werden. In einem weiteren Schritt ist dann das entstandene Randpolygon auszufüllen. Diese Aufgabe kann z. B. dadurch realisiert werden, daß für jedes Pixel einzeln geprüft wird, ob es sich innerhalb des Vektorpolygons befindet (bekanntes Punkt-im-Polygon-Problem im Vektorbereich).

4.1.2 Raster-Vektor-Konversion

Die einfachste Lösung zur Raster-Vektor-Konversion ergibt sich, wenn man jedes Pixel gesondert betrachtet und einzeln in die Vektorgeometrie umwandelt. Dabei wird die Ausdehnung der Rasterzelle durch Umringslinien beschrieben (z. B. ein quadratisches Pixel durch vier Kanten des Quadrats). Dadurch entsteht aus jeder Rasterzelle ein flächenförmiges Objekt mit Vektorgeometrie. Zusätzlich lassen sich in einem weiteren Schritt Nachbarobjekte mit gleichen Attributen zu größeren Aggregaten zusammenfassen. Dieser einfache Ansatz ist allgemein einzusetzen und wurde vielfach als Funktion in bestehende GIS-Produkte implementiert. Er bietet aber nur eine eingeschränkte Einsatzmöglichkeit. So ist es damit nicht möglich, zwischen punkt-, linien- und flächenförmigen Objekten zu unterscheiden und entsprechend eine angepaßte Lösung zu erzeugen.

Welcher Typ aus der Konversion erhalten werden soll, ist meist durch die jeweilige Anwendung festgelegt. Wichtigste Einflußfaktoren für die Wahl sind zum einen das Verhältnis des Maßstabsbereiches zur Größe und zum anderen die Bedeutung der Objekte. Die getroffene Festlegung gilt zumeist für alle Objekte einer Objektart und wird innerhalb des thematischen Datenmodells gespeichert. Da alle drei Typen in gleichem Maße in Anwendungen vertreten sein können, muß auch jeweils eine typspezifische Transformation bereitgehalten werden. Die Raster-Punkt-Konversion entspricht einer einfachen Schwerpunktbildung der Rasterobjektfläche. Dagegen gestaltet sich die Raster-Linien-Konversion bedeutend aufwendiger. Sie kann in die Teilschritte Distanztransformation, Skelettierung, Linienextraktion und Linienglättung unterteilt werden (Cramer, 1993). Darauf aufbauend lassen sich auch Flächen erzeugen, indem

das Linienvorhanden für den Rand der Rasterobjektfläche durchgeführt wird. Beispiele für Konversionen von verschiedenen Objekttypen zeigt die Abbildung 9.

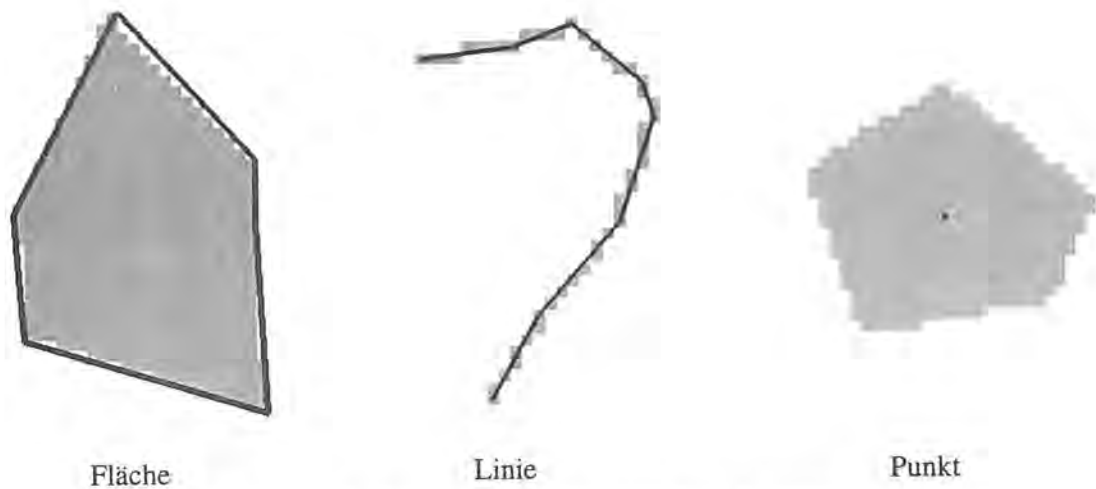


Abbildung 9: Beispiele zur Raster-Vektor-Konversion

4.1.3 Qualität der Konversionen

Die Geometrie und damit die Ausdehnung eines Objektes wird durch die Konversion unweigerlich verändert. Deshalb stellt sich die Frage nach der Qualität (Genauigkeit) der Konversion. Ziel ist ein Verfahren, das verlustfreie Konversionen ermöglicht, so daß diese als Hintergrundoperationen ohne direkte Einflußnahme des Anwenders ablaufen können. Innerhalb der Vektor-Raster-Konversion wird die Qualität durch die Festlegung der Rastergröße (Auflösung) beeinflusst. Je kleiner die Rastergröße ist, desto genauer kann die Übertragung ins Raster erfolgen. Einzelne formelmäßige Abschätzungen werden hierzu in Burrough (1986) gegeben. Sie gelten aber nur für die Fälle, in denen die Geometrie als fest (sicher) angenommen wird. Betrachtet man zusätzlich die mit der Geometrie verbundene Unsicherheit, dann sollte die Rastergröße kleiner als die Genauigkeit der Liniengeometrie sein. Damit wird erreicht, daß der zusätzliche Einfluß gegenüber der bestehenden Unsicherheit der Geometrie eine untergeordnete Rolle spielt und damit vernachlässigt werden kann. Dies läßt sich erreichen, indem die Rastergröße identisch zur Rastergröße der Wahrscheinlichkeitsmatrix gewählt wird. Wie schon in Abschnitt 2.1 beschrieben, ist dort die Auflösung ein Vielfaches geringer als die Standardabweichung σ der Liniengeometrie. Die identische Wahl der Rastergröße in der Wahrscheinlichkeitsmatrix und der Rastergeometrie hat nebenbei den Vorteil, daß sofort jedem Objektpixel genau ein Wahrscheinlichkeitswert aus der Wahrscheinlichkeitsmatrix zugeordnet werden kann. Das hybride Datenmodell fordert eine solche Zuordnung, die nun direkt ohne zusätzlichen Aufwand erzielt wird (vgl. Abschnitt 4.1.4). Da die Festlegung der Rastergröße für die Wahrscheinlichkeitswerte schon bei der Erfassung der Objekte (in Abhängigkeit der Liniengenauigkeit) erfolgt, liegt somit auch die Rastergröße bereits vor der Konversion fest. Dadurch kann die Vektor-Raster-Konversion vollständig automatisiert ablaufen.

Einflußgröße bei der Raster-Vektor-Konversion auf die Qualität der erzielten Vektorgeometrie ist der Faktor der Glättung. Hierbei gilt, je kleiner der Schrankenwert, desto genauer wird die Rastergeometrie in die Vektorgeometrie übertragen. Betrachtet man in diesem Zusammenhang wiederum die Unsicherheit, die diesmal in den Attributen vorliegt, so wird die Ausdehnung des Vektorobjekts stark von der Genauigkeit des für die Konversion verantwortlichen Attributes abhängen. Ist nun der Glättungsfaktor klein im Vergleich zur Unsicherheit in den Attributen, so

kann sein Einfluß auf die Genauigkeit der Geometrie vernachlässigt werden. Der hierfür gewählte Wert orientiert sich an der Rastergröße r . Um das aufgrund der Diskretisierung entstandene treppenförmige Erscheinungsbild von Linien zu beseitigen, wird der Glättungsfaktor zu $f = \sqrt{2}/2 \cdot r$ festgelegt. Die maximal mögliche Variationsbreite der Geometrie beträgt dann $\sqrt{2} \cdot r$. Im Normalfall ist die Variation aufgrund der Attributunsicherheit um ein Vielfaches höher (meist mehrere Rasterzellen), so daß die Glättung keinen wesentlichen Beitrag zur Unsicherheit darstellt. Die Speicherung der Unsicherheit bleibt durch Übertragung der Wahrscheinlichkeitsmatrix voll erhalten.

4.1.4 Konversion der Unsicherheit

Die gegenseitige Konversion in die jeweilige andere Datenart bewirkt innerhalb einer hybriden Systemumgebung den Wechsel in der geometrischen Darstellungsart. Nachdem die Geometrie eines Rasterobjekts als fest und damit frei von Unsicherheiten definiert wurde, die Geometrie eines Vektorobjekts aber Unsicherheiten beinhaltet (vgl. Abschnitt 2, Abschnitt 3.2), ist mit der Konversion der Darstellungsart auch immer eine Konversion der Unsicherheit verbunden. Wie diese Konversion zu erfolgen hat, ist in den Eigenheiten der beiden Datenarten begründet.

Betrachtet man ein Vektorobjekt, dann stellt seine Ausdehnung die variable Komponente dar, während die Attribute als fest und über den gesamten Bereich als sicher gelten. Man kann also behaupten, daß überall dort wo man sich innerhalb des Objektes befindet, die Attribute sicher anzutreffen sind. Durch die Variation in der Geometrie ist aber gleichzeitig auch die Aussage, daß man sich innerhalb des Objektes befindet, unsicher. Diese Unsicherheit läßt sich nun auf die sichere Gültigkeit der Attribute übertragen. Wenn man sich in manchen Bereichen (in den Randbereichen) nur unsicher innerhalb des Objektes befindet, dann können in diesen Bereichen die mit dem Objekt verbundenen Attribute auch nur unsicher zutreffen. Damit gilt die Behauptung, daß an einer festen Stelle die Attribute unsicher festgelegt sind. Dieser Wechsel in der Aussage von der Unsicherheit in der Geometrie zur Aussage von der Unsicherheit in den Attributen findet genau innerhalb der Vektor-Raster-Konversion statt. Dort werden eine Reihe von festen Stellen (Rasterzellen) definiert, für die jeweils nun die Aussage, inwieweit die Attribute zutreffen, quantitativ bewertet werden muß. Die Variabilität in der Geometrie wird damit in eine Variabilität der Thematik umgewandelt. Entsprechend werden die Unsicherheiten in der geometrischen Beschreibung in Unsicherheiten der Thematik transformiert. Da sich nur die zugehörige Interpretation ändert, bleiben die Größenwerte (Wahrscheinlichkeiten) unverändert erhalten (Abbildung 10). Der gleiche Umstand trifft auch für die Konversion vom Raster- in den Vektorbereich zu. In einem Rasterobjekt ist für eine sichere Objektgeometrie das Zutreffen der jeweiligen Attributwerte unsicher. Soll nun ein Attribut als sicher vorausgesetzt und dafür die Ausdehnung des Objektes bestimmt werden (dies entspricht dem Ansatz der Raster-Vektor-Konversion), dann ist für jedes Pixel unsicher, ob es weiterhin zum Objekt hinzugezählt werden soll. Die Ausdehnung und damit die Geometrie werden unsicher.

Basierend auf den erläuterten Erkenntnissen definiert sich die Konversion der Unsicherheit innerhalb der Vektor-Raster-Konversion durch eine einfache Übertragung der Wahrscheinlichkeitsmatrizen von der Qualitätsmodellierung der Geometrie auf die Qualitätsmodellierung der einzelnen Attribute und umgekehrt im Falle der Raster-Vektor-Konversion. Damit verbunden ist ein Wechsel in der Interpretation der Wahrscheinlichkeiten.

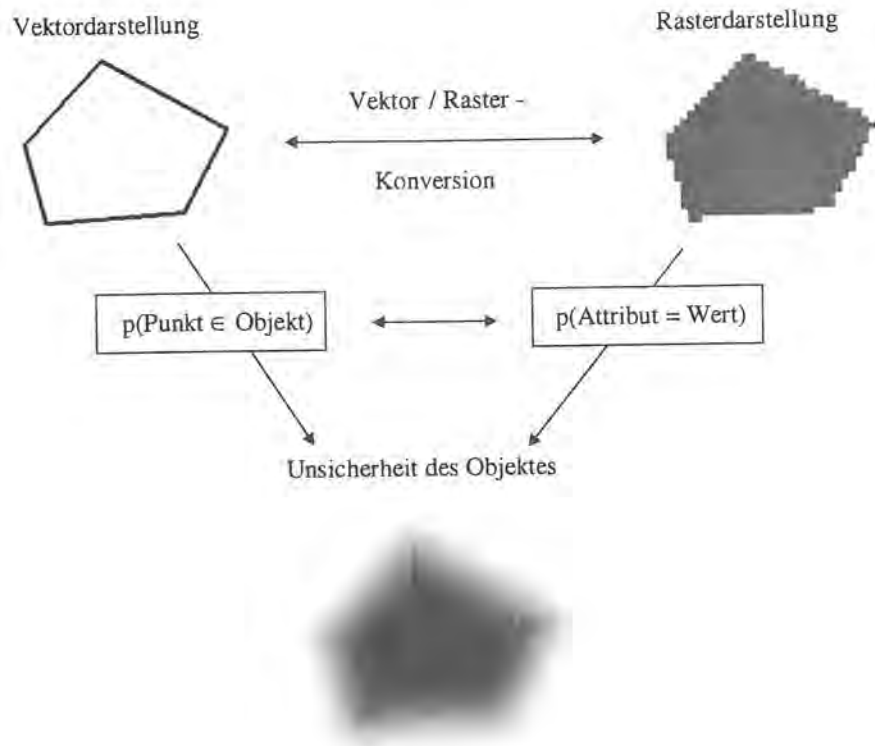


Abbildung 10: Vorgänge bei der Vektor-Raster- und der Raster-Vektor-Konversion

4.2 Verschneidungsanalyse

Die Verschneidung zweier Objektmengen gehört zu den häufig angewendeten Analysemethoden eines GIS. Die Aufgabe ist im Vektorbereich aufgrund geometrischer Schnittbildungen nur aufwendig zu realisieren. Die Rasterstruktur, die bereits geometrische Basiszellen vorgibt, ist hier im Vorteil. Die Verschneidung besteht aus einer logischen Verknüpfung von überlagerten Zellen. Der Vorteil läßt sich in einem hybriden System so ausnutzen, daß die Verschneidungsmethode nur für Rasterdaten implementiert ist. Deshalb sind vorab alle beteiligten Objekte (sofern notwendig) in eine Rasterrepräsentation umzuformen.

Als Ergebnis der Verschneidung entstehen neue Objekte, die die Eigenschaften der Ursprungsobjekte aufweisen. Die Verknüpfung der Eigenschaften erfordert, daß die Unsicherheiten der einzelnen Eigenschaften zusammenzuführen sind, so daß sich die Unsicherheit des gemeinsamen Auftretens ausdrücken läßt. Dieser Vorgang entspricht einer Fortpflanzung der Unsicherheiten auf das Ergebnisobjekt. Durch den Zusammenhang der Verschneidung mit der logischen UND-Operation kann die Fortpflanzung durch die entsprechende Formel aus der Wahrscheinlichkeitstheorie:

$$p(A_1 \cap A_2) = p(A_1) \cdot p(A_2)$$

definiert werden (Shi, 1994). Mit $p(A_1)$ bzw. $p(A_2)$ werden die Wahrscheinlichkeiten, daß eine Rasterzelle die jeweiligen Attribute aufweist, bezeichnet. Einschränkend wird hierbei vorausgesetzt, daß die beiden Thematiken unabhängig voneinander sind. Durch Erweiterung der Verschneidungsmethode um die Fortpflanzung der Unsicherheit können automatisch zu allen neuen Objekten wieder Wahrscheinlichkeitsmatrizen berechnet werden, so daß diese für weiterführende Zwecke in gleicher Weise im System zu benutzen sind.

Abbildung 11 verdeutlicht die Verschneidung an einem Beispiel. Ein flächenhaftes Objekt (Stadtgebiet) und ein linienhaftes Objekt (Stromleitung) werden miteinander verschnitten

(Abbildung 11a). Sie besitzen unterschiedliche geometrische Genauigkeiten, wie aus den visualisierten Wahrscheinlichkeitsmatrizen ersichtlich ist (Abbildung 11b). Das Ergebnis der Verschneidung (Abbildung 11c) zeigt, daß nur ein kleiner Teil der Leitung über das Stadtgebiet führt. Dies entspricht dem traditionellen Ergebnis der Verschneidung. Durch die Fortpflanzung der Unsicherheit wird das Ergebnis um die Wahrscheinlichkeitsmatrix ergänzt, die als Hintergrund in Abbildung 11c visualisiert ist. Daraus läßt sich ableiten, daß weitere Regionen existieren, in denen ein Schnitt wahrscheinlich ist. Durch die Angabe einer Mindestwahrscheinlichkeit (hier: $p=0.25$) läßt sich die Objektgeometrie an ein gewähltes Vertrauensniveau anpassen. Im Gegensatz zu der ursprünglich kleinen Schnittlinie entstehen dadurch eine Reihe von Bereichen, innerhalb denen die Stromleitung das Stadtgebiet passieren kann (Abbildung 11d).

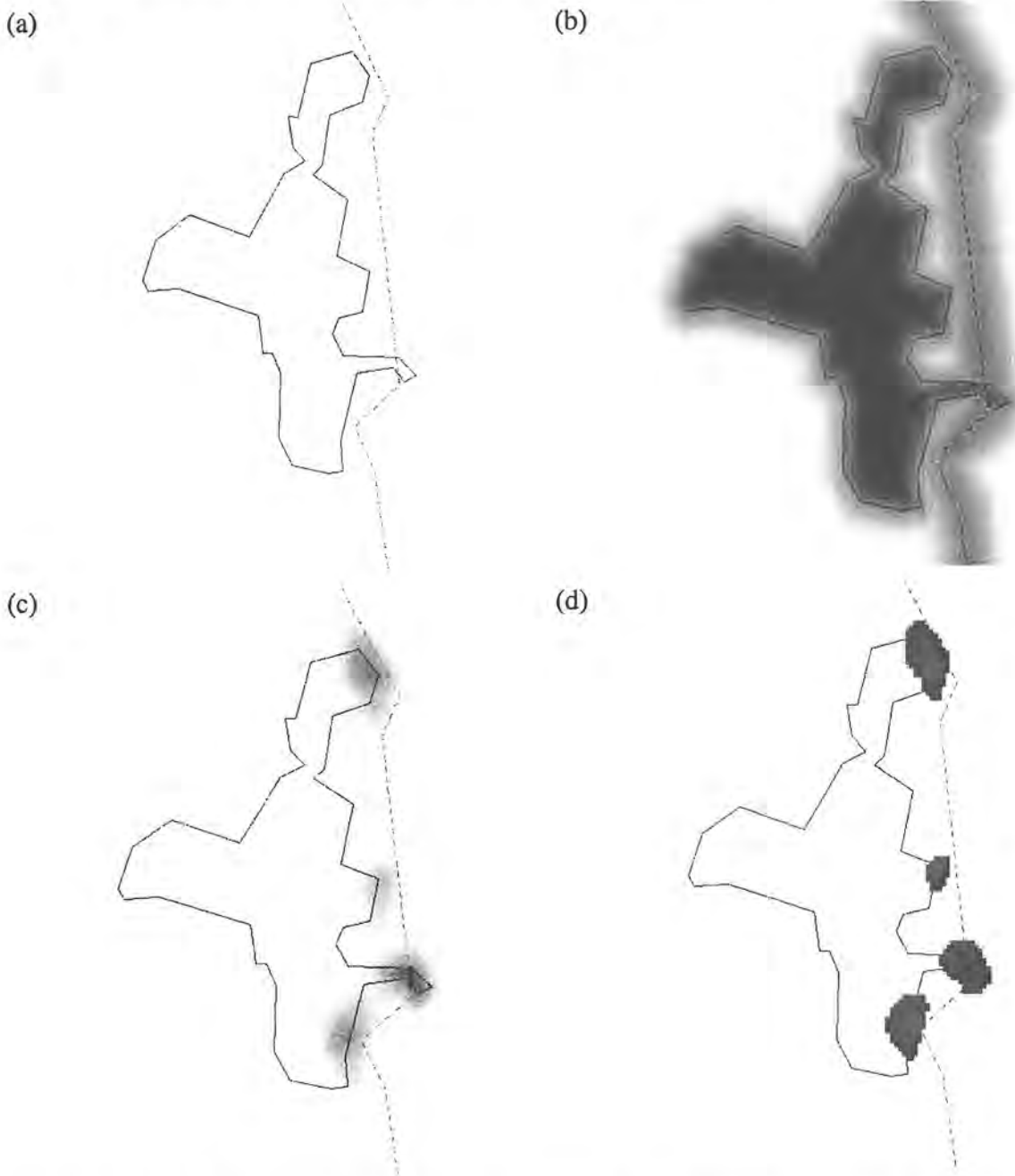


Abbildung 11: Verschneidung zweier Objekte (a), deren Unsicherheit (b), Ergebnisobjekt mit Unsicherheit (c) und Objektgeometrie für $p=0.25$ (d)

5 Ausblick

Die Berücksichtigung der Genauigkeit in einer hybriden Systemumgebung hat wesentlichen Einfluß auf die Funktionsweise und das Erscheinungsbild bisheriger Analysemethoden. Eingangswahrscheinlichkeiten sind mit Hilfe zu definierender formelmäßiger Zusammenhänge auf das Ergebnis fortzupflanzen. Dazu ist es erforderlich, alle Daten mit Genauigkeitsangaben zu versehen. Beim Datenaustausch ist darauf zu achten, daß mit den Daten auch die Genauigkeiten übertragen werden. Nur so läßt sich die steigende Verfügbarkeit an Daten auch zum Vorteil des Anwenders ausnutzen. Die Auswirkung der hybriden Datenmodellierung mit Berücksichtigung der Genauigkeit wurde im Beitrag anhand von zwei Anwendungen diskutiert. Es genügt jedoch nicht, sich auf ausgewählte Methoden zu beschränken, sondern alle vorhandenen Analysen sind so zu modifizieren, daß sie Genauigkeit mitprozessieren können. Das Ziel ist, daß als Ergebnis eines jeden Verarbeitungsschrittes nicht nur die Daten selbst stehen, sondern immer eine Aussage über deren Genauigkeit mitgeliefert wird.

6 Literatur

- Bill, R., Fritsch, D. (1991): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1: Hardware, Software und Daten. Wichmann, Karlsruhe.
- Burrough, P. A. (1986): Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford.
- Caspary, W. (1992): Genauigkeit als Qualitätsmerkmal digitaler Datenbestände. In: Grünreich, D., Buziek, G. (Hrsg.): Gewinnung von Basisdaten für Geo-Informationssysteme. DVW-Schriftenreihe, Heft 4, 157-166.
- Caspary, W., Scheuring, R. (1992): Error-bands as Measures of Geometrical Accuracy. EGIS '92, Vol. 1, 226-233.
- Chrisman, N. R. (1991): The Error Component in Spatial Data. In: Maguire, D., Goodchild, M., Rhind, D. (Eds.): Geographical Information Systems – Principles and Applications. Longman Scientific & Technical, 165-174.
- Congalton, R. G. (1991): A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. Remote Sensing of the Environment, Vol. 37, 35-46.
- Cramer, M. (1993): Implementation von Raster-Vektor-Konvertierungsbausteinen als Basis für eine GIS-Teachware. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart (unveröffentlicht).
- Drummond, J. (1995): Positional Accuracy. In: Guptill, S., Morrison, J. (Eds.): Elements of Spatial Data Quality. Pergamon Press.
- Ehlers, M., Edwards, G., Bedard, Y. (1989): Integration of Remote Sensing with Geographic Information Systems: A Necessary Evolution. PE&RS, Vol. 11, No. 11, 1619-1627.
- Fritsch, D. (1988): Hybride Graphische Systeme – eine neue Generation von raumbezogenen Informationssystemen. GIS, Vol. 1, Heft 1, 12-19.
- Fritsch, D., Anders, K.-H. (1996): Objektorientierte Konzepte in Geo-Informationssystemen. GIS, Vol. 9, Heft 2, 2-14.
- Fritsch, D., Glemser, M., Klein, U., Sester, M., Strunz, G. (1998): Zur Integration von Unsicherheit bei Vektor- und Rasterdaten. GIS, Vol. 11, Heft 4, 26-35.
- Glemser, M. (1994): Behandlung der Genauigkeit räumlicher Daten in Geo-Informationssystemen. In: Die benutzte Erde, Alfred-Wegener-Stiftung (Hrsg.). Ernst&Sohn, Berlin.

- Glemser, M. (1996): Integration geometrischer Datenqualität in GIS-Funktionen. In: Proceedings Workshop Datenqualität und Metainformation in Geo-Informationssystemen, Universität Rostock.
- Jäger, E. (1990): Untersuchungen zur kartographischen Symbolisierung und Verdrängung im Rasterdatenformat. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen, Universität Hannover, Nr. 167.
- Kraus, K., Haussteiner, K. (1993): Visualisierung der Genauigkeit geometrischer Daten. GIS, Vol. 6, Heft 3, 7-12.
- McKee, L., Kuhn, W. (1997): The OpenGIS Consortium's Purpose and Technical Approach. In: Fritsch D., Hobbie, D. (Eds.): Photogrammetric Week '97, Wichmann, Heidelberg.
- Molenaar, M., Fritsch, D. (1991): Combined Data Structures for Vector and Raster Representations in Geographic Information Systems. GIS, Vol. 4, Heft 3, 26-32.
- OpenGIS (1999): Web Site of the OpenGIS Consortium, <http://www.opengis.org>.
- Richards, J. A. (1993): Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer-Verlag.
- Rumbaugh, J., Blaha, M., Premerlani, W., Eddy, F., Lorensen, W. (1991): Object-Oriented Modelling and Design. Prentice Hall.
- Shi, W. (1994): Modelling Positional and Thematic Uncertainties in Geographic Information Systems. ITC Publication, No. 22, Enschede.
- Stehman, S. V. (1997): Selecting and Interpreting Measures of Thematic Classification Accuracy. Remote Sensing of the Environment, Vol. 62, 77-89.

Untersuchungen zu den Fortpflanzungseigenschaften der geometrischen Genauigkeit bei der Flächenverschneidung

Michael Glemser, Christian Henneberg
Institut für Photogrammetrie
Universität Stuttgart

1 Einführung

Flächenverschneidung (Polygon Overlay) ist eine der bekanntesten Analysemethoden in Geoinformationssystemen (GIS). Sie zählt zu den grundlegenden Basisoperatoren und wird nahezu von allen verfügbaren Systemen bereitgestellt. Im allgemeinen Fall werden dabei zwei sich überlagernde Objekte geometrisch miteinander verschnitten und dadurch ein neues Objekt (Schnittobjekt) gebildet. An der Schnittbildung sind die geometrischen Repräsentationen der Objekte beteiligt. Im Falle der hier behandelten Vektordaten hat sich die Randdarstellung als geometrisches Modell etabliert. Der Rand als räumliche Abgrenzung von der Umgebung wird dabei durch geometrische Primitive (Punkte, Linien, Flächen) definiert. Die eingesetzten Primitive besitzen stets eine um eine Stufe geringere Dimensionalität. Z.B. wird ein flächenhaftes Objekt (2-dimensional) durch seine umgebenden Linien (1-dimensional) abgegrenzt. Bei der Verschneidung werden dann alle möglichen geometrischen Schnitte der Primitive gebildet und anschließend eine neue Randbeschreibung der überlagerten Teile zusammengefügt. Z.B. entsteht aus zwei flächenhaften Objekten im Normalfall wiederum ein flächenhaftes Objekt, das sich aus Teilflächen und Teilen der Randlinien der Eingangsobjekte zusammensetzt.

Ein wichtiger Aspekt bei der Interpretation des Ergebnisses der Flächenverschneidung ist, daß die Daten aller Objekte nur eine begrenzte Genauigkeit aufweisen (z.B. Caspary, 1992a). Dies gilt im besonderen auch für die Geometrie, die bei der Flächenverschneidung die zentrale Rolle spielt. Werden die geometrischen Informationen z.B. aus bestehenden Karten mittels Digitalisierung erfaßt, dann bewirken verschiedene Einflüsse (z.B. Geräte, Operateur, Vorlage), daß die gemessenen Koordinaten eine Variation beinhalten. Bei Durchführung von Wiederholungsmessungen würden stets andere Ergebnisse erzielt werden. Die Variation der Koordinatenwerte als eine Art Streuung verdeutlicht, wie sich die *geometrische Genauigkeit* auf Objekte auswirkt. Die Beschreibung der Genauigkeit gelingt mit Hilfe eines stochastischen Ansatzes. Koordinaten z.B. werden in diesem Ansatz als Zufallsvariablen aufgefaßt und einzeln durch Mittelwert und Varianz beschrieben. Funktionale Abhängigkeiten zwischen den Variablen lassen sich durch Kovarianzen ausdrücken. Der Ansatz wird in gleicher Weise wie für Koordinaten auf alle geometrischen Primitive angewendet. Z.B. für Flächen sind dazu alle zugehörigen Randlinien als einzelne Zufallsvariablen einzuführen und mit Varianzen zu versehen.

Nachdem man die Basisdaten mit ihrer Genauigkeit vorliegen hat, stellt sich die Frage nach der Verarbeitung und Berücksichtigung innerhalb von Analysen. Im speziellen auf die hier untersuchte Aufgabe der Flächenverschneidung angewendet, ist folgendes für den Nutzer von Interesse: *Wie genau ist das Ergebnis bei einer Flächenverschneidung?* Die Beantwortung gelingt nur, wenn die vorhandene Genauigkeit der Eingangsdaten auf das Ergebnis übertragen wird. Dieser Vorgang wird im allgemeinen als Fortpflanzung der Genauigkeit oder Fehlerfortpflanzung bezeichnet. Aus der Fortpflanzung erhält man wiederum eine Angabe zur Vari-

anz der Ränder, so daß eine äquivalente Darstellung der Genauigkeit zu den Eingangsdaten auch für das Ergebnis vorliegt. Mit Hilfe dieser Angabe wird der Nutzer in die Lage versetzt, eine Bewertung der Güte des Ergebnisses durchzuführen.

Das Problem der Fortpflanzung wird im Bereich der Geodäsie durch die Ausnutzung des funktionalen Zusammenhangs f zwischen Eingangswerten x und Ergebnis y gelöst. Die Fortpflanzung ist dann durch das *allgemeine Fehlerfortpflanzungsgesetz* definiert (z.B. Höpke, 1980):

$$D(y) = A D(x) A^T$$

mit

$$y = f(x) = Ax$$

$D(x)$ bzw. $D(y)$ sind die Dispersionsmatrizen der Werte x bzw. y und halten auf der Hauptdiagonalen deren Varianzen und auf den Nebendiagonalen die jeweiligen Kovarianzen. Dabei wird ein linearer bzw. linearisierter Zusammenhang ($y = Ax$) vorausgesetzt.

Problem bei der Flächenverschneidung ist, daß der geforderte funktionale Zusammenhang nur in komplexer Form und stets individuell für den jeweils konkret vorliegenden Fall formuliert werden kann. Daher kommt die Anwendung des allgemeinen Fehlerfortpflanzungsgesetzes nicht in Frage. Aus diesem Grund wird hier auf *Simulationen* übergegangen, um Aussagen zur Genauigkeit abzuleiten. Diese Simulationen stützen sich auf die zufällige Erzeugung von großen Mengen an Eingangsdatensätzen, für die dann jeweils die anzuwendende Operation (hier: Flächenverschneidung) durchgeführt wird. Es entsteht wiederum eine große Lösungsmenge, die mit Hilfe der mathematischen Statistik ausgewertet werden kann.

Ziel der vorliegenden Untersuchungen ist es, Aussagen zum Fortpflanzungsverhalten von unterschiedlichen Eingangsdaten bei der Flächenverschneidung mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen zu treffen. Im einzelnen werden dazu die folgenden Bestimmungen durchgeführt:

- Wahrscheinlichkeit des Schnitts,
- Wahrscheinlichkeit der Objektzugehörigkeit eines beliebigen Punktes zum Schnittobjekt,
- Wahrscheinlichste Geometrie des Schnittobjektes und Verschiebungsbetrag zur traditionellen Lösung

Zum Einsatz kommen jeweils nur synthetisch erzeugte Datensätze, die speziell die Aufdeckung von wesentlichen Eigenschaften erleichtern sollen.

Die notwendigen programmtechnischen Umsetzungen wurden auf Basis des GIS-Paketes MapInfo mit Hilfe der Programmierschnittstelle MapBasic ausgeführt. Zur graphischen Aufbereitung der statistischen Ergebnisse kann das Modul Xprism des Graphikpaketes Khorus und das Microsoft-Programm Excel zum Einsatz.

2 Verschneidung

Die Verschneidung dient dazu, neue Objekte geometrisch aus sich überlappenden Objekten zu bilden (Abb. 1). Nach der Verschneidung erhalten die neuen Objekte die thematischen Eigen-

schaften der Eingangsobjekte übertragen. Es soll beispielsweise geklärt werden, welcher Bodentyp auf welchen Teilen eines Flurstückes anzutreffen ist. Alle Bodenobjekte und das betreffende Flurstück bilden die Eingangsobjekte. Ergebnisobjekte sind die einzelnen Teile des Flurstücks, die jeweils einen anderen Bodentyp aufweisen.

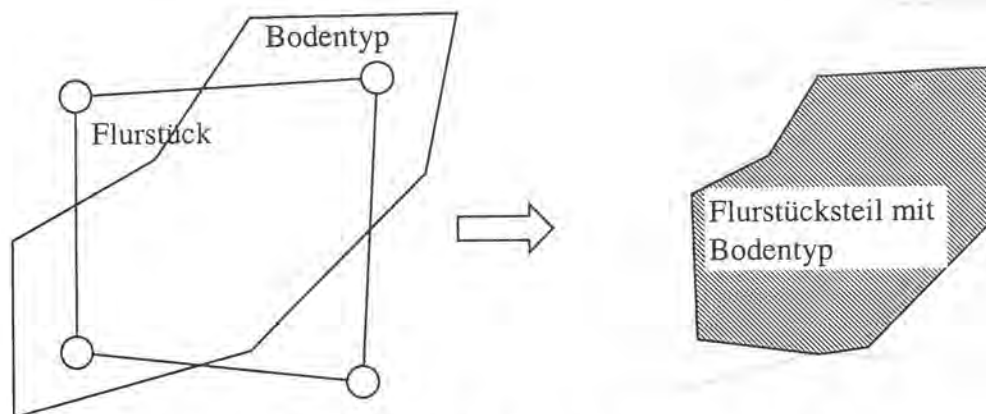


Abb. 1: Beispiel zur Flächenverschneidung

Betrachtet man Objekte als Punktmengen, dann läßt sich die Verschneidung in mengentheoretischer Form als logische Operation formulieren. Dabei können durchaus verschiedene logische Operatoren (Durchschnitt, Vereinigung, Differenz) angewendet werden. Innerhalb der Arbeit erfolgt die Einschränkung auf die Untersuchung des Durchschnitts. Die abgeleiteten Erkenntnisse lassen sich aber in einfacher Form auch auf andere Fälle übertragen.

Die Verschneidung hat für Vektordaten in typspezifischer Weise zu erfolgen. Folgende Fälle sind dabei zu unterscheiden:

- | | |
|--------------------|----------------------------------|
| 1. Punkt – Punkt | (→ Punkt) |
| 2. Punkt – Linie | (→ Punkt) |
| 3. Punkt – Fläche | (→ Punkt) |
| 4. Linie – Linie | (→ Punkt , Linie) |
| 5. Linie – Fläche | (→ Punkt, Linie) |
| 6. Fläche – Fläche | (→ Punkt, Linie, Fläche) |

In Klammern ist vermerkt, welcher Typ als Ergebnis in Frage kommt. Zusätzlich hervorgehoben wird jeweils der am häufigsten und damit normalerweise erzeugte Typ. Natürlich kann die Verschneidung auch leere Ergebnismenge liefern. In vielen Fällen kann die leere Menge ebenfalls ein wichtiges Ergebnis darstellen (z.B. Ausschluß des gemeinsamen Auftretens zweier kritischer Eigenschaften). In der vorliegenden Arbeit erfolgt eine Konzentration auf den Verschneidungstyp 6 (Fläche – Fläche), der als *Flächenverschneidung* bezeichnet wird. Zu beachten ist, daß der Begriff der Flächenverschneidung in der Literatur häufig mißbräuchlich als Überbegriff eingesetzt wird, nicht jedoch im Rahmen dieser Arbeit.

Die Flächenverschneidung kann algorithmisch in drei Schritt unterteilt werden (Bill, 1996):

1. *Bildung der Kantenschnitte*: Es werden Schnittpunkte der sich schneidenden Kanten ermittelt. Dabei handelt es sich um einen arbeits- und rechenintensiven Schritt, da alle vorhandenen Kanten potentielle Schnittkandidaten darstellen. Grobtests verringern den Aufwand. Als Ergebnis erhält man die kleinste gemeinsame Geometrie der Eingangsdaten, die sich in Form von Knoten- und Kantenlisten topologisch strukturieren läßt.

2. *Bilden der neuen Polygone:* Es werden die Einzelkanten zu Polygone zusammengeführt. In Abhängigkeit von der gewünschten mengentheoretischen Operation entstehen neue Objektgeometrien.
3. *Übertragen der Attribute:* Die gültigen Attribute der Eingangsobjekte werden auf die neuen Ergebnisobjekte übertragen, so daß diese die gleichen Eigenschaften aufweisen, wie die Objekte, aus denen sie gebildet wurden.

In dieser Weise wurde die Flächenverschneidung für die nachfolgenden Untersuchungen realisiert.

3 Geometrische Genauigkeit

Unter der geometrischen Genauigkeit wird im allgemeinen die Positionsgenauigkeit der benutzten geometrischen Primitive (Punkte, Linien, Flächen) verstanden. Es existieren eine Reihe von Einflüssen, die aus allen Komponenten eines GIS herrühren, die zur Entstehung der geometrischen Genauigkeit beitragen (Caspary, 1992b). Von Bedeutung für einen Anwender ist, daß alle Daten nur mit beschränkter Genauigkeit vorliegen, d.h. es wird niemals ein Datensatz anzutreffen sein, der exakt die Verhältnisse der realen Welt wiedergibt.

3.1 Genauigkeitsmodell: Stochastischer Ansatz

Es existieren eine Reihe von Modellen, die in der Lage sind, die mit der Geometrie verbundene Genauigkeit zu modellieren (Glemser, 1994). Grundlage für die vorliegenden Untersuchungen bildet ein stochastischer Genauigkeitsansatz (Glemser, 1996). Dieser eignet sich insbesondere, um die angestrebte Fortpflanzung der Genauigkeit mit Hilfe von Simulationen durchzuführen, da sich direkt zufallsbasierte Eingangsdatensätze erzeugen lassen. Zur Beschreibung der Genauigkeit stützt sich der Ansatz auf die Angabe der Parameter *Mittelwert* und *Varianz* der statistischen Verteilung der zu beschreibenden Größe. Die Größe wird dabei als Zufallsvariable angesehen. Im Falle einer Fläche sind alle Randlinien als solche Größen aufzufassen und müssen einzeln beschrieben werden. Zu jeder Linie L_i sind also ein Mittelwert μ_{L_i} und eine Varianz $\sigma_{L_i}^2$ anzugeben. Der Mittelwert ist dabei gleich der mittleren Position der Linie selbst (kurz: mittlere Geometrie). Die Varianz verdeutlicht die Variation in der Position der Linie. Für die Variation soll gelten, daß sie in jedem Linienpunkt nur senkrecht zur Richtung der Linie wirken soll. Da innerhalb eines geschlossenen Polygons Anfangs- und Endpunkte einer Linie keine herausragende Stellung besitzen, werden diese in gleicher Weise behandelt, wobei die zugelassenen Richtungen der Variation in diesen Punkten vom Brechungswinkel abhängen. Somit wird die *Zufallsvariable Linie* im eigentlichen Sinne durch die Gesamtheit aller Linienpunkte charakterisiert. Als zugehörige Verteilung wird die Normalverteilung der Linie angenommen.

4 Simulation und Testdatensätze

4.1 Simulationen und Monte-Carlo-Methode

Ganz allgemein versteht man unter dem Begriff der Simulation die Untersuchung eines Sachverhalts oder Systems mit Hilfe eines Ersatzsystems (Beispiel: Flugsimulation). Im mathematischen Sinne ist Simulation definiert als (Piehler, Zschiesche, 1976):

Verfahren zur Durchführung von Experimenten auf einem Digitalrechner unter Benutzung mathematischer Modelle mit dem Ziel, Aussagen über das Verhalten des Systems zu gewinnen

Simulationen können in solchen Fällen eingesetzt werden, in denen herkömmliche mathematische Verfahren wegen zu großem erforderlichen Aufwands keine vernünftigen Ergebnisse liefern. Zunächst ist ein geeignetes Ersatzsystem in Form eines mathematischen Modells aufzustellen. Mit Hilfe der Ergebnisse, die eine Simulation liefert, wird versucht, Aussagen über das reale System zu machen. Ein wesentlicher Nachteil beim Einsatz von Simulationen ist durch den hohen Rechenaufwand gegeben. Daher sollte stets für leistungsfähige Hardware gesorgt werden.

Eine spezielle Unterart stellt die *Monte-Carlo-Methode* (z.B. Sobol, 1985) dar. Sie basiert auf der Generierung von großen Mengen an Zufallswerten (Realisierungen der Zufallsvariablen), die als Stichprobe dienen. Das formulierte Modell wird auf alle Realisierung nacheinander angewendet, so daß für das Ergebnis wiederum eine Stichprobe vorliegt, die es anschließend zu analysieren gilt. Mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode können all diejenigen Vorgänge simuliert werden, auf deren Ablauf sich zufällige Faktoren auswirken. Die Güte des abgeleiteten Ergebnisses ist in erster Linie vom Umfang der Stichprobe abhängig. Je mehr Zufallswerte prozessiert werden, desto zuverlässiger wird die Güte ausfallen. Eine Steigerung allerdings wird mit einer Zunahme des Rechenaufwandes erkaufte.

4.2 Testdatensätze

Im Rahmen der Arbeit wird die Monte-Carlo-Methode genutzt, um die komplexe und individuelle Fortpflanzung der geometrischen Datengenauigkeit bei der Flächenverschneidung zu untersuchen. Die Methode ist einzusetzen, da als Modell für die geometrische Genauigkeit ein stochastischer Ansatz formuliert wurde, der die Randlinien der Flächen als Zufallsvariablen betrachtet.

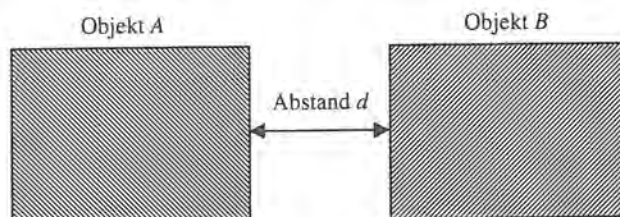


Abb. 2: Versuchsaufbau

Zur Durchführung der Simulationen ist zunächst eine große Anzahl an Realisierungen der zu untersuchenden Objekte in zufälliger Weise zu erzeugen. Der Versuchsaufbau (Abb. 2) beschränkt sich auf zwei einfache rechteckige Objekte A und B, die beide gleiche Form und gleiche Größe aufweisen und sich in einem bestimmten Abstand d zueinander befinden. Die dargestellte Objektgeometrie (Abb. 2) definiert die mittlere Geometrie der Linien. Alle Linien besitzen eine bestimmte Standardabweichung σ_L . Es werden verschiedene Datensätze erzeugt, die jeweils Realisierungen von beiden Objekten in gleicher Anzahl enthalten. Ein Beispieldatensatz ist in Abb. 3 zu sehen.

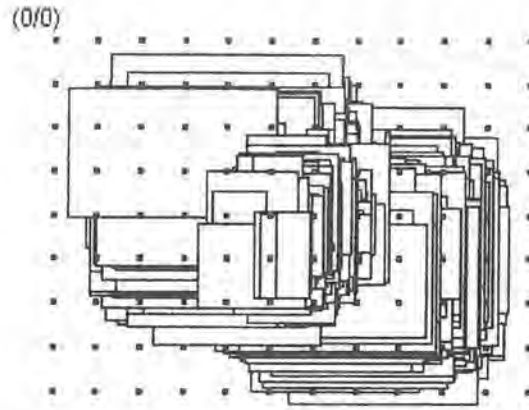


Abb. 3: Beispiel eines simulierten Datensatzes mit je 1000 Realisierungen zweier Objekte

Die Erzeugung der Realisierungen geschieht unabhängig für beide Objekte. Die verschiedenen Datensätze lassen sich in zwei Sequenzen anordnen. In der ersten Sequenz (S1) erhalten alle Linien die identische Standardabweichung $\sigma_L = \sigma_L = \sigma = 10$. Die einzelnen Datensätze der Sequenz unterscheiden sich nur durch den unterschiedlichen Abstand d der beiden Objekte. Die gültigen Abstände sind der Tab. 1 zu entnehmen. Negative Abstände entsprechen Überlagerungen der Objekte. In Datensatz 4 berühren sich die Objekte und in Datensatz 8 sind sie identisch.

Datensatz	1	2	3	4	5	6	7	8
Abstand	4σ	2σ	1σ	0	-1σ	-2σ	-4σ	-8σ

Tab. 1: Gewählte Abstände der Objekte A und B in den Datensätzen

Die zweite Sequenz (S2) unterscheidet sich von der ersten lediglich dadurch, daß für das Objekt B eine geringere Standardabweichung für die Linien von $\sigma_L = \sigma_L = 3$ angenommen wurde. Die Abstände dagegen sind identisch zu S1. Für jeden Datensatz wurden jeweils $n_A = n_B = n = 1000$ Realisierungen der Objekte erzeugt. Dieser Stichprobenumfang ist als guter Kompromiß zwischen Güte und Rechenaufwand anzusehen.

Die Simulation besteht nun daraus, daß jeweils die in einem Datensatz enthaltenen Objektrealisierungen paarweise miteinander verschnitten werden, so daß ein neuer Datensatz mit Realisierungen des Schnittobjektes entsteht, der die Grundlage für die Auswertungen und Ableitungen der Eigenschaften bildet. Die Simulation wird für alle Datensätze der beiden Sequenzen wiederholt.

5 Ergebnisse der Simulationen

Wie bereits in Abschnitt 1 erwähnt, konzentrierten sich die Untersuchungen auf ausgewählte Aufgaben, die von speziellem Interesse sind. Die einzelnen Aufgaben und die dabei erzielten Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben und diskutiert. Die meisten Erläuterungen werden an den Daten der ersten Sequenz gegeben. Jedoch sind identischen Untersuchungen auch an den Daten der zweiten Sequenz ausgeführt worden, ohne daß darauf im speziellen eingegangen wird.

5.1 Wahrscheinlichkeit des Schnitts

Nicht alle Realisierungen der Objekte A und B in einem Datensatz schneiden sich, so daß nur eine gewisse Anzahl von Realisierungen des Schnittobjektes erzeugt wird. Abb. 4 zeigt die Häufigkeit des Schnitts für die verschiedenen Datensätze. Die Häufigkeit nimmt mit Zunahme des Abstandes ab. Während bei identischen Objekten alle Realisierungen einen Schnitt bilden, sind bei größeren Abständen (hier: ab $d = 4\sigma$) keine Schnitte mehr möglich. Im Falle von sich berührenden Objekten ($d=0$) liegt die Schnitthäufigkeit ungefähr bei der Hälfte der Realisierungsanzahl.

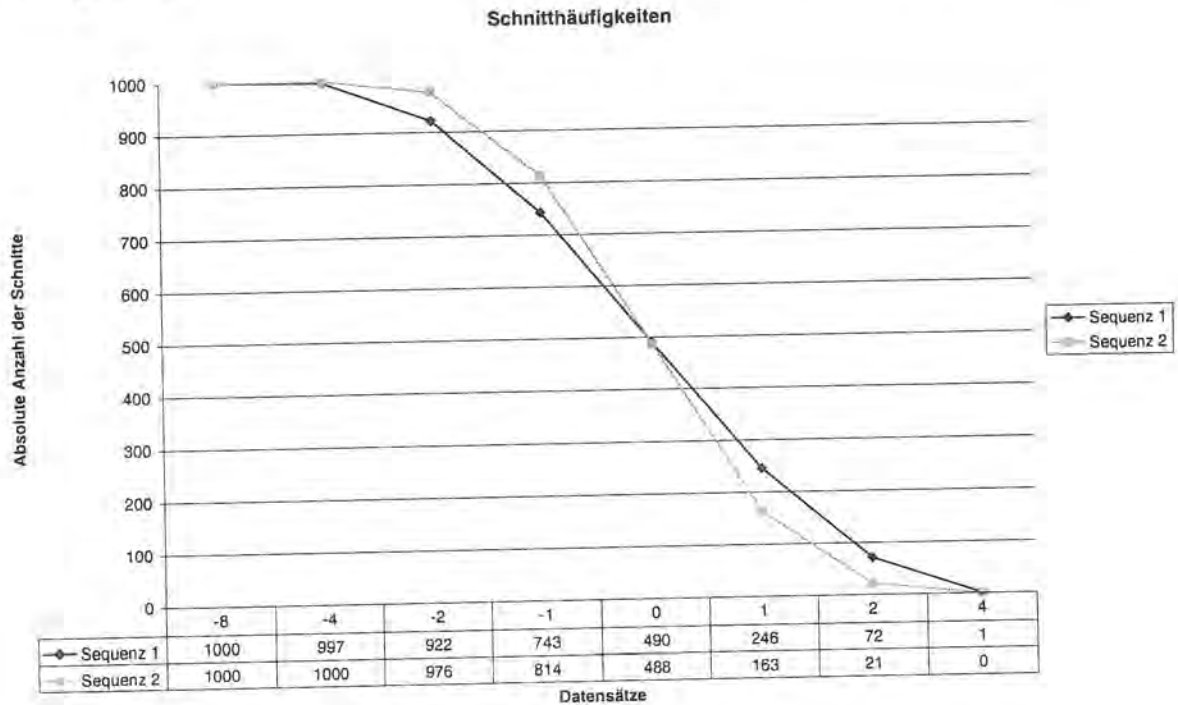


Abb. 4: Schnitthäufigkeiten

Aus diesen Werten läßt sich feststellen, daß die Wahrscheinlichkeit des Schnitts erwartungsgemäß vom Abstand d der Objekte abhängig ist. Da der Abstand in den Versuchen immer ein Vielfaches der Liniengenauigkeit beträgt, ist zusätzlich eine Abhängigkeit von der individuellen Liniengenauigkeit gegeben.

Der Abstand d kann wiederum als Zufallsvariable aufgefaßt werden, da er entsprechend der Liniengenauigkeiten variiert. Die Varianz des Abstandes σ_d^2 ergibt sich direkt aus den Liniengenauigkeiten der Objekte. Für den vorliegenden Versuchsaufbau gilt:

$$\sigma_d^2 = \sigma_{L_A}^2 + \sigma_{L_B}^2$$

Bei konstanter Liniengenauigkeit σ für beide Objekte ergibt sich dann:

$$\sigma_d^2 = \sqrt{2} \sigma$$

Aus der Annahme der Normalverteilung des Abstandes lassen sich daraus mit Hilfe der bekannten Verteilungsfunktion Wahrscheinlichkeiten für einen Schnitt p_{Schnitt} bestimmen:

$$p_{\text{Schnitt}} = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} e^{-\frac{1}{2}\frac{(t-d)^2}{\sigma_d^2}} dt$$

Wichtig ist die Feststellung, daß nur für $d < 0$ eine Überlagerung der Objekte (und auch der Realisierungen) und damit ein Schnitt vorliegt. Sie bestimmt die obere Integrationsgrenze der obigen Formel. Tab. 2 zeigt für die Sequenz 1 eine Gegenüberstellung der theoretisch aus der abgeleiteten Formel erzielten Werte für die Wahrscheinlichkeit des Schnitts mit den empirisch ermittelten Werten der relativen Häufigkeiten, die aus der Simulation gewonnen wurden. Die Werte stimmen gut überein, so daß die Formel durch die Simulationsergebnisse bestätigt werden kann.

Datensatz	1	2	3	4	5	6	7	8
Abstand	4σ	2σ	1σ	0	-1σ	-2σ	-4σ	-8σ
Theoretischer Wert	0.002	0.079	0.242	0.5	0.758	0.921	0.998	1.0
Relative Häufigkeit	0.001	0.072	0.246	0.490	0.743	0.922	0.997	1.0

Tab. 2: Wahrscheinlichkeit des Schnitts – Theoretischer Wert und relative Häufigkeit

5.2 Wahrscheinlichkeit der Objektzugehörigkeit

Die Objektzugehörigkeit stellt für beliebige Punkte fest, ob sie sich jeweils innerhalb oder außerhalb des Objektes befinden. Vereinigt man alle Punkte innerhalb eines Objektes zu einer Menge, dann wird dadurch die Objektausdehnung und damit die Geometrie des Objektes repräsentiert. Die Festlegung wird üblicherweise mit Hilfe des bekannten Punkt-im-Polygon-Tests getroffen. Ohne Beachtung der geometrischen Genauigkeit liefert ein solcher Test ein eindeutiges Ergebnis, wenn der Rand zum Inneren hinzuzählt. Die Eindeutigkeit geht verloren, wenn man die Objektlinien als stochastisch annimmt. Für diesen Fall ist die Objektzugehörigkeit durch einen Wahrscheinlichkeitswert auszudrücken.

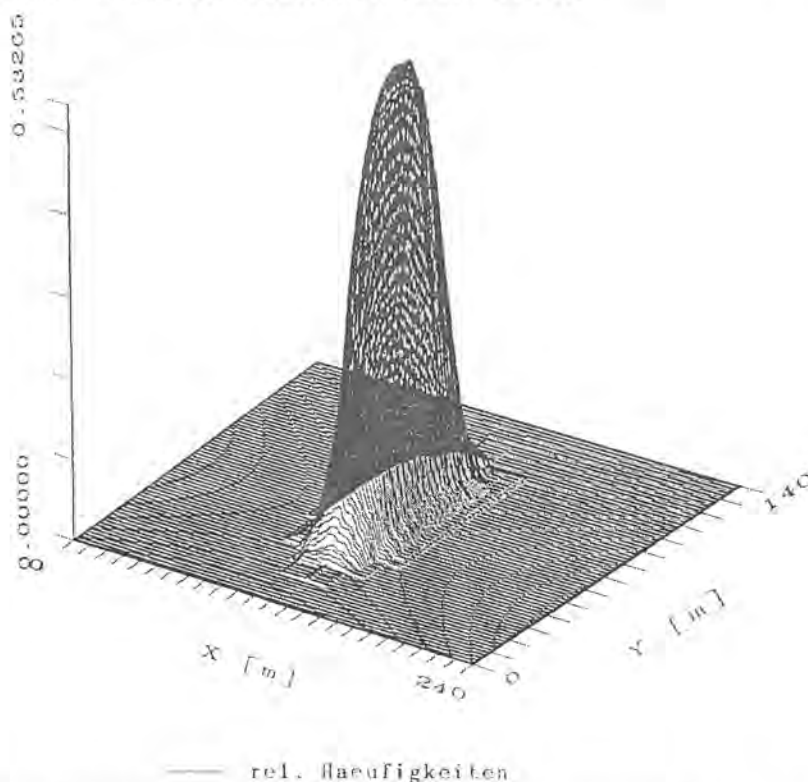


Abb. 5: Relative Häufigkeiten der Zugehörigkeiten zum Schnittobjekt

Zum Zwecke der Auswertung wird den simulierten Schnittobjekten eines Datensatzes ein gleichmäßiges Punktraster überlagert, für dessen Rasterpunkte jeweils die Häufigkeit der Ob-

jektzugehörigkeit zu den Realisierungen der Schnittobjekte bestimmt wird. Die relative Häufigkeit gemessen an der jeweiligen Anzahl der Schnittobjekte kann direkt als Wahrscheinlichkeit der Objektzugehörigkeit aufgefaßt werden. Abb. 5 veranschaulicht die relative Häufigkeit für den Datensatz 4 ($d=0$) der ersten Sequenz.

Der maximale Wert tritt in der Mitte der Schnittfläche auf, welches auch für die anderen Datensätze der ersten Sequenz gilt. Für die zweite Sequenz ist diese Position hin zum Objekt mit der geringeren Linienvarianz verschoben. Die relativen Häufigkeiten für diesen ausgewählten Punkt sind in der Abb. 6 zusammengestellt. Zusätzlich darin enthalten sind die Werte für Punkte auf der rechten Randlinie des Objektes A und für Punkte auf der linken Randlinie des Objektes B. Der maximale Wert nimmt mit Zunahme des Abstandes kontinuierlich ab. Somit ist die Wahrscheinlichkeit der Objektzugehörigkeit abhängig vom Abstand d der Objekte, von der Genauigkeit der Linien und von der Lage des Punktes relativ zu den beiden Objekten.

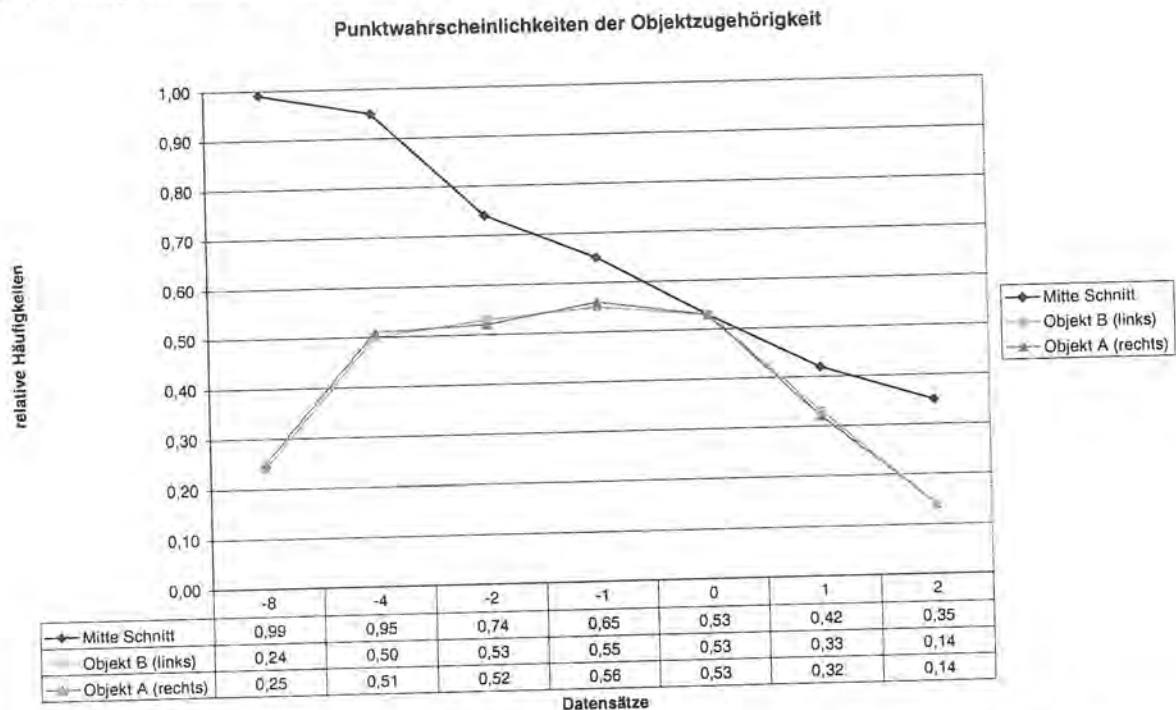


Abb. 6: Relative Häufigkeiten der Punktzugehörigkeiten zum Schnitt für ausgewählte Punkte

Betrachtet man die Flächenverschneidung im mengentheoretischen Sinn als *logisches UND*, dann kann die Wahrscheinlichkeit der Objektzugehörigkeit eines Punktes P zum Schnittobjekt S aus den Wahrscheinlichkeiten der Objektzugehörigkeiten der Eingangsobjekte A und B zu:

$$p_s = p(P \in S) = p((P \in A) \cap (P \in B)) = p(P \in A) \cdot p(P \in B) = p_A \cdot p_B$$

berechnet werden. Es gilt die Voraussetzung, daß die Zugehörigkeit des Punktes zu A und zu B unabhängig voneinander möglich ist. Z.B. ergeben sich für die Mitte des Schnitts im Datensatz 4 ($d=0$, Objekte berühren sich) $p_A = p_B = 0.5$ und damit $p_s = 0.25$. Ein Vergleich mit dem in der Simulation ermittelten Wert ($p'_s = 0.53$) offenbart eine große Differenz. Begründen läßt sie sich durch die Bildung der relativen Häufigkeit als Quotient von absoluter Häufigkeit und Anzahl der existierenden Schnitte. Die relative Häufigkeit entspricht damit einer bedingten Wahrscheinlichkeit, mit der Bedingung, daß ein Schnittobjekt existiert. Aus Anwendersicht sind genau solche bedingten Wahrscheinlichkeiten erwünscht, da die Flächenverschneidung nur unter der Annahme eines existierenden Schnittes sinnvoll auszuführen ist. Die bedingte Form der obigen Formel ergibt sich zu:

$$p'_S = p(P \in S \mid \text{Schnitt}) = p((P \in A) \cap (P \in B) \mid \text{Schnitt}) = \frac{p((P \in S) \cap \text{Schnitt})}{p(\text{Schnitt})}$$

und damit zu:

$$p'_S = \frac{p_A \cdot p_B}{p_{\text{Schnitt}}}$$

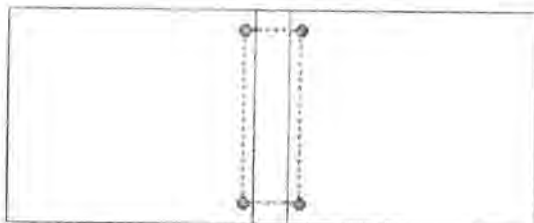
Die Richtigkeit der Formel kann anhand der Simulationsergebnisse überprüft werden. Tab. 3 stellt die Ergebnisse der Berechnungen und die relativen Häufigkeiten am Punkt des größten Wertes (nur für Sequenz 1) zusammen. Somit ist bei der Bestimmung der Wahrscheinlichkeit der Punktzugehörigkeiten als zusätzlicher Parameter die Schnittwahrscheinlichkeit zu berücksichtigen.

Datensatz	1	2	3	4	5	6	7	8
Abstand	4σ	2σ	1σ	0	-1σ	-2σ	-4σ	-8σ
Theoretischer Wert	0.0	0.31	0.39	0.51	0.62	0.72	0.94	1.0
Relative Häufigkeit	0.0	0.34	0.42	0.53	0.64	0.74	0.94	0.99

Tab. 3: Maximale Wahrscheinlichkeiten der Zugehörigkeit zum Objekt

5.3 Wahrscheinlichste Geometrie des Schnittobjektes und Verschiebungsbetrag

Als *wahrscheinlichste Geometrie* des Schnittobjektes wird die Fläche bezeichnet, die durch die mittlere Lage der Randlinien gebildet wird. Sie wird als *wahrscheinlichste Geometrie* bezeichnet, da dort die Randlinien theoretisch am häufigsten auftreten. Im Falle der zugrundegelegten Normalverteilung gleicht sie der *mittleren Geometrie*, die sich aus dem Mittelwert der Linienpositionen definiert. Die *wahrscheinlichste Geometrie* ist für einen Nutzer von besonderem Interesse, da diese in der Regel in einem Datenbestand abgelegt sein sollte. Im Gegensatz dazu wird als *traditionelle Geometrie* die Darstellung bezeichnet, die sich ohne Berücksichtigung der geometrischen Genauigkeit ergeben würde. Traditionelle und *wahrscheinlichste Geometrie* sind für die Eingangsobjekte des Versuchs identisch.



(a)



(b)

Abb. 7: Mittlere Geometrie (gestrichelt) für $d = -1\sigma$ (a) und $d = -8\sigma$ (b)

Die Bildung der traditionellen Geometrie eines Schnittobjektes (es wird eine traditionelle Flächenverschneidung mit den mittleren Eingangsobjekten durchgeführt) ist nur beim Vorhan-

densein einer Überlappung ($d < 0$) möglich. Im Falle der Datensätze 1-3 kann keine traditionelle Geometrie erzeugt werden und für den Datensatz 4 ergibt sich lediglich eine Schnittlinie. Dennoch werden während der Simulation auch in diesen Fällen Schnittobjekte erzeugt. Somit ist jeweils die Schätzung einer mittleren Geometrie möglich, indem die korrespondierenden Punkte aller erzeugter Realisierungen gemittelt werden. Abb. 7 zeigt diese Flächen als Überlagerungen zu den Eingangsobjekten für die Abstände $d = -1\sigma$ bzw. $d = -8\sigma$ (identische Objekte). Die mittlere Geometrie unterscheidet sich deutlich vom traditionell zu erwartenden Ergebnis. Differenzwerte zwischen mittlerer und traditioneller Geometrie sind für die linke und rechte Schnittlinie in der Abb. 8 aufgezeichnet. Negative Werte deuten auf eine kleinere Schnittgeometrie, positive Werte auf eine größere Schnittgeometrie als die traditionelle Geometrie hin. Es ist festzustellen, daß bei einer Überlagerung der beiden Objektflächen von ca. 50 % keine Differenzen auftreten. Mit Zu- oder Abnahme der Überlagerung werden die Differenzen immer größer. Bei Zunahme ist die mittlere Geometrie deutlich kleiner als die traditionelle Geometrie. Dagegen wird die mittlere Geometrie größer, wenn die Überlagerung abnimmt. Dieser Trend kann man sich auf die Fälle fortgesetzt vorstellen, zu denen keine traditionelle Schnittgeometrie mehr existiert. Über gleichartige Beobachtungen wird auch in Glemser (1996) berichtet.

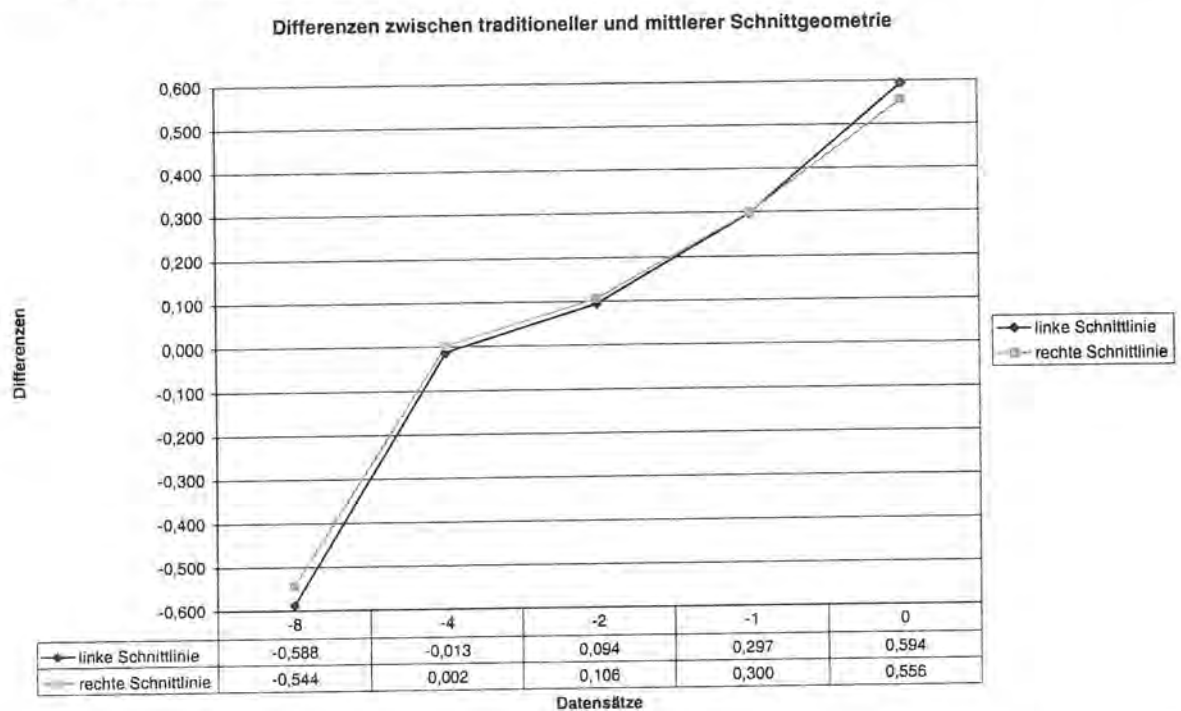


Abb. 8: Differenzen zwischen traditioneller und mittlerer Schnittgeometrie (mit Faktor σ)

Bei einer Überlagerung von 50 % sind beliebige Randlinien der Eingangsobjekte maximal voneinander entfernt. Bei Zu- bzw. Abnahme der Überlagerung nähern sich die Linien an. Eine Annäherung bedeutet demnach eine Verschiebung der mittleren Geometrie. Der minimale Abstand zwischen den Randlinien ist somit der entscheidende Parameter zur Bestimmung des Verschiebungsbetrages. Der Verschiebungsbetrag ist individuell an jedem Linienpunkt der traditionellen Geometrie zu bestimmen. Der minimale Abstand zwischen den Eingangsobjekten soll mit d_i bezeichnet werden und ist objektspezifisch zu messen. Der vergleichbare Abstand im Schnittobjekt d_s ist eine Zufallsvariable, die von der geometrischen

Genauigkeit der betreffenden Randlinien abhängt. Sie hat die Varianz $\sigma_{d_s}^2 = \sigma_{L_A}^2 + \sigma_{L_B}^2$. Ihr Mittelwert $\bar{d}_s$ ergibt sich zu:

$$\bar{d}_s = \int_{-\infty}^{\infty} t f(d_s) dt$$

Unter der Bedingung $d_s > 0$ (nur dieser Wert ist sinnvoll) ist der Mittelwert mit einem Normierungsfaktor N zu normieren:

$$\bar{d}_s = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} t f(d_s) dt$$

mit:

$$N = \int_0^{\infty} f(d_s) dt$$

Der gesuchte Verschiebungsbetrag ergibt sich letztlich zu:

$$\Delta = \frac{d_i - \bar{d}_s}{2}$$

Er ist nur für den Fall von Überlagerungen der Eingangsobjekte zu berechnen, da sonst keine traditionelle Schnittgeometrie existiert. Tab. 4 zeigt den Vergleich zwischen den aus der Simulation gewonnenen Daten und den theoretisch durch die Formel ermittelten Werten. Der Vergleich verifiziert die gefundene Berechnungsformel.

Datensatz	4	5	6	7	8
Abstand	0	-1σ	-2σ	-4σ	-8σ
Theoretischer Wert	0.564σ	0.289σ	0.113σ	0.0σ	-0.564σ
Simulationsergebnis	0.575σ	0.299σ	0.10σ	0.006σ	-0.567σ

Tab. 4: Verschiebungsbetrag – theoretischer Wert und aus Simulation

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Eigenschaften der Fehlerfortpflanzung bei der Flächenverschneidung wurden mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation untersucht. Im einzelnen wurde festgestellt:

1. Die Wahrscheinlichkeit p_{Schnitt} , daß ein Schnitt vorliegt, hängt neben der Liniengenauigkeit entscheidend vom Abstand der Objekte ab.
2. Die Wahrscheinlichkeit p_s der Objektzugehörigkeit eines beliebigen Punktes wird von der Liniengenauigkeit, den Zugehörigkeiten zu den Eingangsobjekten und von der Schnittwahrscheinlichkeit beeinflusst.
3. Die wahrscheinlichste Geometrie stimmt nicht mit der traditionell ermittelten Schnittgeometrie, sofern diese überhaupt existiert, überein. Der Verschiebungsbetrag Δ hängt von den Liniengenauigkeiten und dem minimalen Abstand der beiden Objekte ab und ergibt einen individuellen Wert für alle Linienpunkte der traditionellen Geometrie.

Die durchgeführten Simulationen umfassen weitere Testreihen, zusätzlich zu den hier diskutierten, die unterschiedliche Liniengenauigkeiten und Überlappungsgrade abdecken (Henne-

berg, 1997). Sie sind bisher noch nicht vollständig ausgewertet, so daß weitere Erkenntnisse hinzukommen können. Übergeordnetes Ziel sollte jedoch sein, aus den gefundenen Eigenschaften ein Verfahren zu entwickeln, das die Fehlerfortpflanzung ohne aufwendige Simulationen erledigen kann.

7 Literatur

- Bill, R. 1996: Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. Wichmann, Heidelberg.
- Caspary, W. (1992a): Qualitätsmerkmale von Geo-Daten. Zeitschrift für Vermessungswesen, Vol. 117, No. 7, 360-367, 1992.
- Caspary, W. (1992b): Genauigkeit als Qualitätsmerkmal digitaler Datenbestände. In: Grünreich, D., Buziek, G. (Hrsg.) (1992), Gewinnung von Basisdaten für Geo-Informationssysteme. DVW-Schriftenreihe, Heft 4, 157-166.
- Glemser, M. (1994): Behandlung der Genauigkeit räumlicher Daten in Geo-Informationssystemen. In: Die benutzte Erde. Alfred-Wegener-Stiftung (Hrsg.), Ernst&Sohn, Berlin.
- Glemser, M. (1996): Integration der geometrischen Datenqualität in GIS-Funktionen. In: Proceedings des Workshops: Datenqualität und Metainformation in Geo-Informationssystemen, Universität Rostock.
- Henneberg, C. (1997): Fortpflanzung der geometrischen Genauigkeit von Objekten bei der Flächenverschneidung. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart (unveröffentlicht).
- Höpke, W. (1980): Fehlerlehre und Ausgleichungsrechnung. De Gruyter Verlag, Berlin.
- Piehler, J, Zschiesche, H.-U. (1976): Simulationenmethoden. Mathematik für Ingenieure, Band 20. Teubner Verlag, Leipzig.
- Sobol, I.M. (1985): Die Monte-Carlo-Methode. Deutsche Taschenbücher, Band 41, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt am Main.

Das Minimum-Maximum-Modell - Eine qualitative Beschreibung der geometrischen Genauigkeit und ihre Integration in GIS

Michael Glemser, Sandra Krauß, Christian Schneider
Institut für Photogrammetrie
Universität Stuttgart

1 Einführung

Geo-Informationssysteme (GIS) erfassen, verwalten, analysieren und präsentieren raumbezogene Daten. In den meisten Systemen erfolgt dabei eine Strukturierung der Daten in Form von räumlichen Objekten, deren Lage und Ausdehnung durch eine *geometrische Komponente* und deren Thematik durch eine *attributive Komponente* beschrieben werden. Die Geometrie eines Objektes folgt einer Randbeschreibung, durch die das Innere scharf vom Äußeren getrennt wird. Für flächenhafte Objekte z.B. ist der Rand durch eine Anzahl an Umringslinien definiert. Besonders für natürliche Objekte trifft aber die scharfe Abgrenzung im allgemeinen nicht zu. Z.B. ein Wald kann nicht exakt von den ihn umgebenden Wiesen abgegrenzt werden. Die scharfe Abgrenzung entspricht einem Abstraktionsprozeß, der die erzeugten GIS-Daten zu einem gewissen Grade unsicher macht. Man spricht hier von der *Abstraktionsunschärfe*, die in der Natur der Objekte begründet liegt. Weiterhin sind die zur Erfassung notwendigen Beobachtungsmethoden mit zufälligen, systematischen und groben Fehlern behaftet und verursachen so eine zusätzliche Unsicherheit in der Position der Ränder. Da solche Einflüsse auf alle Daten in gleichem Maße wirken, ist immer vom Bestehen einer gewissen Unsicherheit auszugehen. Die auf die Geometrie bezogene Unsicherheit wird als *geometrische Genauigkeit* bezeichnet.

Innerhalb eines GIS können sehr unterschiedlich genau Datenbestände vorkommen (z.B. hochgenaue Katasterdaten und ungenaue geologische Daten), die sich aber trotzdem ohne Probleme gemeinsam verarbeiten lassen. Um dennoch auch nach komplexen Verarbeitungsschritten Aussagen zur Genauigkeit des Ergebnisses treffen zu können, muß eine Integration der geometrischen Genauigkeit in die Systemumgebung erfolgen. Sie dient dazu dem Anwender den Umgang mit ungenauen Daten zu erleichtern. Die Integration erfordert gezielte Erweiterungen bei der Verwaltung und Analyse. Im speziellen sind Datenhaltungskonzepte zu entwickeln und alle Analysefunktionen zu ergänzen, um eine Berücksichtigung und Fortpflanzung der geometrischen Genauigkeit auf das Ergebnis zu ermöglichen. Zusätzlich muß sich um eine ansprechende Visualisierung der Unsicherheit gekümmert werden. Diesen Aufgaben widmet sich der vorliegende Beitrag.

Zunächst wird näher auf die Beschreibung der geometrischen Genauigkeit in GIS eingegangen. Dazu erfolgt die Formulierung eines Genauigkeitsmodells - *das Minimum-Maximum-Modell*. Seine Integration in die Umgebung eines bestehenden GIS ist Thema eines weiteren Abschnitts. Welche Auswirkungen die geometrische Genauigkeit auf die Analysefunktionen besitzen, wird an drei Beispielen verdeutlicht: am *Punkt-im-Polygon-Test*, an der *geometrischen Verschneidung* und an der *Festlegung topologischer Relationen*. Zum Schluß werden die gefundenen Erkenntnisse zusammengefaßt.

2 Minimum-Maximum-Modell

Die Integration der geometrischen Genauigkeit in GIS erfordert die Definition eines Genauigkeitsmodells, das die notwendigen Beschreibungsmaße bereitstellt. Dieser Arbeit wird das *Minimum-Maximum-Modell* zugrundegelegt. Doch vor einer genauen Definition des Modells, soll der Begriff der geometrischen Genauigkeit näher erläutert werden.

2.1 Geometrische Genauigkeit

Werden zwei Datensätze miteinander fusioniert, die identische Inhalte besitzen, so tritt häufig das Problem auf, daß eigentlich identische Geometrien (z.B. Straßenverläufe) lagemäßig gegeneinander verschoben sind. Zur Herstellung der Identität sind aufwendige Verfahren zur *Homogenisierung* notwendig. Die zu beobachtende Verschiebung ist aber nichts anderes als ein Effekt der in den Daten enthaltenen geometrischen Genauigkeit. Jeder Datensatz repräsentiert demnach genau eine Realisierung von theoretisch unendlich vielen möglichen Darstellungen. Erfassungseinflüsse, aber auch die Natur der Objekte bewirken, daß keine Realisierung der anderen gleicht (Caspary, 1992; Glemser, 1994). Die geometrische Genauigkeit äußert sich demnach als eine Art Variation in der Geometrie. Auch nach einer erfolgten Homogenisierung, sind die *homogenen Objekte* nicht übergeordnet genau. Sie repräsentieren nur eine bestimmte Realisierung (z.B. die mittlere Geometrie). Ein großes Problem ist dadurch gegeben, daß man einer Realisierung allein nicht ansehen kann, welchen Genauigkeitswert sie besitzt. Nur über den Weg von Mehrfacherfassungen oder aus bereits vorhandenem Wissen kann die geometrische Genauigkeit ermittelt werden. Die bekannten Werte sind dann zum Zwecke der weiteren Nutzung explizit und individuell für jedes Objekt zu modellieren.

Die geometrische Genauigkeit bildet die Ursache für die Entstehung von unsicheren Relationen zwischen den Objekten. Unter Objektrelationen werden Nachbarschaftsbeziehungen verstanden, die häufig in GIS genutzt werden, um selektive Anfragen an den Datenbestand auszuführen. Z.B. könnten alle Objekte gesucht sein, die ein ausgewähltes Objekt *berühren*. Diese Art von Anfragen sind als *topologische Operationen* bekannt. Da aufgrund der geometrischen Genauigkeit der Rand eines Objektes als variabel aufzufassen ist, fallen die Beziehungen nicht mehr eindeutig aus. Sie sind ebenfalls unsicher. Man kann diese Art der Unsicherheit als *topologische Genauigkeit* der Relationen bezeichnen. Ihr Entstehen und Ausmaß ist alleinig von der geometrischen Genauigkeit abhängig. Um eine Bewertung der unsicheren Relationen durchzuführen, ist daher auf die Auswirkungen der geometrischen Genauigkeit auf die Beziehungen der Objekte einzugehen.

2.2 Modelldefinition

Wie in der vorangegangenen Diskussion erarbeitet, sind die geometrischen Primitive (Punkte, Linien, Flächen) nur zu einem bestimmten Grade genau. Die Genauigkeit äußert sich durch eine Variation in der Lage und Ausdehnung, die für die einzelnen Objekte möglich sind. Diese räumliche Variation gilt es zu beschreiben. Als erstes soll eine Eingrenzung erfolgen. Die Eingrenzung erfüllt die Aufgabe, den Bereich des Vorkommens möglicher Realisierungen der Geometrie räumlich einzuschränken. Sie äußert sich im allgemeinen in Form eines Bandes um die geometrischen Primitive und entspricht damit dem bekannten *Toleranzband* (Perkal, 1956; Chrisman, 1982). Das Band beinhaltet alle möglichen Realisierungen und somit auch die *wahre* Position der Primitive (sofern eine solche überhaupt existiert). Daraus kann einerseits eine maximal mögliche Ausdehnung generiert werden, die als *Maximum-Geometrie* (kurz: *Maximum*) zu bezeichnen ist. Außerhalb des Maximums existieren keine weiteren Realisierungen der Objektgeometrie. Andererseits existiert für flächenhafte Objekte zusätzlich eine minimale Ausdehnung, die *Minimum-Geometrie* (kurz: *Minimum*). Für sie gilt, daß die um-

schlossene Ausdehnung als sicher anzunehmen ist. Des weiteren kann über eine Schätzung einer mittleren Ausdehnung des Objektes eine *mittlere Geometrie* (kurz: *Mittel*) formuliert werden. Bestehende Datensätze enthalten jeweils nur eine geometrische Beschreibung pro Objekt, die aber in einer guten Näherung dem Mittel gleicht. Aus diesem Grund ist das Mittel als *traditionelle Geometrie* (kurz: *Normalgeometrie*) aufzufassen. Zur Vollständigkeit wird festgelegt, daß im Falle von punkt- und linienförmigen Objekten Minimum und Mittel identisch sind. Formal beschreibt das Modell die Geometrie des Objektes durch das 3-Tupel:

$$\text{Geometrie} = \{\text{Maximum}, \text{Mittel}, \text{Minimum}\}$$

Abb. 1 veranschaulicht die getroffenen Festlegungen an einem flächenhaften Beispielobjekt.

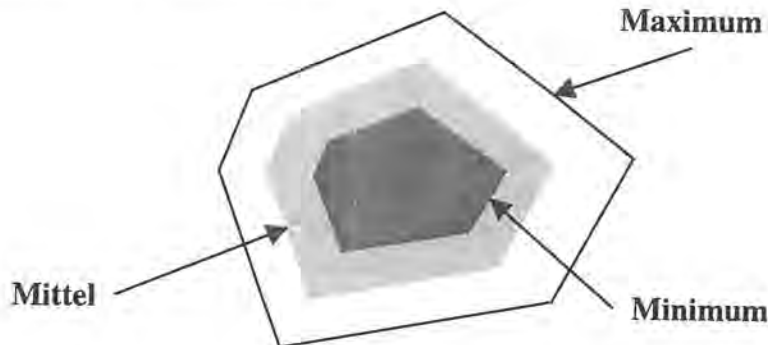


Abb. 1: Darstellung des Minimums, des Mittels und des Maximums eines Flächenobjektes

Die Anwendung des Modells setzt die individuelle Erfassung des Minimums, des Mittels und des Maximums für jedes Objekt voraus. Eine direkte Erfassung dieser Geometrien ist zwar theoretisch denkbar, doch praktisch kaum zu realisieren. Ein besserer Weg ergibt sich durch Ergänzung der seither üblichen Vorgehensweise mit Erfassung der Normalgeometrie um die Angabe eines Epsilon-Wertes (ε) zu jedem Primitiv. Dieser Wert veranschaulicht die Breite des Toleranzbandes und kann zur Bildung von Minimum und Maximum eingesetzt werden. Dazu werden zunächst Puffer mit Breite ε um alle Primitive gebildet (Abb. 2(a)). Die Vereinigung der Puffer läßt das Toleranzband entstehen. Im Falle von punkt- oder linienförmigen Objekten ist damit das Maximum erzeugt. Bei flächenhaften Objekten entsteht das Maximum durch eine zusätzliche Vereinigung des Bandes mit der Normalgeometrie, während das Minimum durch Differenzbildung von Normalgeometrie und Band zu erzeugen ist (Abb. 2(b)).

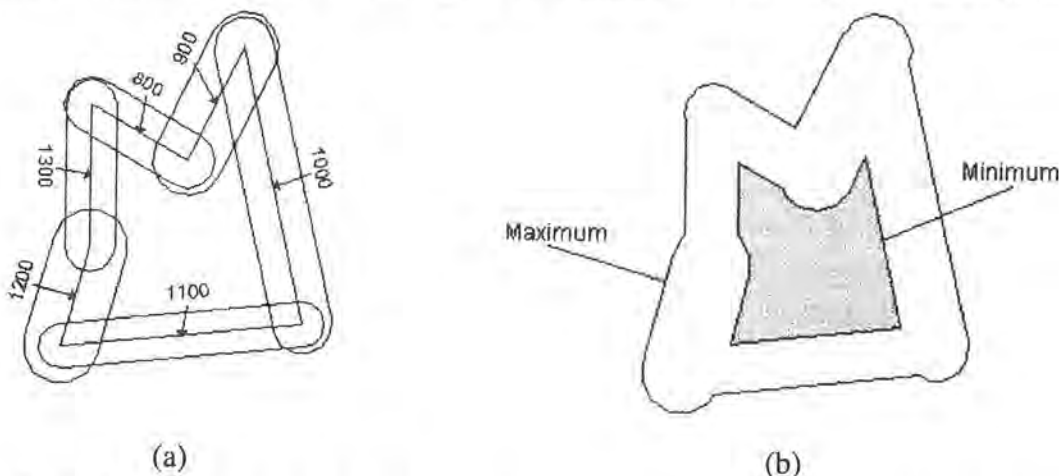


Abb. 2: Pufferbildung mit ε um die Randlinien eines flächenhaften Objektes (a) zur Erzeugung von Minimum und Maximum (b)

Der Vorteil dieses Modells liegt in seiner einfachen Anwendbarkeit. Die bisherige Arbeitsweise mit Erfassung der Normalgeometrie kann weiterhin beibehalten werden. Lediglich eine Ergänzung um die Erzeugung von Minimum und Maximum hat zu erfolgen. Wenn diese durch die Angabe eines Epsilon-Wertes erfolgt, dann kann deren Berechnung weitgehend automatisiert durchgeführt werden (Schneider, 1998). Ein Nachteil stellt das Fehlen einer Angabe zur Verteilung der Realisierungen innerhalb des Toleranzbandes dar. Alle möglichen Ausdehnungen eines Objektes sind gleich wahrscheinlich. Aus diesem Grund lassen sich nur *qualitative* Bewertungen zur Genauigkeit einer bestimmten Aussage (z.B. Bewertung des bekannten *Punkt-im-Polygon-Problems* (Abschnitt 4.1)) ableiten. Hierin ist der entscheidende Unterschied zu einem *stochastischen Ansatz* zu sehen, der explizit die Verteilung der Realisierungen miteinbezieht (Glemser, 1996).

3 Integrationsaspekte

Die Integration des Genauigkeitsmodells erfordert Erweiterungen in allen Komponenten (Erfassung, Verwaltung, Analyse und Präsentation) eines GIS (Glemser, 1994). Zunächst ist die Einbindung in das Datenmodell zu klären. Generell bieten sich zwei unterschiedliche Möglichkeiten. Wird Minimum und Maximum über den Epsilon-Wert gebildet, so bietet sich an, den Wert direkt als zusätzliches Attribut getrennt für jedes Primitiv zu verwalten (*Attributansatz*). Ein graphischer Weg eröffnet sich, indem man das 3-Tupel für jedes Objekt herstellt und dann Minimum, Mittel und Maximum ebenenweise als geometrische Objektbestandteile verwaltet (*graphischer Ansatz*). In der Regel dürften beide Möglichkeiten in allen gängigen GIS-Systemen unter Verwendung zusätzlicher Verweistabellen zu realisieren sein. Für die hier erfolgten Untersuchungen wurde das Modell im GIS-Paket MapInfo umgesetzt (Schneider, 1998). Der Attributansatz besitzt den Nachteil, daß Maximum und Minimum erst aufwendig (i.d.R. mehrfach) berechnet werden müssen. Dagegen verhält sich der Attributansatz im Vergleich zum graphischen Ansatz äußerst speicherplatzsparend.

Wie bereits im vorigen Abschnitt angedeutet ist eine praktikable Erfassungsweise durch Angabe eines Epsilon-Wertes möglich. Um einen solchen Wert anzugeben, bedarf es der Durchführung von Tests, innerhalb denen durch Auswertung von Mehrfacherfassungen, Wissen über die Variation der Realisierung erarbeitet wird. Die Tests sollten beispielhafte Objekte aller relevanter Objektarten umfassen.

Bei der Visualisierung der Daten im System sollte sich zunächst für den Nutzer keine Änderung ergeben. Der Nutzer arbeitet hauptsächlich mit der Darstellung der Normalgeometrie. Das Genauigkeitsmodell bleibt im Hintergrund. Das System reagiert dagegen auf Anfrage (*Wie genau sind die dargestellten Objekte?*) und zeigt dann zusätzlich Minimum und Maximum der Objekte (einzeln oder gemeinsam) an. Die Darstellung von verschiedenen Objekttypen (Punkte, Linien, Flächen) ist in Abb. 3 zu sehen.

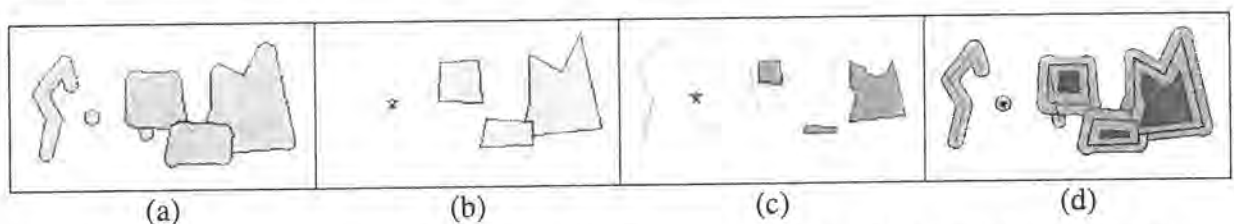


Abb. 3: Beispieldatensatz mit Darstellung des Maximum (a), des Mittels (b), des Minimums (c) und einer Gesamtansicht (d)

Auf die Auswirkungen der Integration der geometrischen Genauigkeit wird vertiefend im anschließenden Abschnitt eingegangen.

4 Anwendung

Für Analysen bedeutet die Integration des Genauigkeitsmodells, daß am Ende das Ergebnis mit einer Bewertung der Qualität versehen werden kann. Dazu ist es notwendig die angewendeten Analysefunktionen so zu erweitern, daß sie mit den Daten auch die Genauigkeit verarbeiten können. Die Verarbeitung der Genauigkeit entspricht dabei einer Übertragung oder *Fortpflanzung* der Genauigkeit auf das Ergebnis. Der Nutzer erhält somit nicht nur das Ergebnis, sondern stets auch eine Bewertung der Güte. Die Beurteilung bleibt aber weiterhin dem Nutzer überlassen. Jedoch werden nun Vergleiche zwischen unabhängig voneinander erzielten Ergebnissen ermöglicht. Im folgenden werden die Auswirkungen der Integration an den in GIS häufig genutzten Analysen des Punkt-im-Polygon-Test, der geometrischen Verschneidung und der Bestimmung der topologischen Relation erläutert.

4.1 Punkt-im-Polygon-Test

Der Punkt-im-Polygon-Test stellt fest, ob sich ein bestimmter Punkt innerhalb eines flächenhaften Objekts befindet oder nicht. Es existieren eine Reihe von Algorithmen, die dieses Problem lösen (Bill, 1996). Sie liefern jeweils eine eindeutige Antwort: *innerhalb* oder *außerhalb*. Der Rand wird dabei meist zum Inneren gezählt. Durch die Beachtung der geometrischen Genauigkeit geht die Eindeutigkeit verloren. Dies trifft insbesondere dann zu, wenn sich der Punkt innerhalb des Toleranzbandes befindet. Das Ergebnis des Tests wird unsicher.

Zur Bewertung der Unsicherheit wird die übliche Bestimmung dahingehend erweitert, daß der Test für alle Geometrien (Minimum, Mittel, Maximum) ausgeführt wird. Das Ergebnis für das Mittel entspricht der traditionellen Lösung. Man erhält dafür als Aussage *Punkt innerhalb* oder *Punkt außerhalb* des Objektes. Durch die weiteren Geometrien erfolgt nun zusätzlich eine Bewertung der Unsicherheit der traditionellen Aussage. Dazu wird diese Aussage um die Begriffe *sicher* und *möglicherweise* ergänzt (Blakemore, 1984). Liegt z.B. der Punkt außerhalb der Normalgeometrie, aber noch innerhalb des Maximums, dann gilt für das Testergebnis: *Punkt liegt möglicherweise außerhalb*. Im mathematischen Sinne erweitert sich der Ergebnisraum E auf vier mögliche Fälle:

$$E = \{ \text{sicher außerhalb, möglicherweise außerhalb, möglicherweise innerhalb, sicher innerhalb} \}$$

Tab. 1 beinhaltet ein Bewertungsschema, das alle möglichen Bewertungsfälle abdeckt. Abb. 4 verdeutlicht schematisch die verschiedenen Aussagemöglichkeiten.

Punktlage	Bewertung
$\text{Punkt} \in \text{Minimum}$	Sicher innerhalb
$\text{Punkt} \in \text{Mittel} \cap \text{Punkt} \notin \text{Minimum}$	Möglicherweise innerhalb
$\text{Punkt} \in \text{Maximum} \cap \text{Punkt} \notin \text{Mittel}$	Möglicherweise außerhalb
$\text{Punkt} \notin \text{Maximum}$	Sicher außerhalb

Tab. 1: Bewertungsschema beim Punkt-im-Polygon-Test

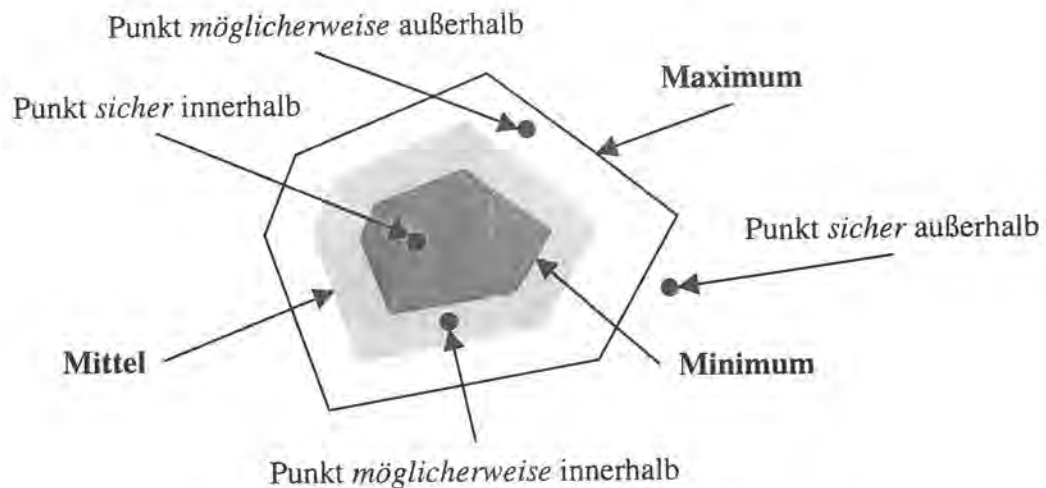


Abb. 4: Verschiedene Bewertungen der Punkt-im-Polygon-Aussage

4.2 Geometrische Verschneidung

Die geometrische Verschneidung hat die Aufgabe die geometrischen Formen der Objekte (Punkte, Linien, Flächen) miteinander zu verschneiden, um aus den sich überlappenden Teilen neue Objekte (Schnittobjekte) zu bilden (Bill, 1996). Sie entspricht damit im mengentheoretischen Sinn einer *logischen UND-Operation*. Diese Funktionalität gehört ebenfalls zu den elementaren Basisfunktionen und ist nahezu in allen GIS-Systemen vorhanden. Da als Ergebnisse wiederum Objekte entstehen, besteht die Fortpflanzung der geometrischen Genauigkeit in einer Berechnung von Minimum und Maximum des Schnittobjekts.

Die Erweiterung äußert sich zunächst in einer Untersuchung mit welcher Sicherheit ein Schnitt vorliegen kann (Schnittprüfung). In einem zweiten Schritt werden dann die neuen Objekte gebildet. Die Untersuchung startet mit der ebenenweisen Verschneidung der drei Geometrien der beteiligten Objekte A und B: Minimum A mit Minimum B, Mittel A mit Mittel B, Maximum A mit Maximum B. Nicht alle Schnittbildungen müssen eine Ergebnismenge erzielen. Je nach nichtleerer Ergebnismenge kann festgestellt werden, wie sicher ein Schnitt vorliegt. Wiederum erfolgt die Bewertung durch das Hinzufügen der Begriffe *sicher* und *möglicherweise*. Tab. 2 stellt die verschiedenen Bewertungsmöglichkeiten in Form eines Schemas zusammen.

Schnitt von			Bewertung
Minimum	Mittel	Maximum	
$E = O$	$E = O$	$E = O$	Objekte schneiden sich <i>sicher nicht</i>
$E = \emptyset$	$E = O$	$E = O$	Objekte schneiden sich <i>möglicherweise nicht</i>
$E = \emptyset$	$E = \emptyset$	$E = O$	Objekte schneiden sich <i>möglicherweise</i>
$E = \emptyset$	$E = \emptyset$	$E = \emptyset$	Objekte schneiden sich <i>sicher</i>

Tab. 2: Bewertung des Schnitts ($E = O$ - leere Ergebnismenge, $E = \emptyset$ - nichtleere Ergebnismenge)

An dieser Stelle bietet sich dem Nutzer nochmals die Gelegenheit die Erzeugung von Schnittobjekten zu steuern, indem er angibt, welche Objekte er konkret erhalten möchte. Dazu hat er sich zu entscheiden, wie sicher seine Schnittobjekte sein sollen. Beispielsweise kann er wählen, daß nur sichere Objekte, d.h. die durch einen sicheren Schnitt der Eingangsobjekte entstehen, erzeugt werden sollen. Dieses Kriterium ist dann für alle Objektschnitte zu prüfen.

Nach erfolgreicher Prüfung ist das vollständige Geometrietupel des Schnittobjekts herzustellen. Es setzt sich aus den Schnitten der jeweiligen Ebenen, die zur Schnittprüfung bereits erzeugt wurden, zusammen. Liegt innerhalb einer Ebene (z.B. für das Minimum) eine leere Ergebnismenge vor, so ist diese durch einen punktförmigen Repräsentanten (z.B. den Schwerpunkt einer anderen Geometrie) zu füllen. Mehrere Verschneidungsbeispiele sind in Abb. 5 abgebildet.



Abb. 5: Ergebnis der geometrischen Verschneidung des Beispieldatensatzes

Die Berücksichtigung der geometrischen Genauigkeit bedeutet eine Verbesserung des Verschneidungsergebnisses gegenüber der traditionellen Lösung. Dies wird daran deutlich, daß auch solche Schnittobjekte gebildet werden können, die sich nur in den Maximum-Geometrien der Eingangsobjekte überlappen. Ein solches Ergebnis kann im traditionellen Ansatz nicht erzielt werden. Es ist aber besonders für kritische Analysen, bei denen z.B. mit Sicherheit das gemeinsame Auftreten zweier Eigenschaften ausgeschlossen werden soll, von essentieller Bedeutung.

4.3 Bewertung topologischer Relationen

Bei der Herstellung von topologischen Relationen zwischen Objekten ist die gegenseitige Lage zueinander zu betrachten. Dabei sind die exakten metrischen Verhältnisse unwichtig; die relative Lage ist entscheidend. Folgende mögliche Relationen können unterschieden werden (Abb. 6):

- Getrennt (Disjoint)
- Berührend (Meet)
- Überlappend (Intersect)
- Enthalten (Contains)
- Enthält (Inside)
- Berührend und enthalten (Covers)
- Berührend und enthält (Covered By)
- Identisch (Equal)

			
$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ disjoint	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ contains	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ inside	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ equal
			
$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ meet	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$ covers	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ coveredBy	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ intersect

Abb. 6: Topologische Relationen und deren mathematische Repräsentation im Relationenmodell mit Hilfe von Matrizen

Es existiert ein mathematisch begründetes Relationenmodell, das sich zur Beschreibung der Relationen eignet (Egenhofer, Herring, 1990). Dafür wird zwischen den Objektbestandteilen *Inneres*, *Rand* und *Äußeres* unterschieden. Bildet man alle möglichen Schnitte der Bestandteile zweier Objekte erhält man eine eindeutige Aussage, welche Relation vorliegt. Bei der Schnittbildung ist die konkrete geometrische Form des jeweiligen Schnitts unbedeutend. Lediglich die Existenz ist von Interesse. Die Schnittergebnisse lassen in übersichtlicher Form innerhalb einer Matrix (*Intersectionmatrix*) anordnen. Jede Relation verfügt über ein ganz bestimmte und daher eindeutige Matrixzusammensetzung, die somit zur Zuweisung der vorliegenden Relation genutzt werden kann (Abb. 6). Beziehungen zwischen den Relationen lassen sich durch ein Relationen-Graphen (Conceptual-Neighborhood-Graph) ausdrücken (Abb. 7) (Egenhofer, Al-Taha, 1992; Clementini, Di Felice, 1996; Winter, 1996). Er beschreibt den Übergang von Relationen, wenn Änderungen in der Geometrie angebracht werden und veranschaulicht so die Nachbarschaften zwischen den Relationen.

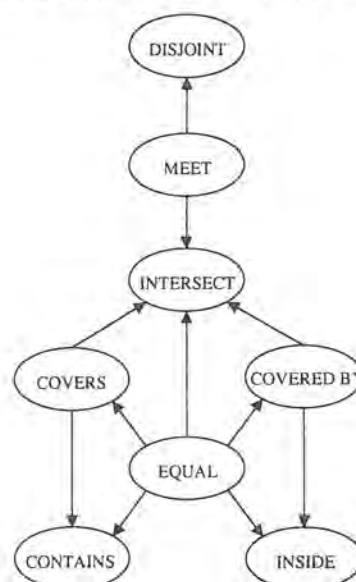


Abb. 7: Relationengraph (Conceptual-Neighborhood-Graph) nach Winter (1996)

Aus dem Graph kann abgeleitet werden, daß einige Relationen *stabil*, d.h. während Änderung über längere Zeit bestand haben und andere dagegen *labil* sind, d.h. sofort bei Änderung in andere übergehen. Bei den labilen Relationen handelt es sich um diejenigen, die aufgrund der speziellen Betrachtung des Randes vorliegen. Dazu zählen: *Meet*, *Covers*, *Covered By*, und *Equal*. Da bei Berücksichtigung der geometrischen Genauigkeit der Rand stets unsicher ist, werden diese Relationen ebenfalls entsprechend unsicher vorliegen. Aus diesem Grund konzentrieren sich die weiteren Betrachtungen zunächst auf die stabilen Relationen: *Disjoint*, *Intersect*, *Contains* und *Inside*. Um eine einfachere Bewertung der vorliegenden Relationen zu ermöglichen, wird der Relationengraph in zwei Teile aufgetrennt (Winter, 1996). Die Teilung erfolgt zentral durch die Relation *Intersect*, die die Überlappung der Objekte kennzeichnet. Aufgrund des Grades der Überlappung wird diese Relation aufgeteilt in eine *schwache* Überlappung (*Weak Intersect*) und eine *starke* Überlappung (*Strong Intersect*). Es entstehen die Relationengruppen (*Relationencluster*) C_1 und C_2 mit:

$$C_1 = \{\text{Weak Intersect}, \text{Disjoint}\}$$

$$C_2 = \{\text{Strong Intersect}, \text{Contains}, \text{Inside}\}$$

Zur Entscheidung kann der Überlappungsfaktor *OF* genutzt werden:

$$OF(A, B) = \frac{\text{Fläche}(\text{Norm}_A \cap \text{Norm}_B)}{\min(\text{Fläche}(\text{Norm}_A), \text{Fläche}(\text{Norm}_B))}$$

Norm bezeichnet die Normalgeometrie der Objekte. Welche Gruppe gültig ist, definiert sich durch:

$$OF \leq 0.5: C_1$$

$$OF > 0.5: C_2$$

Die Festlegung einer Gruppe hat den Sinn, daß nur die Relationen dieser Gruppe zu bewerten sind. Für alle anderen Relationen kann pauschal angenommen werden, daß diese *sicher nicht* zutreffen werden. Damit ist stets nur die geringste Anzahl an Relationen wirklich zu bewerten.

Die Vorgehensweise bei der Bewertung der Unsicherheit von Relationen unterteilt sich in zwei Hauptschritte (Krauß, 1998). Im ersten Schritt werden die exakten Relationen für alle möglichen Kombinationen (insgesamt 9) der beiden Objektgeometrien ermittelt und die Ergebnisse in einer *Relationenmatrix* zusammengefaßt. Dazu gilt eine Kodierung der ermittelten Relation in folgender Form:

$$r_{rel}(A, B) = \begin{cases} 0 = \text{DISJOINT}(A, B) \\ 1 = \text{INTERSECT}(A, B) \\ 2 = \text{CONTAINS}(A, B) \\ 3 = \text{INSIDE}(A, B) \end{cases}$$

Die Relationenmatrix besitzt folgendes Aussehen:

$$R^9 = \begin{pmatrix} r_{rel}(\text{Max}_A, \text{Max}_B) & r_{rel}(\text{Norm}_A, \text{Max}_B) & r_{rel}(\text{Min}_A, \text{Max}_B) \\ r_{rel}(\text{Max}_A, \text{Norm}_B) & r_{rel}(\text{Norm}_A, \text{Norm}_B) & r_{rel}(\text{Min}_A, \text{Norm}_B) \\ r_{rel}(\text{Max}_A, \text{Min}_B) & r_{rel}(\text{Norm}_A, \text{Min}_B) & r_{rel}(\text{Min}_A, \text{Min}_B) \end{pmatrix}$$

mit *Max* als Maximum, *Norm* als Mittel und *Min* als Minimum. Theoretisch können insgesamt $n = 4^9$ verschiedene Matrizen entstehen, von denen aber nur $\bar{n} = 400$ in der Realität

vorkommen. Ein Beispiel für das Aussehen der Relationenmatrix ist der Abb. 8 zu entnehmen.



Abb. 8: Beispiel für die Bestimmung der Relationenmatrix

Der zweite Schritt nutzt die Relationenmatrix zur Bewertung der möglichen Relationen. Vor der eigentlichen Bewertung wird zunächst mit Hilfe des Überlappungsfaktors *OF* eine Entscheidung über das momentan gültige Relationencluster herbeigeführt. Damit sind die zu bewertenden Relationen festgelegt. Die Beschreibung der Unsicherheit erfolgt wiederum in qualitativer Weise durch Hinzufügen eines Wertungsprädikats. Hierzu eignen sich ebenfalls die bereits bekannten Begriffe: *sicher*, *möglicherweise*, *möglicherweise nicht* und *sicher nicht*. Allen Relationen ist nun eine Wertung zuzuweisen. Als Entscheidungskriterium ist die Häufigkeit n_{rel} des Vorkommens der jeweiligen Relation in der Relationenmatrix zu bestimmen. Die abschließende Bewertung folgt dem folgenden Schema:

$n_{rel} = 9$: *sicher*
 $6 \leq n_{rel} < 9$: *möglicherweise*
 $0 < n_{rel} < 6$: *möglicherweise nicht*
 $n_{rel} = 0$: *sicher nicht*

Je ein Beispiel für die Bewertung innerhalb der beiden Relationengruppen sind in Abb. 9 bzw. in Abb. 10 zu sehen.

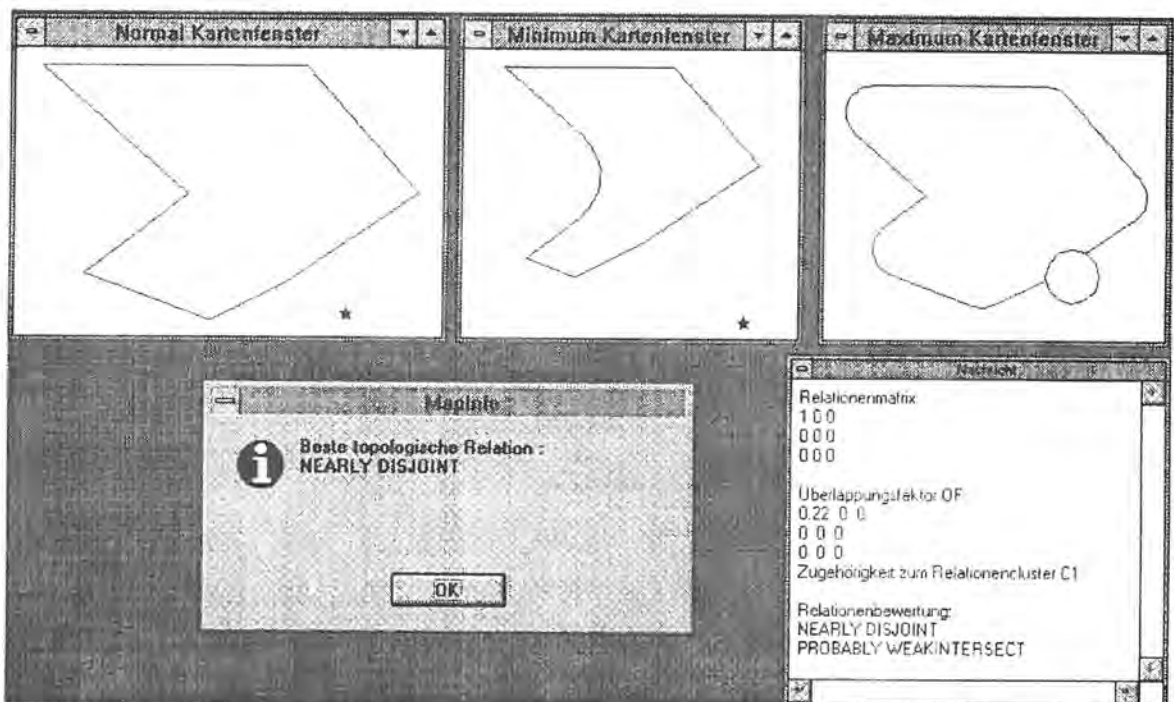


Abb. 9: Beispiel für die Bewertung von unsicheren Relationen mit *Disjoint* als beste Relation

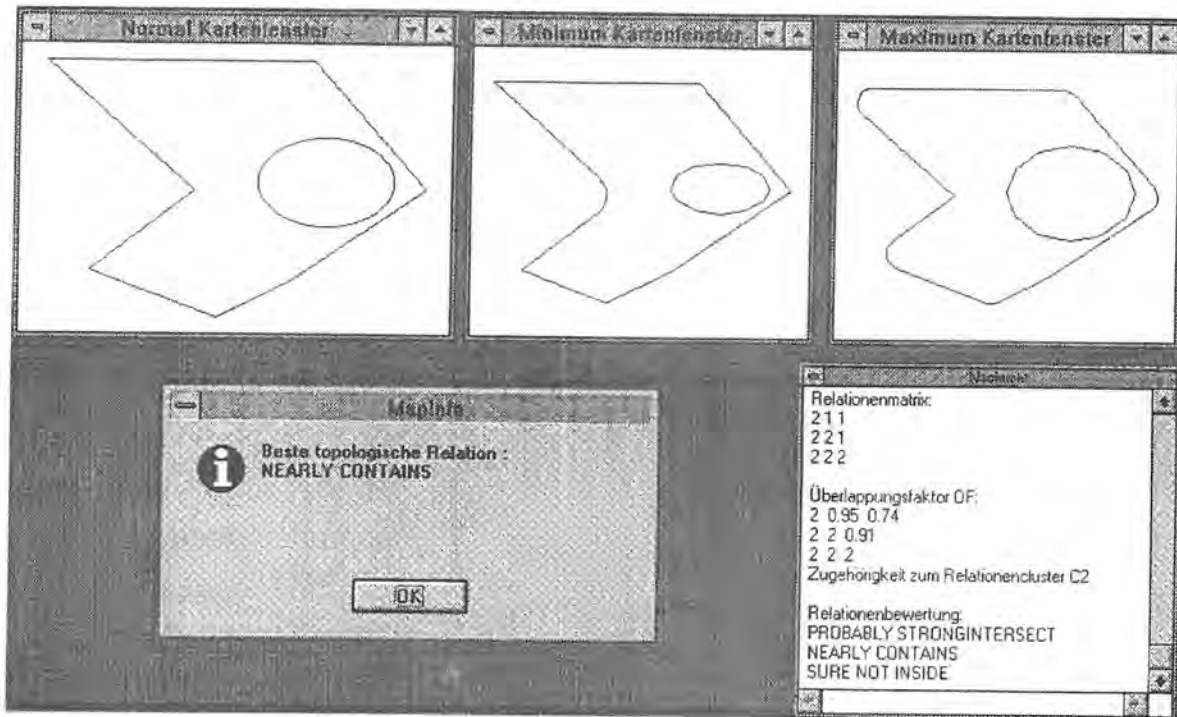


Abb. 10: Beispiel für die Bewertung von unsicheren Relationen mit *Contains* als beste Relation

Die unsichere Relation, für die die Häufigkeit n_{rel} maximal ist, kann als *beste Relation* bezeichnet werden. Wenn mehrere unsichere Relationen gleiche Häufigkeiten aufweisen, so sollte man sich immer für *Intersect* als beste Relation entscheiden, da diese am häufigsten auftritt.

Um nun auch eine Bewertung der labilen Relationen (*Meet*, *Covers*, *Covered By*, *Equal*) zu ermöglichen, sind die auftretenden Kombinationen von Relationen in der Relationenmatrix weitergehend zu analysieren. Dabei besitzt die Eigenschaft dieser Relationen, im Relationengraph zwischen mehreren stabilen Relationen zu liegen, besondere Bedeutung. Enthält die Relationenmatrix ein ausgeglichenes Verhältnis von Relationen (z.B. $n_{Intersect} = n_{Disjoint} = 4$), dann kann für die dazwischen liegende labile Relation (hier: *Meet*) ein Zutreffen angenommen werden. Da labile Relationen aber nur sehr kurzlebige Zustände darstellen, ist die Bewertung stets als *möglicherweise nicht* anzugeben. Dementsprechend werden labile Relationen nur dann als beste Relationen ausgewählt, wenn ihre Nachbarrelationen ebenfalls nur *möglicherweise nicht* zutreffen. Ein Beispiel für die Bewertung von labilen Relation ist in Abb. 11 gegeben.

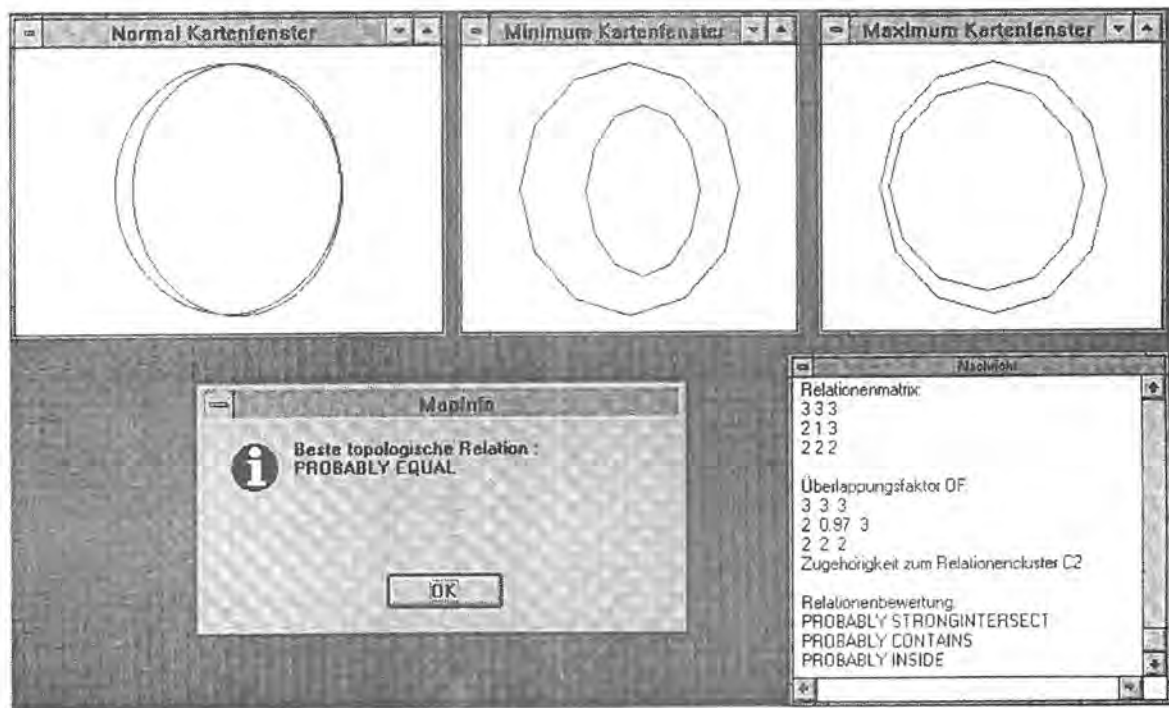


Abb. 11: Beispiel für die Bewertung von unsicheren Relationen mit *Equal* als beste Relation

5 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Integration der geometrischen Genauigkeit in ein GIS. Die Integration erfordert die Definition eines Genauigkeitsmodells. Hierfür wurde das Minimum-Maximum-Modell formuliert, das die Variation in der Geometrie durch Festlegung von minimalen und maximalen Ausdehnungen eines Objektes eingrenzt. Neben verschiedenen Aspekten, die bei der Umsetzung des Modells in einem System zu beachten sind, konzentrierten sich die Ausführungen auf die Berücksichtigung der Genauigkeiten innerhalb von Analysen. Drei in GIS häufig verwendete Funktionen standen dabei im Mittelpunkt: der Punkt-im-Polygon-Test, die geometrische Verschneidung und die Festlegung von topologischen Relationen zwischen den Objekten. Für alle drei Funktionen wurden Verfahren entwickelt, die eine Fortpflanzung der Genauigkeit auf das Ergebnis erlauben und so eine Bewertung der Analyseergebnisse durch den Nutzer ermöglichen. Da generell aber alle Funktionen über eine solche Fortpflanzungskomponente verfügen sollten, bleiben umfangreiche Aufgaben für zukünftige Arbeiten erhalten.

6 Literatur

- Bill, R. 1996: Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 2: Analysen, Anwendungen und neue Entwicklungen. Wichmann, Heidelberg.
- Blakemore, M. (1984): Generalisation and Error in Spatial Data Bases. *Cartographica*, Vol. 21, 131-139, 1984.
- Caspary, W. (1992): Genauigkeit als Qualitätsmerkmal digitaler Datenbestände. In: Grünreich, D., Buziek, G. (Hrsg.) (1992), Gewinnung von Basisdaten für Geo-Informationssysteme. DVW-Schriftenreihe, Heft 4, 157-166.

- Chrisman, N.R. (1982): A Theory of Cartographic Error and its Measurement in Digital Databases. *Auto-Carto 5*, Crystal City, 159-168.
- Clementini, E., Di Felice, P. (1996): An Algebraic Model for Spatial Objects with Indeterminate Boundaries. In: Burrough & Frank (1996), *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries*. ESF-GISDATA, Vol. 2, 155-169, Taylor & Francis, 1996.
- Egenhofer, M.J., Herring, J.R. (1990): A Mathematical Framework for the Definition of Topological Relationships. *Proceedings 4th International Symposium on Spatial Data Handling*, International Geographical Union, Zürich, 803-813.
- Egenhofer, M.J., Al-Taha, K.K. (1992): Reasoning about Gradual Changes of Topological Relationships. In: Frank, A.U., Campari, I., Formentini, U. (Hrsg.): *Theories and Models of Spatio-Temporal Reasoning in Geographic Space*. LNCS639, Springer, Berlin, 196-219.
- Glemser, M. (1994): Behandlung der Genauigkeit räumlicher Daten in Geo-Informationssystemen. In: *Die benutzte Erde*. Alfred-Wegener-Stiftung (Hrsg.), Ernst&Sohn, Berlin.
- Glemser, M. (1996): Integration der geometrischen Datenqualität in GIS-Funktionen. In: *Proceedings des Workshops: Datenqualität und Metainformation in Geo-Informationssystemen*, Universität Rostock.
- Krauß, S. (1998): Qualitative Beschreibung von unsicheren topologischen Relationen innerhalb des Minimum-Maximum-Modells. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/education/diplomarbeiten>.
- Schneider, C. (1998): Integration der geometrischen Genauigkeit in MapInfo nach dem Minimum-Maximum-Modell. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart (unveröffentlicht).
- Winter, S. (1996): Unsichere topologische Beziehungen zwischen ungenauen Flächen. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, München, 1996.

ARC/INFO und Satellitenfernerkundung

Stefan Güth

Heutzutage basieren die unterschiedlichsten Erdbeobachtungen auf Satellitendaten. Vieles kann nur „von außen“ ermittelt werden. Beispielsweise können wir täglich in den Nachrichten Bilder der aktuellen Wettersituation sehen, die von Wettersatelliten aufgenommen werden. Die Satellitenfernerkundung ist aber mittlerweile auch ein effizientes Werkzeug, um flächendeckende Landnutzungsdaten zu erzeugen. Für den speziellen Fall der agrarischen Anwendungen beschreibt dieser Artikel einen Teil der Einsatzmöglichkeiten des Geographischen Informations-Systems (GIS) ARC/INFO.

EU-Agrarstatistik

Die gemeinsame Agrarstatistik der Europäischen Union (EU) braucht präzise und aktuelle Landnutzungs- und Ertragsdaten von allen Mitgliedsländern, um die gesamte Nahrungsmittelproduktion ermitteln und steuern zu können. In den einzelnen Mitgliedsländern werden derartige Daten jedoch unterschiedlich erfaßt, wodurch ein Vergleich bzw. eine Zusammenfassung der unterschiedlichen Statistiken nicht einfach ist. Hier können Fernerkundungsdaten von Satelliten Abhilfe leisten, denn damit können flächendeckende Bilder der Erdoberfläche aufgenommen werden.

EU-Projekt MARS

Die EU hat schon 1989 das Pilotprojekt MARS (Monitoring Agriculture with Remote Sensing) in Auftrag gegeben, in dem untersucht wird, inwieweit sich Satellitendaten zur dauernden Beobachtung der agrarischen Landnutzung eignen. In diesem Projekt wurden zum Teil beachtliche Ergebnisse erzielt, indem gezeigt werden konnte, daß mittels Satellitenfernerkundung vor allem in den südlichen Ländern der EU bemerkenswerte Verbesserungen der Schätzung von Anbauflächen und Erträgen möglich sind. In Ländern, die jedoch schon bisher über ein fortgeschrittenes statistisches Instrumentarium zur Feststellung von Anbauflächen und Erträgen auf terrestrischer Grundlage verfügen, konnte den hohen Genauigkeitsanforderungen bzw. der Verlässlichkeit über die Jahre hinweg nicht genüge getragen werden (Stadler 1995). Dies liegt unter anderem daran, daß Bewölkung und andere atmosphärische Störungen (Dunst, Kondensstreifen, Aerosole durch Umweltverschmutzungen) die Nutzung von optischen Satellitendaten häufig behindern. Entsprechende Erfahrungen wurden auch in verschiedenen Fernerkundungsprojekten des INS gemacht (Güth et al. 1995).

Radar-Satellitendaten

Es lag deshalb nahe, Fernerkundungsdaten zu verwenden, die nicht durch atmosphärische Störungen beeinflußt werden. Mit den Europäischen Radar Satelliten (ERS-1 und ERS-2), die in den Jahren 1991 bzw. 1995 von der ESA (European Space Agency) auf ihre Erdumlaufbahnen gebracht wurden, stehen derartige Daten zu Verfügung. Jeder Überflug liefert auswertbare Bilder. Beide Satelliten befinden sich auf polnahen Orbits in einer Höhe von ca. 800 km. Neben anderen Instrumenten tragen beide Satelliten ein sog. SAR (Synthetic Aperture Radar) an Bord. Im Gegensatz zu optischen Fernerkundungssatelliten (passives Aufnahmeverfahren, in dem das Sonnenlicht als Strahlungsquelle ausgenutzt wird) ist das Radar ein aktives Verfahren, bei dem zur Abbildung der Erdoberfläche Mikrowellen auf die Erde gesandt werden (ca. 23° Einfallswinkel bei einer kohärenten Wellenlänge von 5,7 cm) und der zurückgestreute Anteil wieder empfangen wird. Beim SAR wird geschickt die Antennenlänge unter Ausnutzung der Flugbewegung „künstlich“ vergrößert (Synthetische Apertur), wodurch sich die Auflösung am Boden vergrößert (4 x 20 m). Anders gesagt: Die Antennenlänge wird klein gehalten, bei gleicher Flughöhe im Orbit und gleicher Auflösung am Boden wären näm-

lich ca. 1,7 km nötig. Mit Hilfe eines aufwendigen Rechenverfahrens (SAR-Processing) wird das Bild synthetisch aus Einzelteilen unter erneuter Berücksichtigung der Flugbewegung zusammengesetzt. Auf diese Art und Weise entstehen neuartige Abbildungen der Erdoberfläche, die auch Informationen von landwirtschaftliche Flächen beinhalten.

ARC/INFO im Projekt EMAP

Im Rahmen des Fernerkundungsprojekts EMAP (ERS-SAR Data for Monitoring Agricultural Land Use as a long Term Project, (Reich und Güth 1998) untersucht das INS die Eignung der ERS-1/2 Daten hinsichtlich ihrer Nutzung für agrarische Anwendungen im Untersuchungsgebiet „Ostalb“ (siehe Abb. 1).

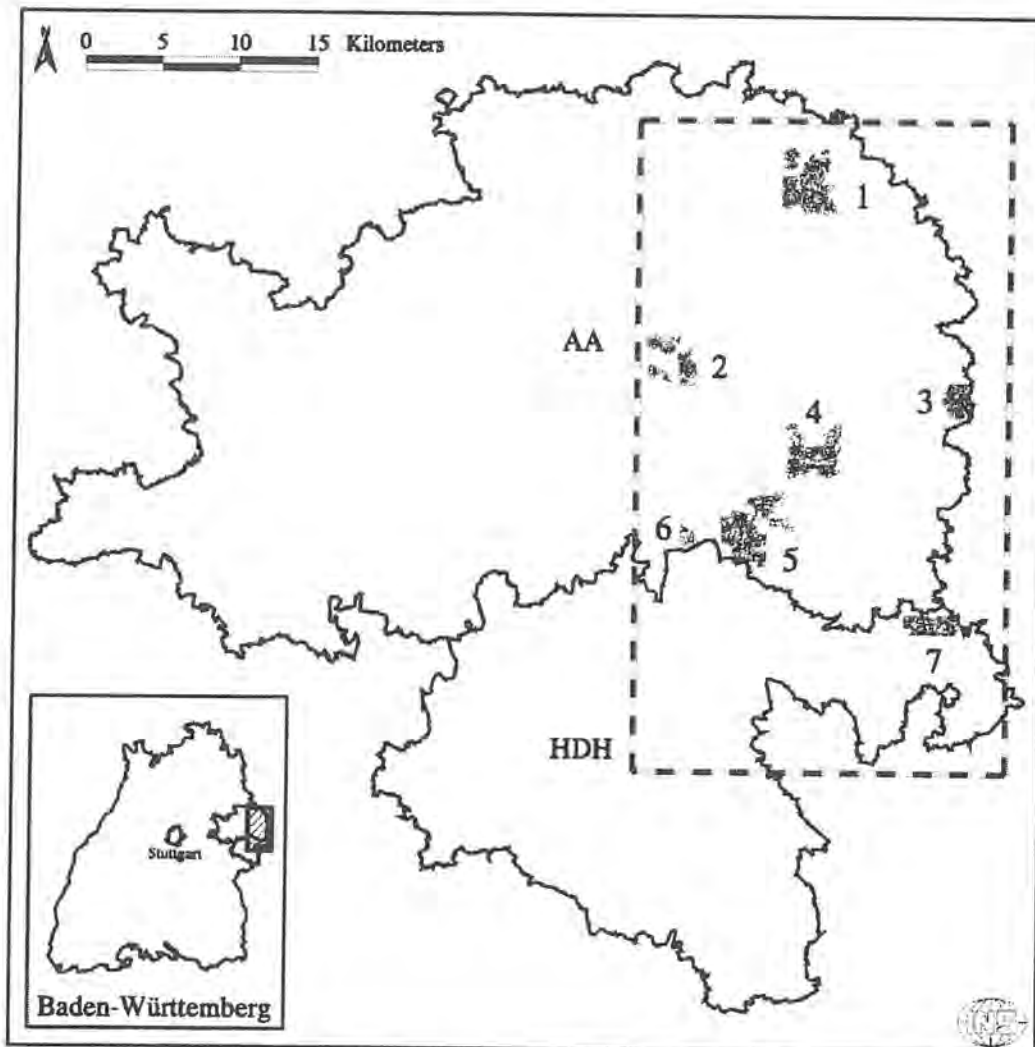


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebiets "Ostalb" sowie der sieben Testgebiete (z.B. Nr. 5 = Elchingen) in den Landkreisen Ostalbkreis (AA) und Heidenheim (HDH)

ARC/INFO dient hierbei als wichtiges Werkzeug zur Unterstützung der Satellitenfernerkundung. Abb. 2 soll die Rolle von ARC/INFO verdeutlichen, ohne an dieser Stelle näher auf die Einzelheiten der Datenverarbeitung einzugehen. Mit ARC/INFO werden unterschiedliche geographische Informationen als verschiedene Ebenen verwaltet, aktualisiert, analysiert und verschnitten sowie in gewünschter Form für die digitale Bildverarbeitung bereitgestellt. Außerdem werden kartografische Ergebnisse mit dem ARC/INFO-Modul Arc/Plot visualisiert und Präsentationsgrafiken erstellt.

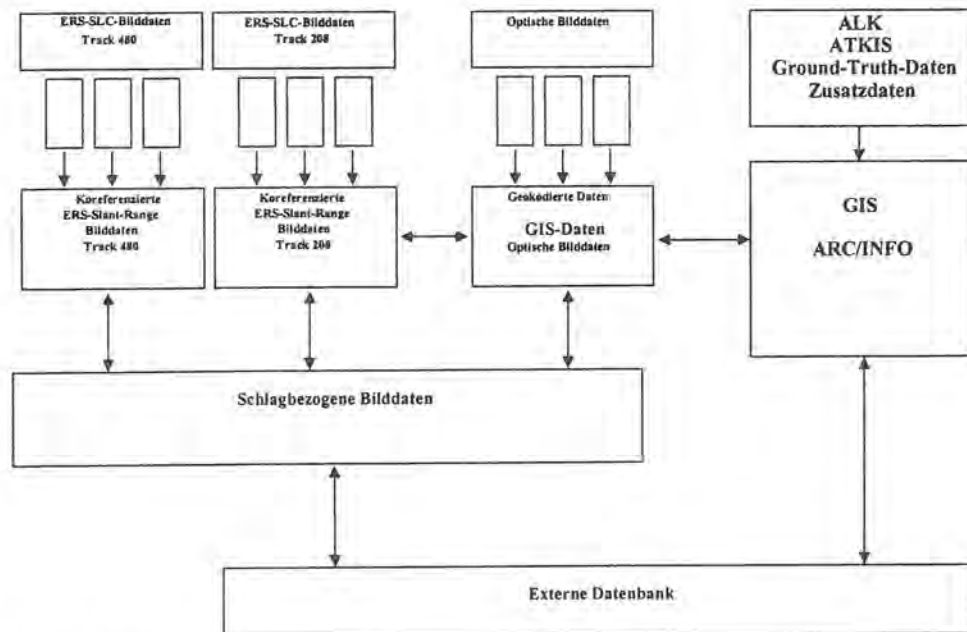


Abb. 2: ARC/INFO und digitale Bildverarbeitung in EMAP

Verwaltung von Ground-Truth-Daten mit ARC/INFO

Um Fernerkundungsdaten besser interpretieren bzw. flächenbezogen auswerten zu können, ist sog. Ground-Truth nötig. D.h. es müssen Daten vorliegen, die die wahren Gegebenheiten der Landoberfläche widerspiegeln und meist am Boden erhoben werden. Landwirtschaftliche Anwendungen konzentrieren sich natürlich auf landwirtschaftlich genutzte Flächen. Andere Gebiete wie z.B. Wälder, Gewässer, bebaute Flächen können im Satellitenbild mit Hilfe von kartografischen Informationen maskiert bzw. ausgeblendet werden. Hierfür steht in Baden-Württemberg mit ATKIS (Amtliches Topographisches Kartographisches Informations-System) des Landesvermessungsamts eine hervorragende Datenbasis zur Verfügung. Die ATKIS Daten werden hierfür in das ARC/INFO Format konvertiert. Dann können die oben genannten Landnutzungsklassen aus dem GIS extrahiert, dem Satellitenbild überlagert und damit aus der Weiterverarbeitung ausgeblendet werden.

Ermittlung der Nutzungsgrenzen

Vom Landesvermessungsamt Baden-Württemberg ist mit dem Automatisierten Liegenschafts-Kataster (ALK) eine weitere digitale Ebene erhältlich. Am INS dienen diese Daten als Grundlage zur Kartierung von landwirtschaftlichen Flächen, die als „geeichte“ Stichproben für die aus Satellitendaten zu klassifizierende Landnutzung dienen. Die im ALK vorhandenen Grenzenlinien (Vektoren) repräsentieren die jeweiligen Parzellen bzw. Eigentumsgrenzen. Die aktuellen Grenzen der verschiedenen landwirtschaftlichen Kulturen müssen jedoch jährlich aktualisiert werden, da sie vielfach nicht mit den Eigentumsgrenzen übereinstimmen, z.B. aufgrund von agrarökologischen Gegebenheiten oder aufgrund des Fruchtwechsels im Rahmen der Fruchtfolge, wegen Änderung der Pachtverhältnisse oder der Agrarpolitik. In den einzelnen Testgebieten (siehe Abb.1) werden dementsprechend Feldkampagnen durchgeführt. Hierfür wird ein Uni-Kfz mit einer mobilen GPS Station (Global Positioning System) ausgerüstet. Die einzelnen Felder (Schläge) werden damit entlang der Feldwege vermessen. Man erhält einzelne Koordinatenpunkte, die in ARC/INFO eingelesen werden und zu einer Karte der aktuellen Nutzungsgrenzen verarbeitet werden. Auf der linken Seite von Abb. 3 ist am

Beispiel von Elchingen die ALK-Vektorstruktur mit den Koordinatenpunkten dargestellt, rechts ist die resultierende Vektorstruktur der aktuellen Nutzungsgrenzen abgebildet.



Abb. 3: Gemarkung Elchingen, Härtsfeld, Ostalbkreis, 5 × 5 km. Links: Vektorstruktur des Automatisierten Liegenschaftskatasters mit GPS Meßpunkten. Rechts: Vektorstruktur der aktuellen Nutzungsgrenzen 1998

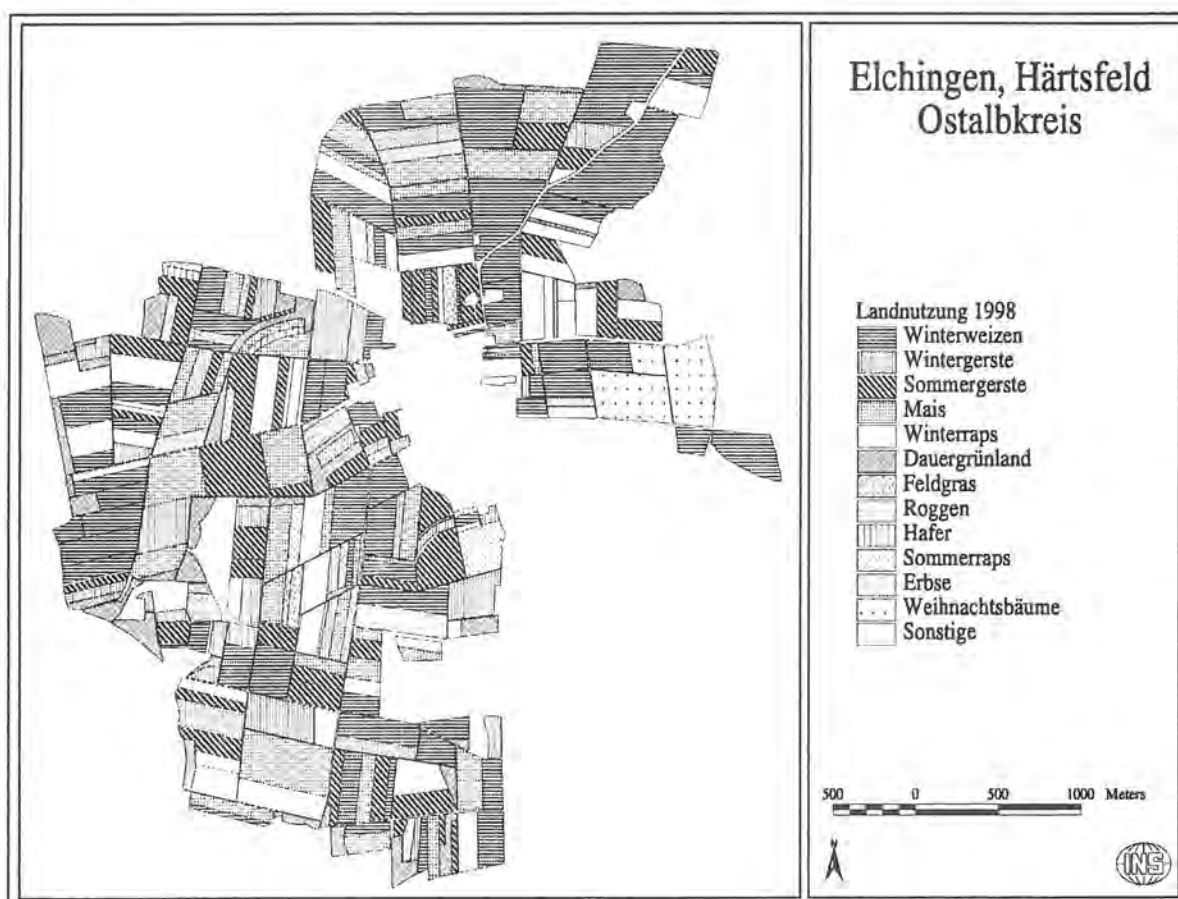


Abb. 4: Landnutzungskarte von Elchingen 1998

Gleichzeitig mit der Vermessung der Flächen wird auch noch die jeweilige Landnutzung in eine provisorische Feldkarte eingetragen. Auf Grundlage der aktualisierten Vektorstruktur wird dann am Bildschirm menügesteuert (unter Arc/Edit) die Landnutzung ins GIS übertragen. So entstehen aktuelle Landnutzungskarten der ausgewählten Testgebiete. Abb. 4 illustriert eine derartige Karte am Beispiel von Elchingen.

Im Vergleich mit Abb. 3 ist in Abb. 4 außerdem gut zu erkennen, daß beispielweise die versiegelten Flächen (Bebauung, Straßen) ausgeblendet (maskiert) wurden.

Statistiken mit AML

Aus ARC/INFO können z.B. mit Hilfe eines einfachen AML-Programms (Arc Macro Language) für jede Landnutzungskarte die korrespondierenden Statistiken der landwirtschaftlich genutzten Flächen abgerufen werden (vgl. Tab. 1).

GIS-Code	Nutzung	Ges. Anzahl	Ges. Fläche [ha]	Durchschnitt Fläche [ha]	Min. Fläche [ha]	Max. Fläche [ha]	Anzahl > 1 ha	Anzahl > 80 m Breite
70	Winterweizen	65	289,3	4,5	0,4	22,5	59	45
130	Silomais	37	153,9	4,2	0,5	16,4	33	21
76	Sommergerste	50	144,2	2,9	0,4	13,0	44	25
110	Winterraps	30	112,2	3,7	0,4	7,8	27	20
75	Wintergerste	32	100,8	3,1	0,6	9,4	28	16
142	Dauergrünland	45	75,1	1,6	0,4	4,9	30	9
149	Weihnachtsbäume	3	31,2	10,4	3,8	14,0	3	3
129	Feldgras	14	25,1	1,8	0,5	4,0	11	2
111	Sommerraps	4	11,1	2,8	0,5	7,2	2	0
85	Erbsen	4	10,7	2,7	1,6	4,3	4	1
74	Roggen	2	9,6	4,8	1,4	8,2	2	1
134	Futtergemenge	5	6,3	1,3	0,9	2,1	4	0
151	Schwarzbrache	4	6,2	1,6	0,8	3,2	2	2
77	Hafer	3	5,2	1,7	1,3	2,3	3	1
152	Biotopfläche	1	3,0	3,0	3,0	3,0	1	1
128	Luzerne	1	2,5	2,5	2,5	2,5	1	0
135	Ackersenf	1	2,1	2,1	2,1	2,1	1	0
140	Baumschule	1	0,8	0,8	0,8	0,8	0	0
93	Kartoffel	2	0,5	0,3	0,2	0,4	0	0
185	Hecke	1	0,4	0,4	0,4	0,4	0	0
	Summe	305	990,1				255	147

Tab. 1: Flächenstatistik der landwirtschaftlichen Nutzung in Elchingen 1998 basierend auf GPS-vermessen Feldern (nach kartierter Gesamtfläche sortiert)

Die gewünschten GIS-Ebenen werden dann aus ARC/INFO extrahiert und für die digitale Bildverarbeitung konvertiert, damit sie den Satellitenbildern überlagert werden können.

ERS-2 Radarszenen

Abb. 5 zeigt für das Gebiet Elchingen (vgl. Abb.3 und 4) einen Ausschnitt aus einer ERS-2 SAR Szene vom 23.6.98. Unterschiedlich genutzte Felder stellen sich in verschiedenen Grautönen dar. Das SAR-spezifische Rauschen läßt eine schärfere Abbildung der Erdoberfläche bisher noch nicht zu. Jedoch stehen solche Bilder im etwa 17-tägigen Turnus zur Verfügung. Durch geschickte Ausnutzung der resultierenden Zeitreihen kann unter Zuhilfenahme

von Flächen bekannter Landnutzung (als sog. Trainingsfelder) auf Flächen unbekannter Nutzung geschlossen und dementsprechend die Landnutzung klassifiziert werden.



Abb. 5: Ausschnitt einer ERS-2 SAR Szene vom 23.6.98 Testgebiet Elchingen mit überlagerter Vektorstruktur der 98er Landnutzung

Literatur:

- Stadler R (1995): Operationalisierungs- und Akzeptanzprobleme der Fernerkundung in der Agrarstatistik; in: Baden-Württemberg in Wort und Zahl, Heft 5, Stuttgart 1995
- Güth S, Klaedtke H-G, Tschiang C T (1995): Flächenbestimmung von Kulturpflanzenbeständen aus Landsat 5 TM Daten in: Hartl Ph, Stadler R (1995): Einsatz von Satellitendaten zur Bestimmung der Bodennutzung und Ertragsermittlung in Baden-Württemberg, Abschlußbericht, Stuttgart 1995
- Reich M, Güth S (1998): Improvement of agricultural land use information from multitemporal ERS-SAR data for test site "Ostalb" / Germany; Proceedings of 2nd International Workshop on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications 21-23.10.98 ESTEC, Noordwijk, Netherlands; SP-441; pp.141-149.

Dokumentation und Analyse von Erbebenshäden an Gebäuden mit Hilfe eines Geo-Informationssystems

Steffen Volz und Monika Sester

1. Einführung

Der grundlegende Ansatz des von der Volkswagen-Stiftung unterstützten Projektes zum Thema „Dokumentation und Analyse von Erbebenshäden mittels Geo-Informationssystemen“ bestand darin, die Schadenserfassung und –auswertung von beeinträchtigten Gebäudestrukturen durch den Einsatz digitaler Techniken effizienter zu gestalten. Hiermit sollte ein Beitrag dazu geleistet werden, die Folgeerscheinungen bzw. Folgeschäden von Naturkatastrophen dieser Art soweit wie möglich zu minimieren.

Für die Umsetzung dieser Zielsetzung konnte eine neue Methodik entwickelt werden, die sich durch die Kombination digitaler photogrammetrischer Prozeduren zur Erfassung der Schäden mit dem Einsatz eines Geo-Informationssystems zum Zwecke der Schadensauswertung und -dokumentation auszeichnet.

In der ersten Projektphase lag das Gewicht auf der Erstellung eines Datenmodells sowie auf der Entwicklung eines durchgängigen Konzeptes zur Zusammenführung und Auswertung der erfaßten Daten innerhalb des GIS. Dahingegen stand im zweiten Projektabschnitt die Optimierung der Vorgehensweise im Hinblick auf die in der Praxis aufgetauchten Problematiken, insbesondere der Digitalisierung von Objektstrukturen, im Vordergrund. Außerdem wurden in dieser Phase auch neue Techniken einbezogen, von denen man sich eine weitere Verbesserung der Methodik erhofft. In erster Linie ist hier die Integration der dritten Dimension zu nennen.

2. Die Aufgaben der ersten Projektphase

Die Beschreibung von Objekten und damit die Erstellung eines Datenmodells ist die Voraussetzung für die Arbeit mit Geo-Informationssystemen. Demzufolge stellte diese Aufgabe auch einen wichtigen ersten Schritt bei der Bearbeitung des Projektes dar. Darüber hinaus mußte auf die Erfassung der geometrischen Information mittels photogrammetrischer Methoden (über das System photogrammetrische Auswertesystem PICTRAN) und deren Überführung in das GIS (ArcView) eingegangen werden. Nach der Zusammenführung aller Daten innerhalb des Geo-Informationssystems (vgl. Abbildung 1) konnte schließlich eine Vorgehensweise zur Schadensanalyse innerhalb des eingesetzten Systems ArcView entwickelt werden.

Die folgenden Ausführungen sollen kurz noch einmal auf die Grundprinzipien bei der Entwicklung der Methodik im ersten Förderungszeitraum eingehen.

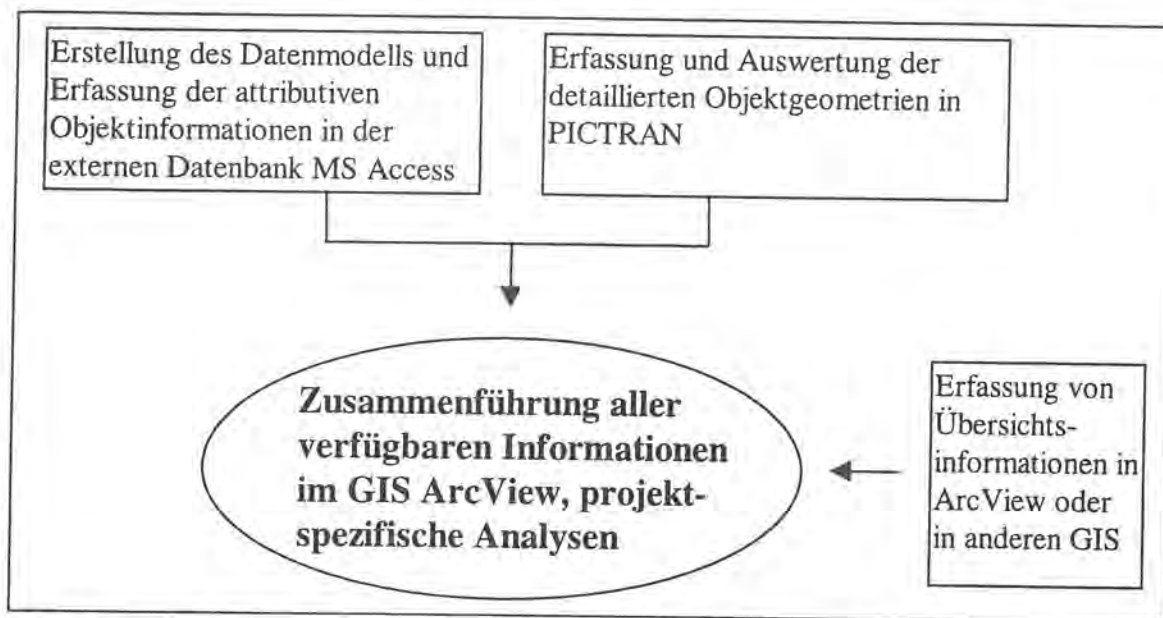


Abbildung 1: Überblick über die Integration von geometrischer und thematischer Gebäudeinformation in einem GIS.

2.1 Erstellung des Datenmodells zur Gebäude- und Schadensdokumentation

Die Beschreibung der aufzunehmenden Objekte mußte der Aufgabenstellung des Projektes entsprechend eine sehr hohe Auflösung erreichen, d.h. die Gebäudeobjekte mußten sehr detailliert über Attribute definiert werden. Dies erforderte zunächst eine intensive Zusammenarbeit mit türkischen Bauingenieuren, mit deren Hilfe sämtliche zur Kennzeichnung der verschiedenen Objekte heranzuziehenden Sachdaten ausfindig gemacht wurden.

Grundsätzlich gesehen mußte im Rahmen der Untersuchung ein Datenmodell integriert werden, das die Beschreibung der verschiedenen Gebäudetypen sowie der an ihnen auftretenden Schadensmerkmale ermöglicht. In erster Linie wurde dabei ein analoger Schadenserfassungsbogen, welcher bei der Dokumentation der Gebäudeschäden in der Beispielregion Anwendung gefunden hatte, in digitale Form übertragen. Alle Abfragen sowie die Möglichkeiten zur Berechnung der Schadenswerte von Konstruktionselementen und einzelnen Gebäuden, die innerhalb dieses Formulars angeboten wurden, sollten dadurch auch innerhalb des Geo-Informationssystems realisiert werden können. Um die Übertragbarkeit des Erhebungsbogens in das GIS zu erreichen, wurde er gemäß des Objektklassenprinzips modelliert und in eine schlüssige Tabellenstruktur überführt. Auf dieser Grundlage konnte dann die Datenaufnahme durchgeführt werden, die zwecks einer besseren Handhabung mittels einer externen Datenbank (MS Access) realisiert worden ist.

2.2 Die photogrammetrische Datenerfassung

Zum Zwecke der photogrammetrischen Erfassung und Auswertung von beschädigten Gebäuden mußte ein Objekt nach der Paßpunktbestimmung von allen umgebenden Seiten fotografisch aufgenommen werden. Zusätzlich wurden signifikante Schadensmerkmale in detaillierterem Maße aufgenommen.

Die anschließende Auswertung der Schäden erfolgte durch das Softwarepaket PICTRAN. Hierfür mußte zunächst die äußere Orientierung der Aufnahmestandorte mittels der

Bündelblockausgleichung berechnet werden, die das Programm automatisiert durchführen kann. Die photogrammetrische Analyse der relevanten Gebäude- bzw. Schadensstrukturen umfaßte dann deren Messung sowie die Berechnung abgeleiteter Größen (z.B. Neigungs- und Verschiebungsvektoren), die Anfertigung von Deformationskurven und ähnliches. Diese Informationen mußten schließlich in das GIS transferiert werden, indem sowohl Geometrie als auch Thematik der Objekte im ArcView- bzw. in einem für ArcView lesbaren Format zur Verfügung gestellt wurden.

2.3 Die Analyse der erfaßten Daten im GIS

Nachdem sämtliche notwendigen Daten innerhalb des GIS zusammengeführt werden konnten, war die Voraussetzung für die Entwicklung einer Vorgehensweise zur Analyse der Informationen entsprechend der jeweiligen Fragestellung gegeben. Zum einen sollten dabei Übersichtsinformationen in ihrem räumlichen Zusammenhang präsentiert werden; beispielsweise wurde eine Darstellung sämtlicher Gebäude entsprechend ihrer Schadensgrade innerhalb des digitalen Stadtplanes gewünscht. Diese generellen Auswertungen konnten mit den standardmäßig angebotenen Werkzeugen des GIS problemlos umgesetzt werden.

Der Schwerpunkt der Untersuchung lag jedoch auf der Analyse der Gebäudeinformation. So sollte ein Konzept zur Analyse und Berechnung der Gebäudeschäden sowohl die Berechnungsmethoden auf Basis der attributiven Daten als auch die räumlichen Analysen, die zu einer Kategorisierung der Schäden notwendig sind, integrieren. Die Anpassung des GIS an die projektspezifischen Anforderungen konnte mit Hilfe der ArcView-internen Programmiersprache „Avenue“ verwirklicht werden. Grundsätzlich erfolgte hierbei die Gewichtung von Schadensmerkmalen an Konstruktionselementen über ausgewählte Indikatoren. Die jeweilige Wertung dieser Schadensanzeiger basierte dabei nicht nur auf der Sondierung der attributiven Information, sondern es wurden auch räumliche Analysen einbezogen. Insgesamt konnte schließlich ein Konzept erarbeitet werden, das eine durchgängige und automatisierte Auswertung der Schäden und als Resultat eine Zuweisung eines Schadensgrades („ohne Schäden“ bis „schwere Schäden“) zu einem Gebäude erlaubt (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Visualisierung der Schadensgrade von Gebäuden

3. Die Aufgaben des abschließenden Förderungszeitraums

Innerhalb der vergangenen, abschließenden Projektphase wurde versucht, die entwickelte Vorgehensweise zur Dokumentation und Analyse von Erdbebenschäden an Gebäuden unter Verwendung weiteren Datenmaterials, das u.a. im Zuge eines erneuten, verheerenden Bebens in der Stadt Adana/Türkei (27. Juni 1998) erhoben wurde, im praktischen Einsatz zu testen. Wie erwartet stieß man hierbei auf das Problem, daß die detaillierte Erfassung der Gebäudestrukturen und der Gebäudeschäden in der Praxis noch nicht schnell genug erfolgen kann. Die Methodik muß also besonders im Bereich der Objekterzeugung innerhalb des Geo-Informationssystems, d.h. der Vektorisierung der relevanten Konstruktionselemente von Gebäuden und der zugehörigen Schadensmerkmale, weiter optimiert werden. Zu diesem Zweck sind die Module „Spatial Analyst“ und „Image Analyst“ des ArcView-GIS herangezogen worden, die eine digitale Bearbeitung der in PICTRAN orientierten und photogrammetrisch ausgewerteten Bilder erlauben. Mit Hilfe dieser Module besteht eine Möglichkeit zur semi-automatischen Extraktion erkennbarer Objekte aus dem digital vorliegenden Bild des Gebäudeobjektes. Durch einen standardmäßig angebotenen Algorithmus zur Raster-Vektor-Transformation können die so erkannten Rasterobjekte schließlich in Vektorform umgewandelt werden. Daneben wurde im Rahmen einer Diplomarbeit [M. Celikoyan] ein Verfahren zur semi-automatischen Linienverfolgung entwickelt und implementiert.

Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurde darüber hinaus versucht, die Integration der dritten Dimension ansatzweise zu verwirklichen, die ja besonders bei der Beschreibung und Analyse von Gebäuden von Bedeutung ist. Mit dem 3D-Analyst ArcViews steht dabei ein Werkzeug zur Verfügung, das eine sehr gute Voraussetzung zur Verbesserung der Schadensauswertung und des visuellen Eindrucks beschädigter Gebäude bietet.

Bisher konnten nun einige vielversprechende Ansätze zur weiteren Optimierung der Vorgehensweise verfolgt werden, auf die im folgenden näher eingegangen werden soll. Sowohl auf dem Gebiet der Objekterzeugung, als auch bei der Einbeziehung der dritten Dimension ist jedoch nur ein Anfang gemacht worden und folglich besteht weiterer Untersuchungsbedarf, der über die Terminierung des Projektes hinausreicht.

3.1 Ansätze zur Optimierung der Objekterzeugung

Die grundlegende Problematik bei der Erzeugung von Objekten in der Vektorwelt besteht in einem relativ hohen Digitalisierungsaufwand, der umso höher ist, je mehr Objekte aufgenommen bzw. je detaillierter die Objekte erfaßt werden müssen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung ist es notwendig, sehr viele verschiedene Objekte (von den Konstruktionselementen, wie z.B. Säulen, bis hin zum einzelnen Riß) zu erfassen und dabei eine relativ hohe Auflösung der Objekte zu erreichen. Erst auf Basis der Generierung dieser Objekte ist eine umfassende und durchgängige Schadensanalyse im GIS möglich. Als Zielsetzung muß es daher gelten, den zeitlichen Aufwand bei der Digitalisierung weitgehend zu verringern. Zur Verwirklichung dieser Vorgabe wurden nun drei Ansätze entwickelt, die in Kombination einen sehr vielversprechenden Lösungsweg aufzeigen. Grundsätzlich wird dabei folgendermaßen vorgegangen: die digitalen Bilder der Gebäudefassaden werden innerhalb des photogrammetrischen Analyseprogramms PICTRAN wie bisher orientiert und entzerrt. Die Messung der Objektgeometrien erfolgt anschließend durch Anwendung von Bildanalyseverfahren. Da die Bilder entzerrt worden sind, liegen die Messungen direkt im Gebäudekoordinatensystem vor.

3.1.1 Die interaktive, halbautomatische Objektgenerierung

Der Grundgedanke dieses Ansatzes bestand darin, die manuelle Vektorisierung von Objekten soweit wie möglich zu umgehen und statt dessen mit Bildanalyseoperationen eine automa-

tisierte Objekterzeugung auf Basis der Rasterbildvorlage durchzuführen. Durch das ArcView-Modul „Image Analyst“ bietet das GIS eine Möglichkeit zur digitalen Bildverarbeitung und damit auch zur Extraktion von Strukturen auf der Grundlage ihres Grauwertes an. Die Extraktion der Objekte funktioniert dabei um so besser, je homogener der Grauwert eines Objektes ist bzw. je deutlicher die Abgrenzung gegenüber umgebenden Strukturen zu erkennen ist. Der erste Schritt bei der Bildbearbeitung muß es daher sein, die benötigten Objekte so gut wie möglich „herauszupräparieren“, d.h. mit den geeigneten Bildverarbeitungsprozessen dafür zu sorgen, ein Bild in weitgehend einheitliche Strukturen zu unterteilen. Daraufhin können in einem weiteren Schritt die Objektstrukturen erkannt und in Vektorform transformiert werden, wobei verschiedene Varianten zur Erkennung der Strukturen angeboten werden. Das theoretisch skizzierte Verfahren soll zur besseren Anschaulichkeit anhand eines Beispiels aufbereitet werden:

Die folgende Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt von der Fassade eines Gebäudes, das während des Erdbebens in Adana mittelgroße Schäden erlitt:

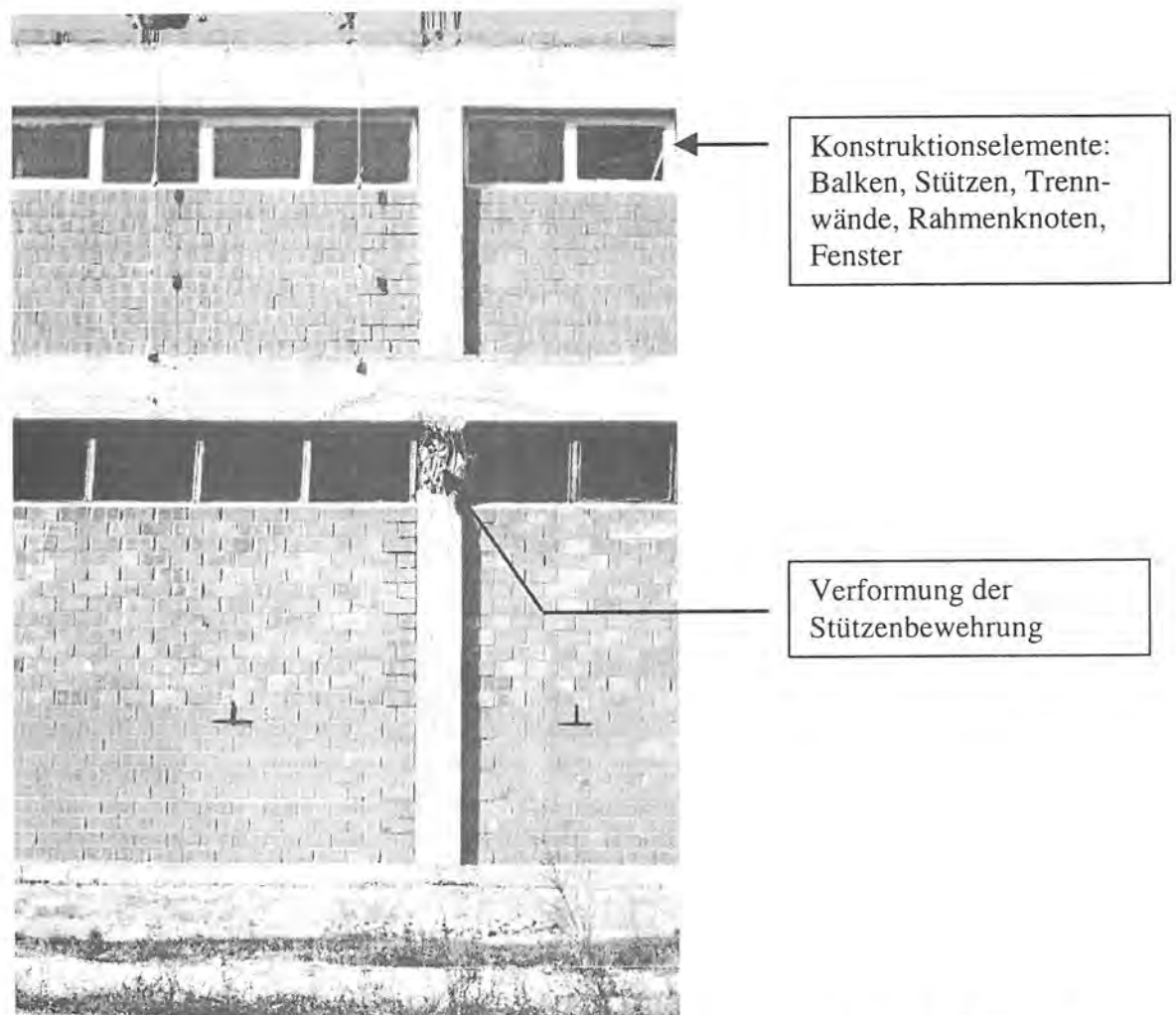


Abbildung 3: Gebäudestruktur, sowie Schäden an einem Gebäude in Adana.

Aufgabe soll es nun sein, aus diesem Bild Objektstrukturen abzuleiten, die für das Projekt von Bedeutung sind. Beim vorliegenden Gebäude vom Typ „Stahlbetonrahmen“ handelt es sich u.a. dabei um die Konstruktionselemente

- Stahlbetonstützen,
- Stahlbetonbalken,
- Rahmenknoten,

- Füllwände,
- Öffnungen (Fenster, Türen),

sowie um die Schadensmerkmale „Risse“. Sämtliche Objekte sind im vorliegenden Bild deutlich zu erkennen. Das Ziel ist es nun, die einzelnen Objekte über Prozeduren der digitalen Bildverarbeitung zu extrahieren und sie anschließend in Vektorform zu überführen. Zunächst ist es dazu sinnvoll, die einzelnen Einheiten in homogenere Grauwertbereiche umzuwandeln, denn die automatische Objekterkennung stößt naturgemäß dort an ihre Schranken, wo Pixel mit stark voneinander abweichenden Grauwerten einem bestimmten Objekt zugehörig sind. Zu diesem Zweck werden innerhalb des ArcView Image Analyst einige Prozeduren standardmäßig angeboten. Neben den homogenen Punktoperationen ist es ferner möglich, den visuellen Eindruck eines Bildes über die Anpassung von Helligkeits- und Kontrasteinstellungen gemäß der Fragestellung zu manipulieren.

Zur weiteren Bildbearbeitung besteht weiterhin die Möglichkeit, die Grauwerte eines Bildes über Kantenverstärkung bzw. Glättung (Sharpen und Smoothen) so umzugestalten, daß Objektstrukturen leichter erkennbar sind. Hierzu ein Beispiel (Abbildung 4):

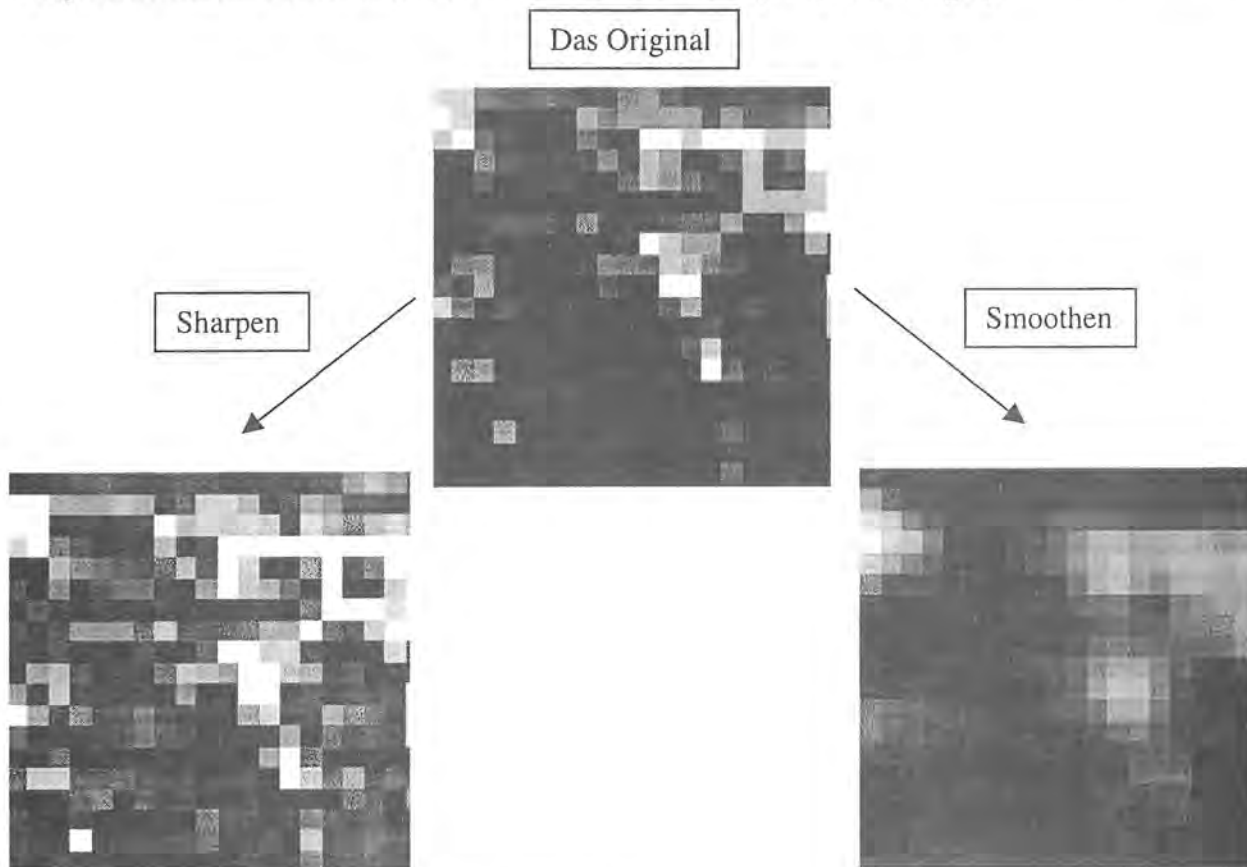


Abbildung 4: Kantenverstärkende bzw. glättende Bildoperatoren.

Wie anhand des dargestellten Vergleichs sehr gut zu erkennen ist, fördert die Prozedur „Smoothen“ eher die Homogenität der Pixel und führt aus diesem Grund zu einer verbesserten Signifikanz der Objekte im Bild. Hat man das Rasterbild nun mit den entsprechenden Verfahren vorbereitet, so kann mit der Extraktion der Objekte begonnen werden.

Bildanalyseverfahren lassen sich prinzipiell in regionenorientierte und kantenbasierte Verfahren unterscheiden. Im ersten Fall wird angenommen, daß die Objekte sich aus

homogenen Grauwerten zusammensetzen, während die Prämisse im zweiten Fall ist, daß Objekte durch Kanten begrenzt sind.

3.1.2 Regionenbasierter Ansatz

Für die regionenbasierte Objektbildung steht im Programm Image Analyst ein sog. Bereichswachstumsverfahren zur Verfügung, welches operateursgestützt abläuft. Dabei kann der Anwender über die Auswahl eines oder mehrerer Pixel einen Merkmalsraum bzw. ein Wertebereich definieren, dessen Inhalt die Grundlage für die Objektbildung des resultierenden Polygons darstellt. Will man nun mittels dieser Methode Stützen und Balken aus dem oben gezeigten, der Smooth-Operation unterzogenen Bild des beschädigten Gebäudes extrahieren, so zeigt sich folgendes Ergebnis (Abbildung 5).

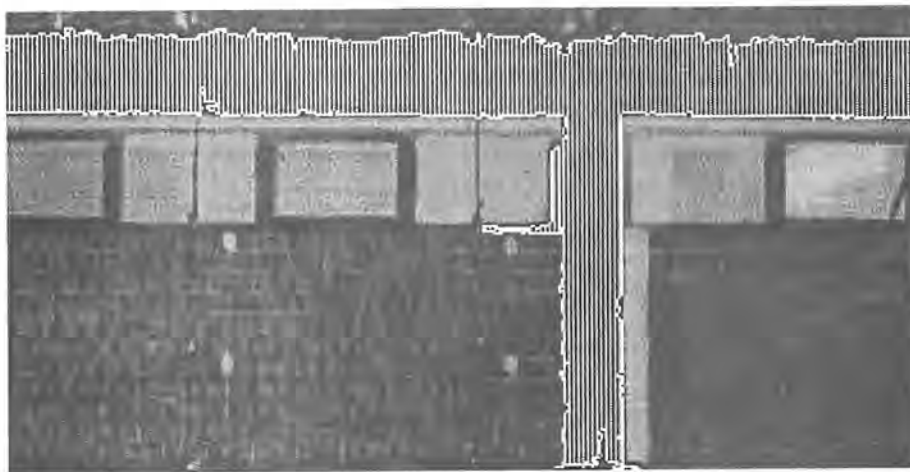
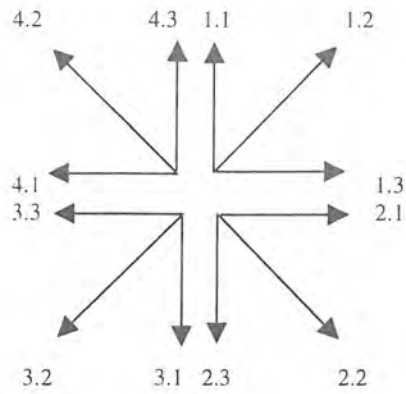


Abbildung 5: Extraktion von Stützen und Balken.

Da es sich um verhältnismäßig einheitliche Bereiche handelt, erscheint auch die Objektstruktur relativ deutlich, obwohl auch hier naturgemäß Unregelmäßigkeiten in Erscheinung treten. Besonders an jenen Stellen, an denen unterschiedliche Strukturen gleicher äußerer Erscheinung, d.h. gleichen Grauwerts im Bild, sich schneiden, kommt es zu Fehlern. So wurde im obigen Beispiel etwa ein Teil eines Fensterrahmens dem Säulenobjekt hinzugerechnet. Bei sehr heterogenen Strukturen, die zum gleichen Objekt gehören, stellt sich das Problem in anderer Weise. Tritt an einem Gebäude beispielsweise ein Riß auf, der in sich eine sehr hohe Bandbreite von Grauwerten aufweist, so kann das Objekt als ganzes nur schwerlich über automatisierte Prozesse erkannt werden, weshalb mehrere Polygone für den bezeichneten Riß produziert werden müssen, die anschließend zu einem einzigen zu vereinigen sind.

3.1.3 Kantenbasierter Ansatz

Im Rahmen einer Diplomarbeit [M. Celikoyan] wurde darüber hinaus ein Verfahren zur interaktiven Kantenfindung bzw. Linienverfolgung entwickelt. Der Operateur gibt dabei einen sog. Saatpunkt vor – einen Punkt, der im zu messenden Objekt liegt. Anschließend sucht das System die Umgrenzungen des Gebiets. Der Algorithmus kann als „Viermal Dreier-Nachbarschaft“ bezeichnet werden. Auf diese Weise kann erreicht werden, daß eine einmal eingeschlagene Suchrichtung auch beibehalten wird. Beim Prinzip „Viermal Dreier-Nachbarschaft“ wird die Suchrichtung wie in untenstehender Abbildung realisiert.



Die erste Zahl gibt hier die primäre Suchrichtung an, die zweite ist der Index für den Nachbarn. Wurde in einem Viertel ein Kantenpixel gefunden, so beginnt die weitere Suche mit dem ersten Nachbarn dieses Viertels. Erst wenn hier keine weiteren Kantenpixel gefunden werden können, erfolgt ein Übergang in ein anderes Viertel. Abbildung 6 zeigt die Anwendung des Programms zur Messung der Begrenzung eines Mauerstücks.



Abbildung 6: Semi-automatische Kantenverfolgung zur Messung eines Mauerstücks.

3.1.4 Die vereinfachte On-Screen- Digitalisierung innerhalb des GIS

Die Abbildung des beschädigten Gebäudes von Adana läßt die verschiedenen Konstruktionselemente sehr deutlich erkennen. Dies stellt jedoch einen Sonderfall dar, denn meistens sind die Strukturen der Konstruktionselemente anhand der Fotografie einer Gebäudefassade wegen des Verputzes nur schwer auszumachen, d.h. sie können in keinem Fall über automatisierte Verfahren vektorisiert werden (siehe Abbildung 7). Aus diesem Grund müssen dem Nutzer des Informationssystems Funktionalitäten zur Verfügung gestellt werden, die eine schnelle Digitalisierung von Strukturen am Bildschirm ermöglichen.

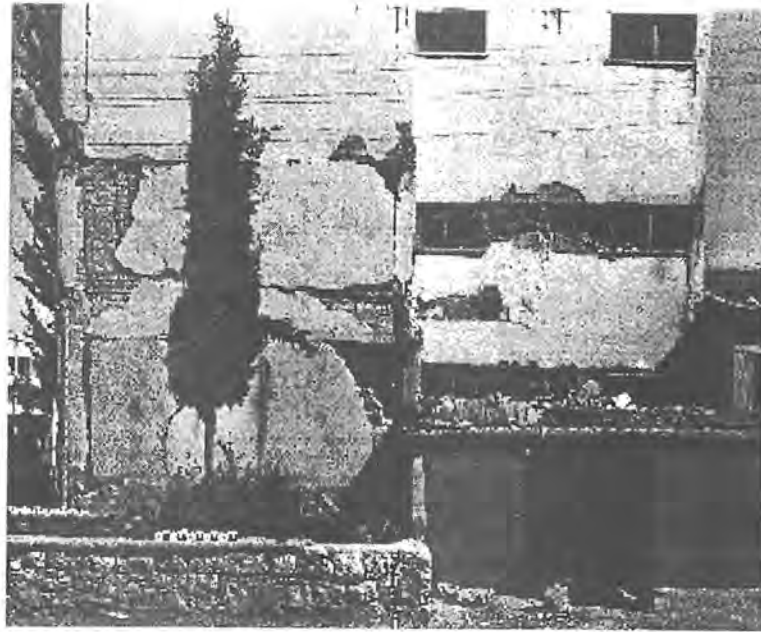


Abbildung 7: Stark beschädigtes Gebäude, bei dem die Identifikation der Konstruktionselemente schwierig ist.

Der Bauingenieur kann aufgrund seines Fachwissens den Verlauf der Konstruktionselemente anhand der Gebäudestruktur nachvollziehen und soll daher in die Lage versetzt werden, diesen Verlauf auch leicht und zügig digital nachzeichnen zu können. Zu diesem Zweck wurde ein in ArcView eine neue Funktionalität integriert, die über ein Zusatzmenü erreichbar ist und das Anlegen von verschiedenen relevanten Themen und das Erzeugen von Objekten innerhalb dieser Themen erleichtert (siehe Abbildung 8).

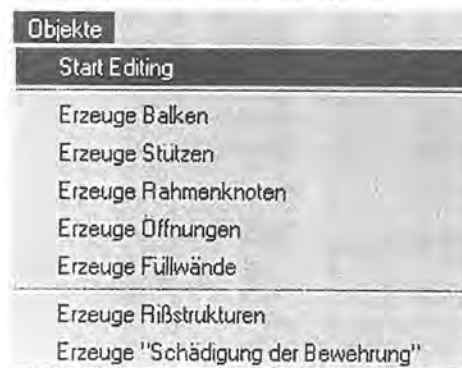


Abbildung 8: Menü zur Erzeugung von Objekten.

Möchte man beispielsweise ein Gebäude digitalisieren und zunächst die Balkenelemente erzeugen, so kann man das einfach über die Menüfunktion „Erzeuge Balken“ erreichen. Besteht das Thema innerhalb des entsprechenden Views noch nicht, so wird es automatisch erzeugt. Dabei wird der jeweiligen Objektgruppe bereits der passende Objekttyp (Polygon, PolyLine oder Point) zugewiesen. Ist das Thema jedoch schon vorhanden, wird es direkt in den Editiermodus versetzt. Veränderungen innerhalb eines Themas können nach Abschluß der Bearbeitung auf Anfrage abgespeichert werden. Beim Umgang mit sämtlichen Funktionalitäten wird der Benutzer über Dialogboxen gesteuert. Abbildung 9 visualisiert die Menü-gestützte Digitalisierung.

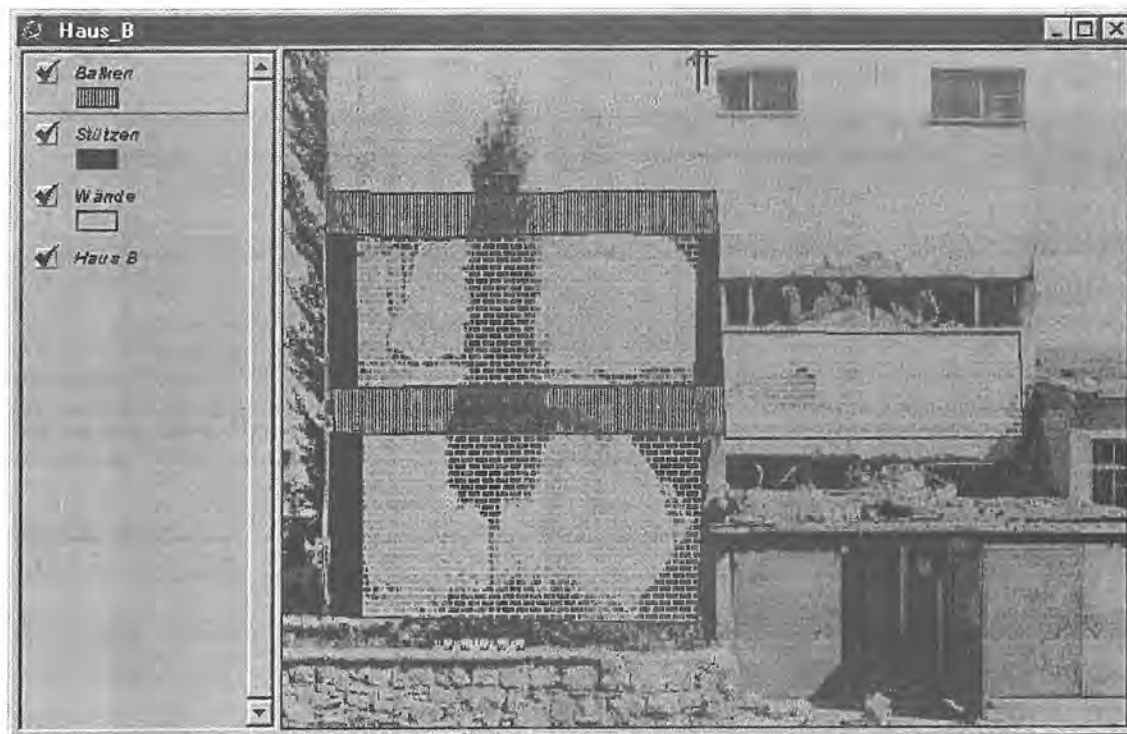


Abbildung 9: On-Screen Digitalisierung von Konstruktionselementen

3.1.5 Die Erzeugung von generalisierten Gebäudemodellen

Ein weiterer Ansatz zur Beschleunigung der Vorgehensweise bestand darin, für bestimmte Gebäudetypen wie z.B. Stahlrahmengebäude, die in ihrem Aufbau meist sehr regelmäßig sind,

1. vordefinierte Fassaden zu erstellen, die bei Gebäudetypen dieser Art häufig mit einer ähnlichen Struktur in Erscheinung treten und bei denen sich folglich Schadensausprägungen in ähnlichem Maße manifestieren und auswirken.
2. mit Hilfe eines Programms eine Möglichkeit bereitzustellen, die Gitterstruktur von Stahl- und Stahlbetonrahmengebäuden entsprechend der Verteilung von bzw. der Abstände zwischen Rahmenknoten, Säulen und Balken sowie über die Angabe ihrer Maße, des Grundrisses und der Geschoß- und der Gebäudehöhe abzubilden. Zur Veranschaulichung soll folgendes Beispiel dienen, in dem bereits ein solches Modell in 3D-Form erzeugt wurde.

Auf Basis dieses Gebäudemodells ist jede Struktur einzeln anzusprechen, wie z.B. die rot gekennzeichnete Stütze in der Abbildung. Die Strukturen sind hier lediglich als Drahtmodell repräsentiert – für die Messung eines konkreten Objekts wären die jeweiligen Ausdehnungen der Objekte (Stützenstärke, etc.) noch anzugeben. Diese Darstellung der Balken und Stützen konnte jedoch noch nicht verwirklicht werden. Natürlicherweise ergeben sich bei komplexeren, ungewöhnlichen Gebäudestrukturen Probleme bei der Erstellung des Modells. Für einfachere Bauten stellt dieses Vorgehen der Bereitstellung bzw. der automatischen Generierung eines Gebäudemodells aber durchaus eine sinnvolle Alternative dar, denn innerhalb des erzeugten Vektormodells müssen lediglich die Schadensmerkmale ergänzt werden, um die Schadensberechnung zu ermöglichen.

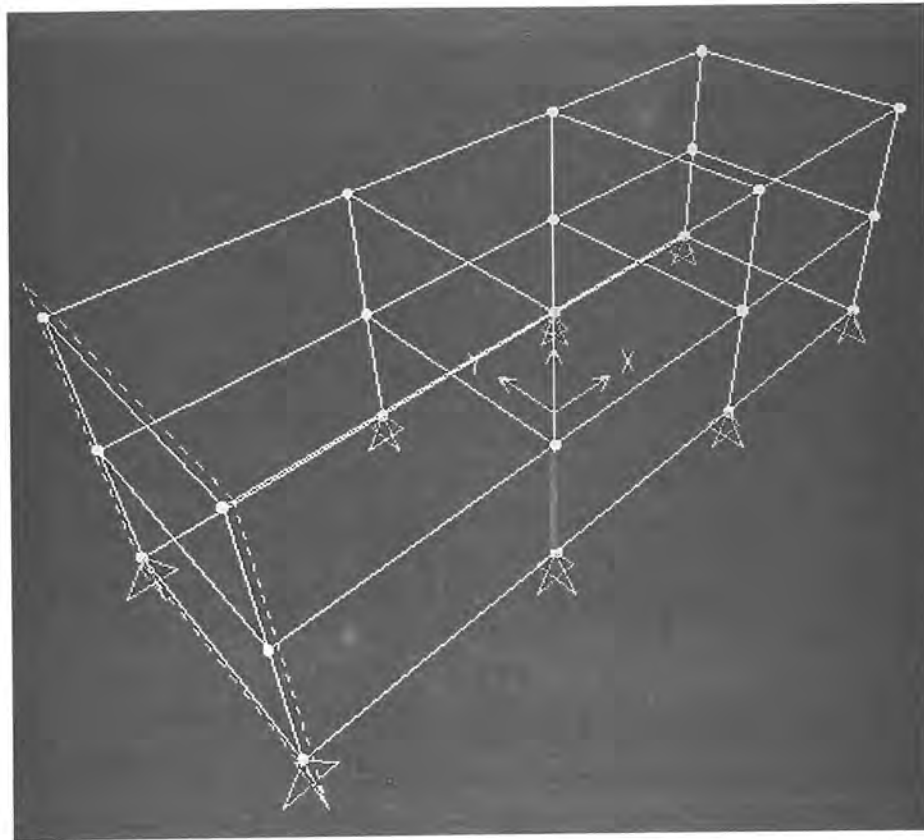


Abbildung 4: Erzeugung von Gebäudestrukturen

3.2 Die Integration der dritten Dimension

Gerade bei der Darstellung und Untersuchung von Gebäuden ist es unerlässlich, die dritte Dimension mit einzubeziehen. Bisher konnte diese Problematik innerhalb von Geo-Informationssystemen jedoch noch nicht befriedigend gelöst werden, da fast alle GIS-Produkte bislang lediglich auf 2D-Daten arbeiten. Im bisherigen Ansatz wurden daher die Objekte jeweils in einzelne Fassadenebenen, und damit in eine 2D-Repräsentation, projiziert. Mit dem ArcView 3D-Analyst bietet die Firma ESRI nun aber einen Aufsatz an, der vielversprechende Möglichkeiten auf dem Gebiet der Integration von 3D-Objekten in Aussicht stellt. Hiermit ist nicht nur eine visuelle Präsentation der Objekte in der dritten Dimension möglich, sondern es können auch räumliche Abfragen integriert werden. Daher stellt die Einbeziehung des Moduls einen wichtigen Schritt bei der Optimierung der Dokumentation und Analyse von Gebäudeschäden dar. Bislang konnte ein exemplarischer Datensatz erzeugt werden, der sämtliche relevanten Gebäudestrukturen enthält und mit dessen Hilfe die Analysefunktionalitäten im dreidimensionalen Raum untersucht wurden.

Der ArcView 3D-Analyst bietet grundsätzlich zwei Arten an, wie dreidimensionale Objekte modelliert werden können: zum einen die Darstellung als polygonale Struktur mit z-Komponente, zum anderen aber auch als Volumen. Im ersten Fall lassen sich lediglich Objektblöcke erzeugen, indem ein 2D-Polygon um die z-Komponente „in die Höhe gezogen“ wird, d.h. es entstehen keine echten 3D-Objekte, die Darstellung ist primär für Visualisierungszwecke geeignet. Im Falle der Darstellung von Objekten als Volumen lassen sich – gemäß dem Prinzip der Randedarstellung – beliebige Volumina erzeugen (Abbildung 11). Die Erzeugung von 3D-Objekten benötigt allerdings einen hohen zeitlichen Aufwand. Die Integration der dritten Dimension in die praktische Arbeit bei der Dokumentation und Analyse von Gebäudeschäden kann daher nur gelingen, wenn eine (semi-) automatisierte Generierung von 3D-Objektstrukturen erreicht wird.

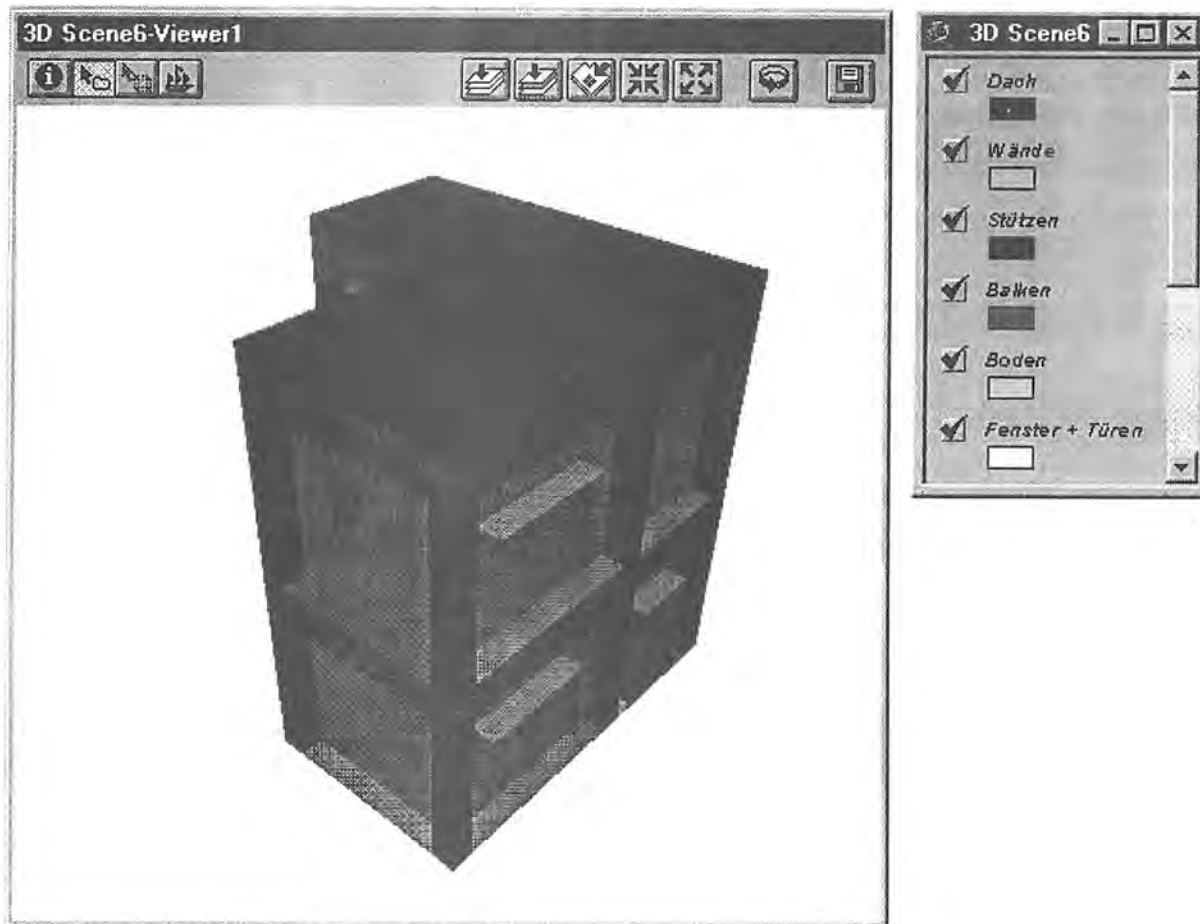


Abbildung 11: 3D-Modellierung eines Gebäudes.

In Abbildung 12 wird eine räumliche Analyse in der dritten Dimension dargestellt: die Abfrage hatte zum Ziel, jene Risse zu selektieren, die die Stütze in der Bildmitte schneiden; es wurden die blau markierten Risse selektiert. Insbesondere die Schnitt-Prozeduren und die Pufferbildungen im 3D-Raum sind für die Auswertung von Gebäudeschäden sehr hilfreich. Allerdings sind die Analyseprozeduren bislang noch nicht vollständig im 3D-Analyst realisiert: Schnitte und Puffer werden lediglich in der 2D-Projekten, in der x/y-Ebene berechnet. An der Erweiterung der Analysefunktionalität wird jedoch derzeit bei ESRI gearbeitet.

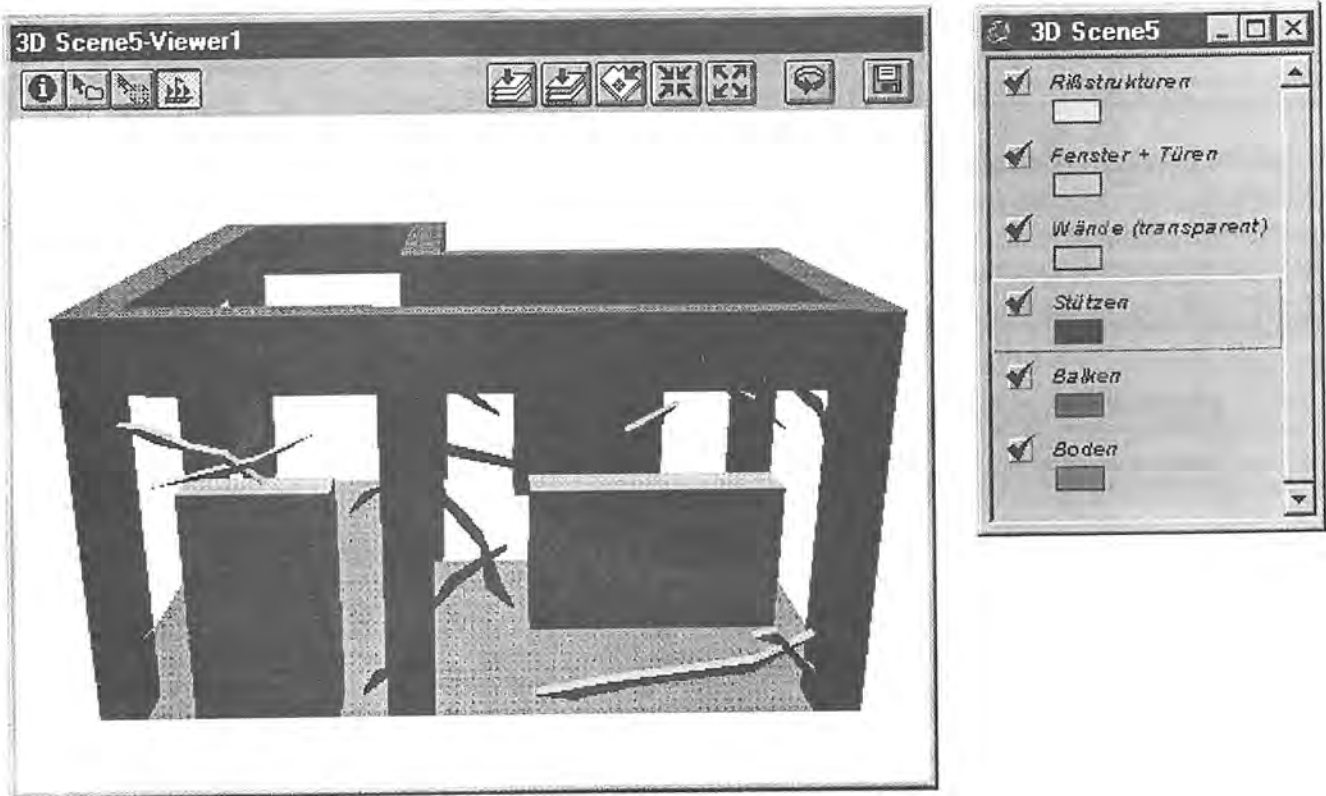


Abbildung 12: Visualisierung von Rißstrukturen in 3D.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend läßt sich festhalten, daß im Rahmen des Projektes ein sehr vielversprechendes Konzept realisiert wurde, um den besonderen Anforderungen der Aufgabenstellung einer schnellen Datenerfassung und Auswertung gerecht zu werden. Diese läßt sich durch die im Projekt integrierten Komponenten erreichen: Photogrammetrie als berührungslose, schnelle Meßmethode wird ergänzt durch das GIS, welches eine strukturierte Datenerfassung ermöglicht, und die anschließende umfassende Datenanalyse erlaubt. Um die Messung zu beschleunigen, wurde in der zweiten Projektphase der Schwerpunkt auf Automationsmöglichkeiten in der Objektbildung gelegt. Hierzu wurden sowohl bestehende Bildverarbeitungsmethoden eingesetzt, als auch neue Funktionalitäten entwickelt. Diese Funktionalität konnte im Projektzeitraum lediglich exemplarisch gezeigt werden. Weitere Arbeiten zielen darauf ab, die Meßprozesse weiter zu standardisieren bzw. zu automatisieren und damit zu erleichtern.

5. Literatur

Volz, S. [1997], Versuch zur Optimierung der Dokumentation und Analyse von Erdbebenschäden an Gebäuden mittels eines Geo-Informationssystems am Fallbeispiel der Stadt Dinar/Türkei, Diplomarbeit, Geographisches Institut/Institut für Photogrammetrie, unveröffentlicht.

Altan, M., Fritsch, D., Külür, S., Seker, D., Sester, M., Volz, S. & Toz, G. [1998], Photogrammetry and GIS for the acquisition, documentation and analysis of earthquake damages, in: Dokumentation und Analyse von Erdbebenschäden mittels Geo-Informationssystemen 11 'Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, April 20-22', Eisenstadt, Austria.

D. Seker, M. Sester, S. Volz, S. Külür, G. Toz, O. Altan and D. Fritsch [1998], Modeling and analyzing earthquake induced building damages in a GIS, in: D. Fritsch, M. Englich and M. Sester, Hrsg., „GIS – between Visions and Applications“, ISPRS Commission IV-Symposium, Stuttgart.

M. Celikoyan: Linienverfolgung zur Extraktion von Erdbebenschäden aus Bildern, Diplomarbeit, Institut für Photogrammetrie, Technische Universität Istanbul, 1999.

O. Altan, M. Altan, D. Fritsch, M. Sester & S. Volz [1998] Photogrammetry and GIS for the acquisition, documentation and analysis of earthquakes, 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam.

Automatische Fortführung von ATKIS-DLM 25

Volker Walter

In diesem Arbeitbericht wird in Kurzform der Stand der Arbeiten in dem Projekt „Nutzung von MOMS-02-PRIRODA-Daten zur Fortführung von ATKIS“ vorgestellt. Das Projekt ist von der DLR gefördert und wird in Zusammenarbeit mit dem Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Ziel des Projektes ist die Entwicklung und Implementierung von Verfahren zur vollautomatischen Fortführung von ATKIS-DLM25-Daten. Nach einer Darstellung des verwendeten Verfahrens werden die erzielten Ergebnisse präsentiert. Da MOMS-2P-Daten am Anfang des Projektes nicht zur Verfügung standen, wurde auf andere Datenquellen ausgewichen. Anhand von Beispielen werden die Ergebnisse für die unterschiedlichen Datensätze aufgezeigt.

1 Ansatz zur automatischen Fortführung

Der Ansatz zur vollautomatischen Fortführung von ATKIS läßt sich im wesentlichen in zwei Schritte aufteilen (siehe Abbildung 1). Im ersten Schritt werden die Fernerkundungsdaten pixelweise klassifiziert. Hierzu wird ein überwachter Maximum Likelihood Ansatz gewählt. Um die Pixel in verschiedene Landnutzungsklassen einteilen zu können, wird eine Beschreibung der typischen spektralen und textuellen Charakteristiken der unterschiedlichen Objektklassen benötigt.

Bei der üblichen Vorgehensweise werden diese Charakteristiken aus Trainingsgebieten abgeleitet, welche interaktiv am Bildschirm digitalisiert werden. Dieser interaktive Eingriff ist jedoch nicht gewünscht, da ein vollautomatisches Verfahren entwickelt werden soll. Aus diesem Grund werden die Trainingsgebiete automatisch aus dem ATKIS-Datenbestand abgeleitet. Weiterhin werden aus den multispektralen Kanälen verschiedene Texturkanäle prozessiert, die als zusätzliche Eingabekanäle für die Klassifikation verwendet werden.

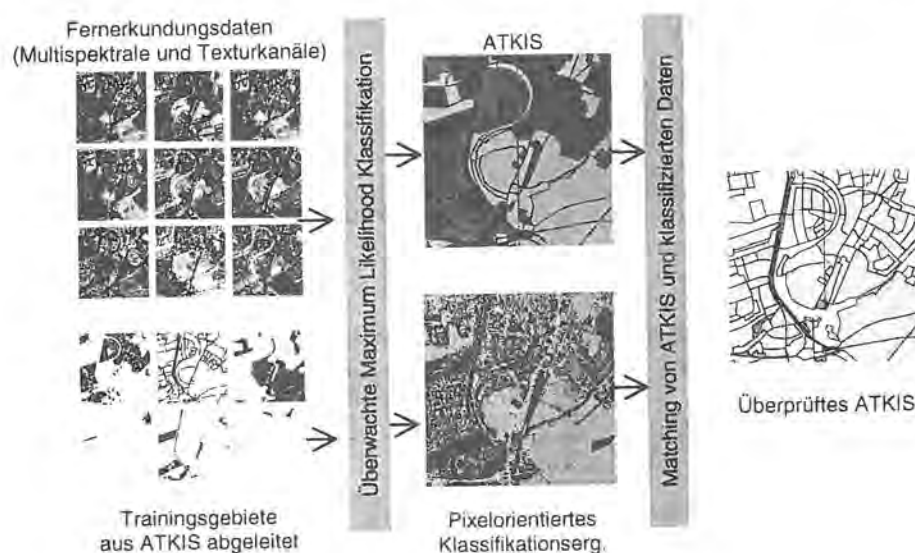


Abbildung 1: Vollautomatischer Ansatz zur Fortführung von ATKIS

Im zweiten Schritt wird dann das pixelorientierte Klassifikationsergebnis objektweise mit dem ATKIS-Datenbestand verglichen, um so alle Objekte zu finden, bei denen eine Änderung stattgefunden hat.

2 Multispektrale Klassifikation

Aufgabe der multispektralen Klassifikation ist es, jedes Pixel aufgrund seiner spektralen und textuellen Eigenschaften in unterschiedliche Landnutzungsklassen einzuteilen. Abbildung 2 zeigt beispielhaft ein Klassifikationsergebnis einer DPA-Aufnahme, die auf eine Bodenpixelgröße von 2 Metern resampled wurde.

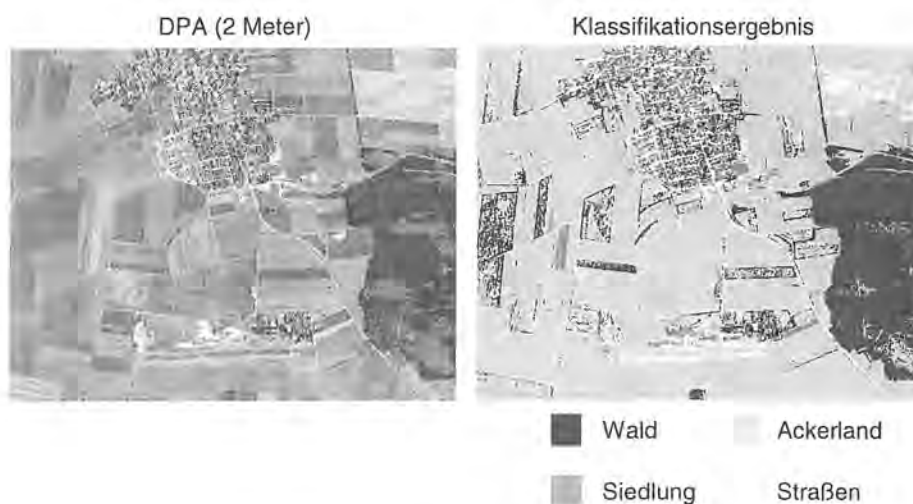


Abbildung 2: Klassifikationsergebnis

Im verwendeten Ansatz wird zwischen den Landnutzungsklassen *Wald*, *Ackerland*, *Siedlung*, *Straßen* und *Gewässer* unterschieden. Waldflächen und Wasserflächen lassen sich sehr gut und homogen detektieren. In Ackerflächen kann es teilweise zu Fehlklassifikationen kommen, falls stark sichtbare Bearbeitungsstrukturen im Acker vorhanden sind. Die Klassifizierung von Siedlungen erfolgt in niedrig aufgelösten Daten als homogene Flächen, während bei höher aufgelösten Daten Siedlungsgebiete sich durch unterschiedliche Klassen (abhängig davon, was die jeweiligen Pixel tatsächlich repräsentieren) darstellen.

3 Matching der Daten

Alle ATKIS-Objekte werden in die drei Klassen *sicher gefunden*, *teilweise gefunden* und *nicht gefunden* eingeteilt. Die Entscheidung für diese Einteilung erfolgt durch eine objektweise Untersuchung des Klassifikationsergebnisses. Für jedes Objekt wird der Prozentsatz der Pixel ermittelt, welche genauso klassifiziert wurden wie das Objekt erfasst wurde. Ebenfalls wird ein Homogenitätsparameter berechnet, der angibt ob sich die richtig klassifizierten Pixel homogen im Objekt verteilen.

Abbildung 3 zeigt eine Übersichtsdarstellung eines Matchingergebnisses für die Landnutzungsklassen *Acker*, *Siedlung* und *Wald*. Objekte, die sicher im Bild gefunden wurden, sind grau dargestellt, Objekte, die nur teilweise gefunden wurden, sind in orange dargestellt und Objekte, die überhaupt nicht gefunden wurden, sind in rot dargestellt.

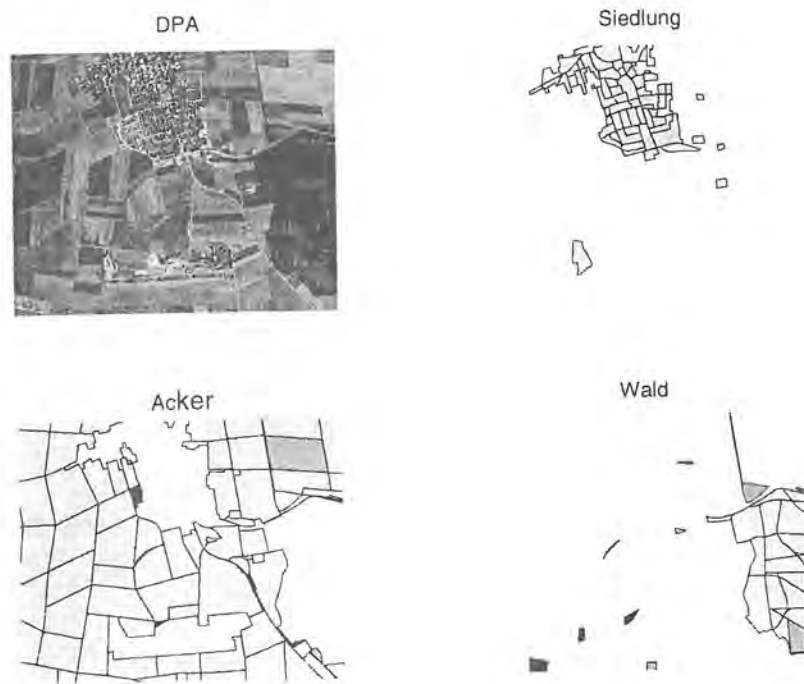


Abbildung 3: Übersicht über Matchingergebnis

In Abbildung 4 ist ein detailliertes Beispiel für die Situation gegeben, daß Objekte nicht gefunden werden können. In der DPA-Aufnahme kann ein Neubaugebiet erkannt werden, welches in ATKIS als Ackerfläche erfaßt ist. Die Klassifikation wurde mit auf 2 Meter resam-pelten Eingabedaten durchgeführt. Die Struktur der Gebäude und Straßen läßt sich deutlich

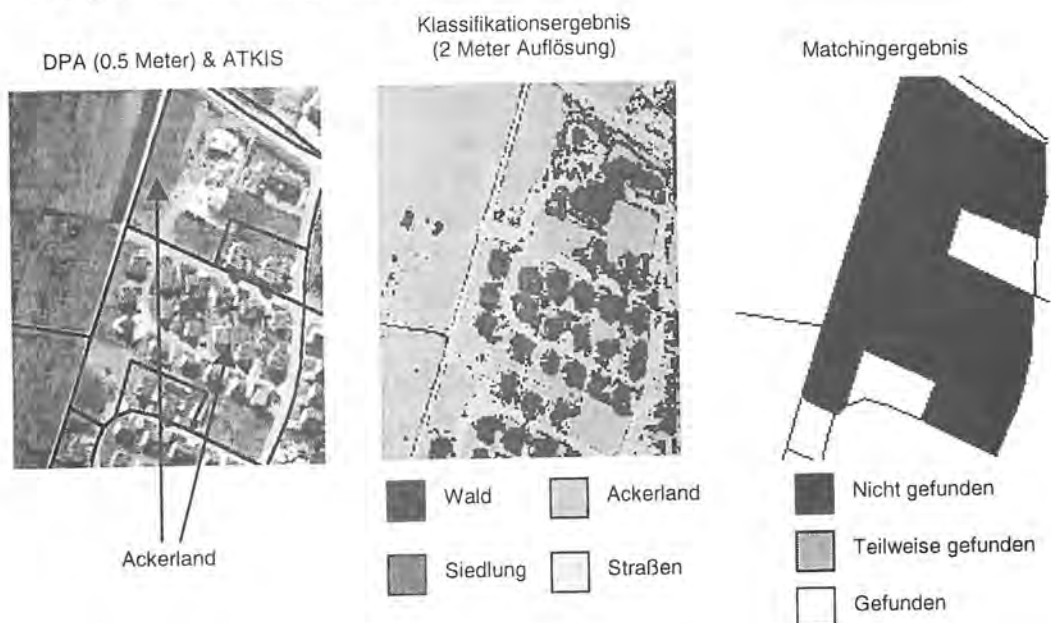


Abbildung 4: Nicht gefundene Objekte

im Klassifikationsergebnis erkennen. Das Matching kommt zum Resultat, daß sich in den beiden ATKIS-Objekten zuwenig Pixel befinden, die als Ackerland klassifiziert wurden, und markiert die Objekte als *nicht gefunden*.

Abbildung 5 zeigt ein Beispiel für Objekte, die nur teilweise gefunden werden können. In der DPA-Aufnahme ist ein Gebiet zu erkennen, welches in ATKIS komplett als Waldfläche erfaßt wurde. In einem Teil dieser Fläche befinden sich jedoch nur sehr wenige und teilweise überhaupt keine Bäume. Dies reflektiert sich im Klassifikationsergebnis. In den Bereichen, in denen sich keine Bäume befinden, werden die Pixel nicht als Wald sondern als Ackerfläche klassifiziert. Das Matching kommt zum Resultat, daß die Objekte nur teilweise gefunden werden können, da sich zwar die als Wald klassifizierten Pixel homogen im Objekt verteilen, jedoch zuwenig sind, um von einem sicheren Matching ausgehen zu können.

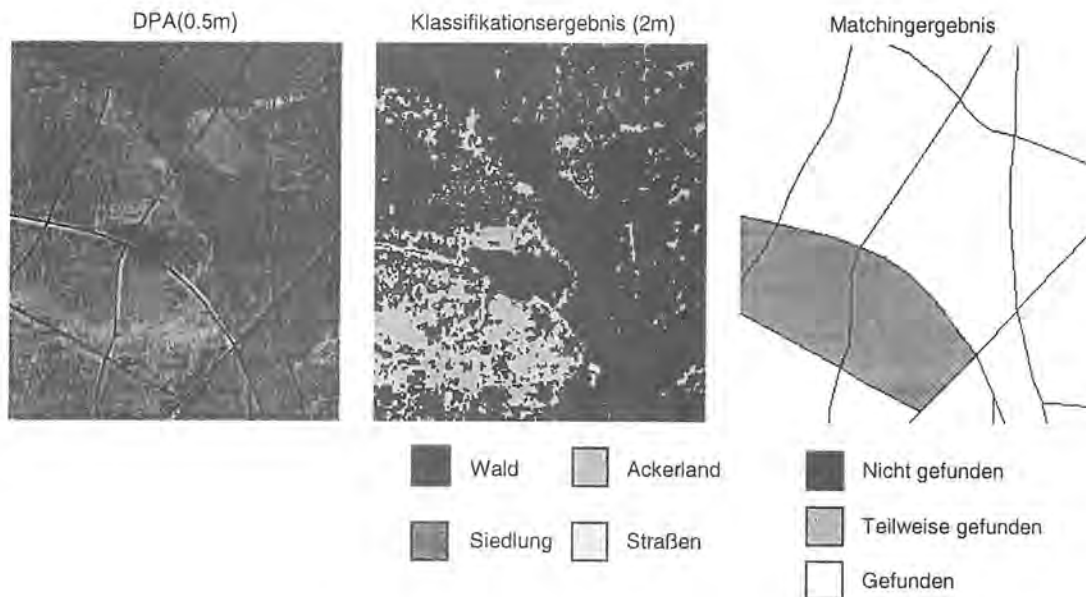


Abbildung 5: Teilweise gefundene Objekte

Für das Matching von linienhaften Objekten wird ein erweiterter Ansatz benötigt. Der Grund hierfür ist, daß linienhafte Objekte aufgrund ihrer schmalen Form aus sehr vielen Mischpixeln bestehen, die zu Fehlklassifikationen führen können. Daher wird zuerst eine Vorverarbeitung des Klassifikationsergebnisses durchgeführt. Abbildung 6 zeigt die hierzu implementierte Bearbeitungskette. Ziel ist es, das pixelorientierte Klassifikationsergebnis in eine vektororientierte Darstellung umzuwandeln, die der Darstellung von linienhaften Objekten in der ATKIS-Datenbank entspricht.

Nach der Vorverarbeitung wird das eigentliche Matching für die linienhaften Objekte durchgeführt. Hierzu werden wiederum alle Objekte in die Klassen *nicht gefunden*, *teilweise gefunden* und *gefunden* aufgeteilt. Die Aufteilung erfolgt abhängig des Prozentsatzes der extrahierten Vektorelemente, die sich in einem Puffer um das ATKIS-Objekt befinden. Abbildung 7 zeigt eine Übersicht über das Matchingergebnis eines ATKIS-Straßennetzes

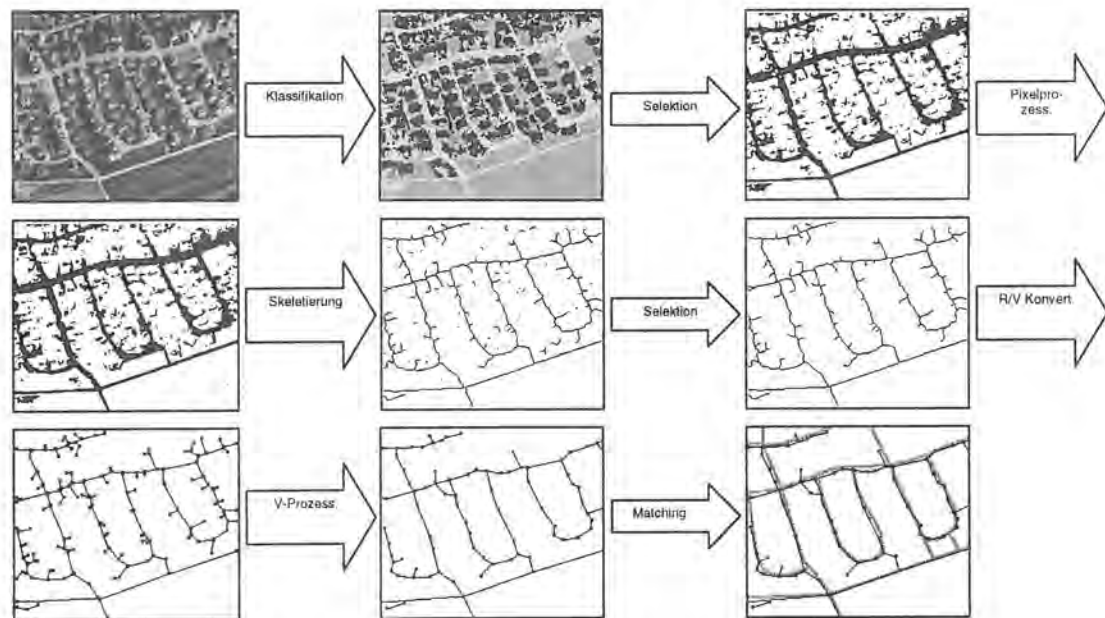


Abbildung 6: Vorverarbeitung des Klassifikationsergebnisses

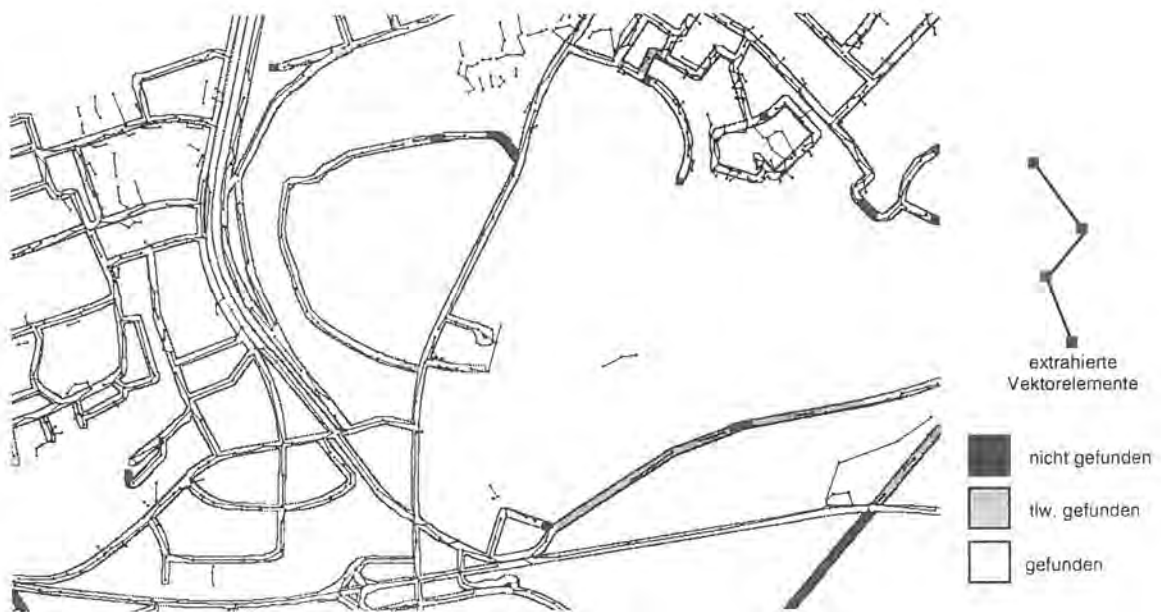


Abbildung 7: Matching eines ATKIS-Straßennetzes

Abbildung 8 zeigt an einem Beispiel drei ATKIS-Objekte, die durch das Verfahren nicht gefunden werden konnten. Bei den zwei kleineren Objekten im mittleren Bildbereich kann festgestellt werden, daß sich in der DPA-Aufnahme keinerlei Strukturen befinden die darauf hindeuten, daß sich an dieser Stelle eine Straße befindet. Bei dem größeren ATKIS-Objekt, wel-

ches ebenfalls nicht gefunden wurde, kann in der DPA-Aufnahme ein Weg gesehen werden. Dieser Weg ist jedoch sehr schmal und in dem für die Klassifikation verwendeten Datensatz mit 2 Meter Auflösung kaum noch zu erkennen. Das Hauptproblem ist jedoch, daß es sich hierbei um einen unasphaltierten Weg handelt. Wege dieser Art werden häufig als Ackerflächen klassifiziert und sind für eine automatische Fortführung nicht geeignet.

Weiterhin kann in dem Beispiel gesehen werden, daß das Verfahren auch in der Lage ist, neu gebaute Straßen, welche noch nicht in ATKIS erfaßt sind, zu detektieren. Am linken und rechten Rand des Siedlungsbereiches befinden sich jeweils Straßen, die nicht in ATKIS erfaßt sind, jedoch vom Verfahren detektiert worden sind. Dies ist an den im Matchingergebnis eingezeichneten Vektorelementen zu erkennen.



Abbildung 8: Nicht gefundene Objekte

4 Softwarepaket

Das beschriebene Verfahren wurde in einem Softwarepaket unter UNIX und X11 Windows implementiert. Abbildung 9 zeigt eine Auswahl verschiedener Fenster der Oberfläche. Das Programmpaket ermöglicht es, interaktiv sämtliche Parameter des Verfahrens zu ändern und als Projekt abzuspeichern. Weiterhin steht eine Visualisierungskomponente zur Verfügung, die es ermöglicht, die Ergebnisse am Bildschirm darzustellen und zu untersuchen.

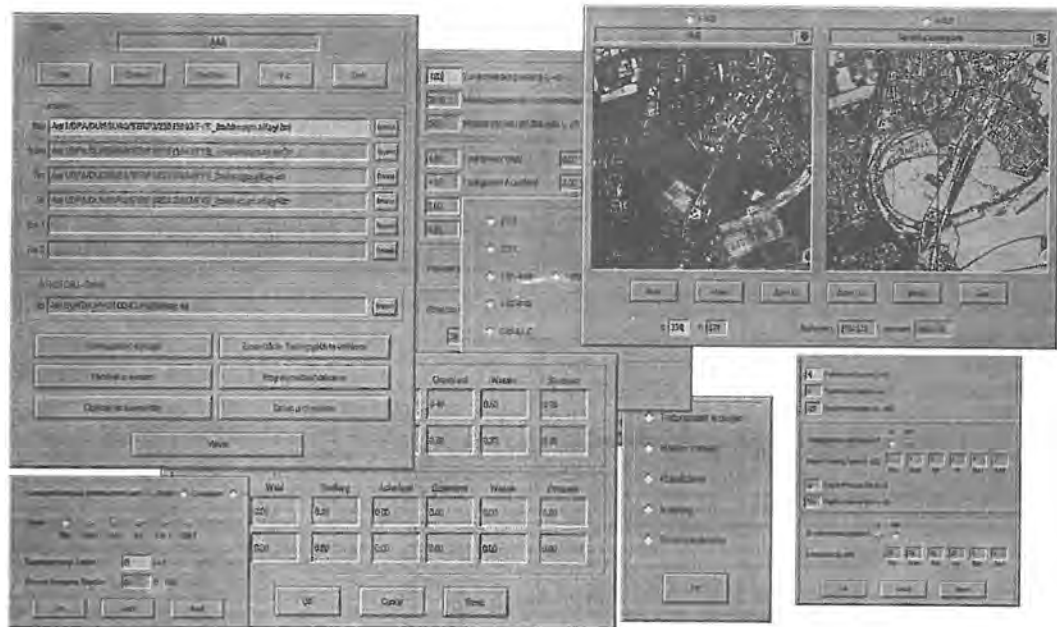


Abbildung 9: Interaktive Programmoberfläche

Das Programmpaket wurde so gestaltet, daß es möglich ist, Fernerkundungsdaten von unterschiedlichsten Sensoren als Eingabedaten zu nutzen. Daher war es möglich nicht nur MOMS-2P-Daten zu verwenden, sondern es konnten ebenso andere Datensätze auf ihr Potential zur Fortführung von ATKIS-DLM25 untersucht werden.

5 Test mit IRS-1C Daten

Abbildung 10 zeigt ein Klassifikationsergebnis bei der Verwendung von Daten des indischen Satelliten IRS-1C, welcher eine geometrische Auflösung von 25 Metern und eine radiometrische Auflösung von 7 Bit bei den multispektralen Kanälen aufweist. Da nur Daten im grünen, roten und nahen Infrarot Bereich aufgezeichnet werden, ist eine Darstellung der Daten als rgb-Bilder nicht möglich. Zur besseren Möglichkeit der Interpretation ist eine DPA-Aufnahme des gleichen Gebietes dargestellt.

Aufgrund der niedrigen Auflösung ist eine Interpretation der Daten durch einen Operateur sehr schwierig. Im Klassifikationsergebnis kann jedoch gesehen werden, daß teilweise sogar Strukturen, die nur ein Pixel groß sind, richtig klassifiziert werden. Problematisch ist hier jedoch die Weiterverarbeitung der Ergebnisse. Wird eines der Objekte vom Matchingansatz als *nicht gefunden* markiert, so ist die endgültige Entscheidung durch einen Operateur, ob es sich in diesem Fall tatsächlich um eine Fortführung handelt, sehr schwierig, wenn er nur IRS-1C-Daten zur Verfügung hat.

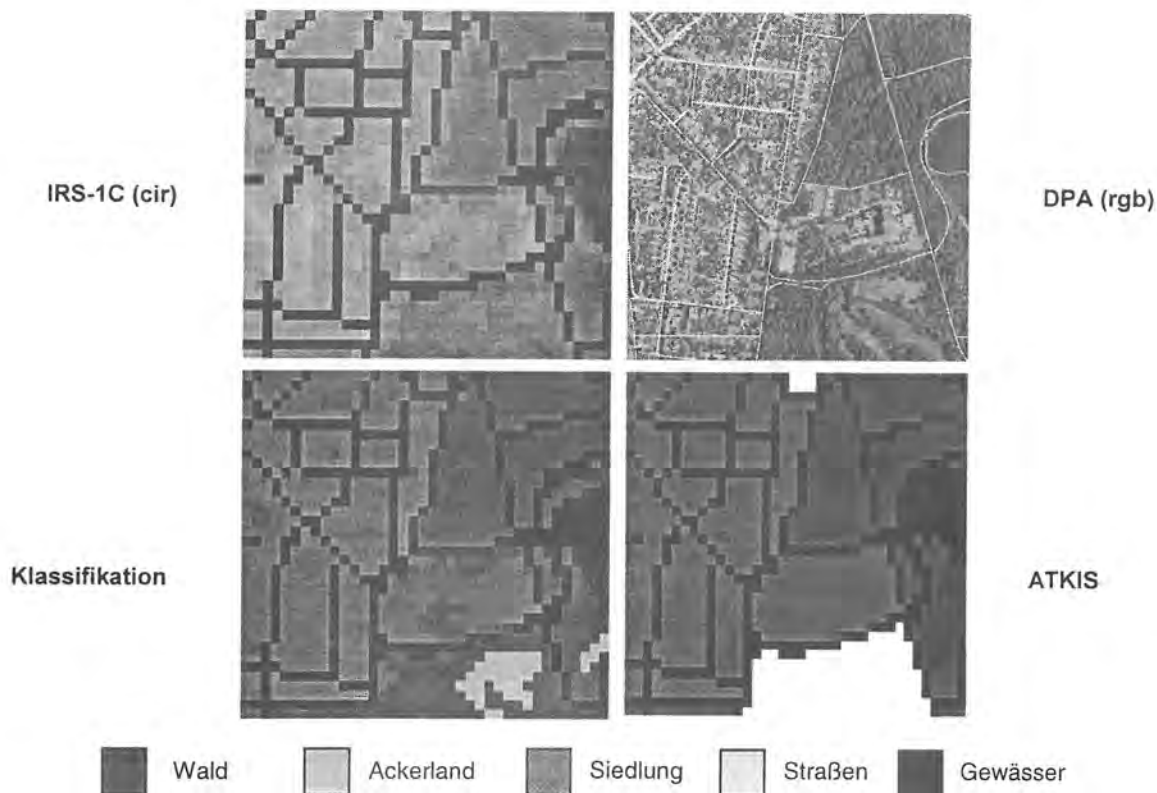


Abbildung 10: Klassifikation IRS-1C-Aufnahme (Beispiel 1)

Noch deutlicher kann dieses Problem in Abbildung 11 gesehen werden. Das Testgebiet besteht komplett aus Ackerland mit einem kleinen Bauernhof in der Mitte des Bildes. Obwohl die IRS-1C-Aufnahme im Ackerland eine hohe spektrale Varianz aufweist, wird dieses als homogenes Gebiet klassifiziert. Ebenso werden die Strukturen des Bauernhof sehr gut erkannt. Wird jedoch das Siedlungsobjekt als *nicht gefunden* markiert (da es nur eine geringe Anzahl von als Siedlung klassifizierten Pixeln enthält) ist der Informationsgehalt der IRS-1C-Aufnahme nicht ausreichend, um die Situation entsprechend interpretieren zu können.

6 Test mit MOMS-02-PRIRODA-Daten

Abbildung 12 zeigt eine Übersichtsdarstellung des Ausschnittes der MOMS-Szene (Mode C), welche für die Untersuchung genutzt wurde. Zum Teil ist hier ebenfalls eine pixelgenaue Klassifikation möglich. Dies kann insbesondere am Fluß und den Grenzen zwischen Ackerland und Waldfläche im unteren linken Bereiches des Bildes gesehen werden.

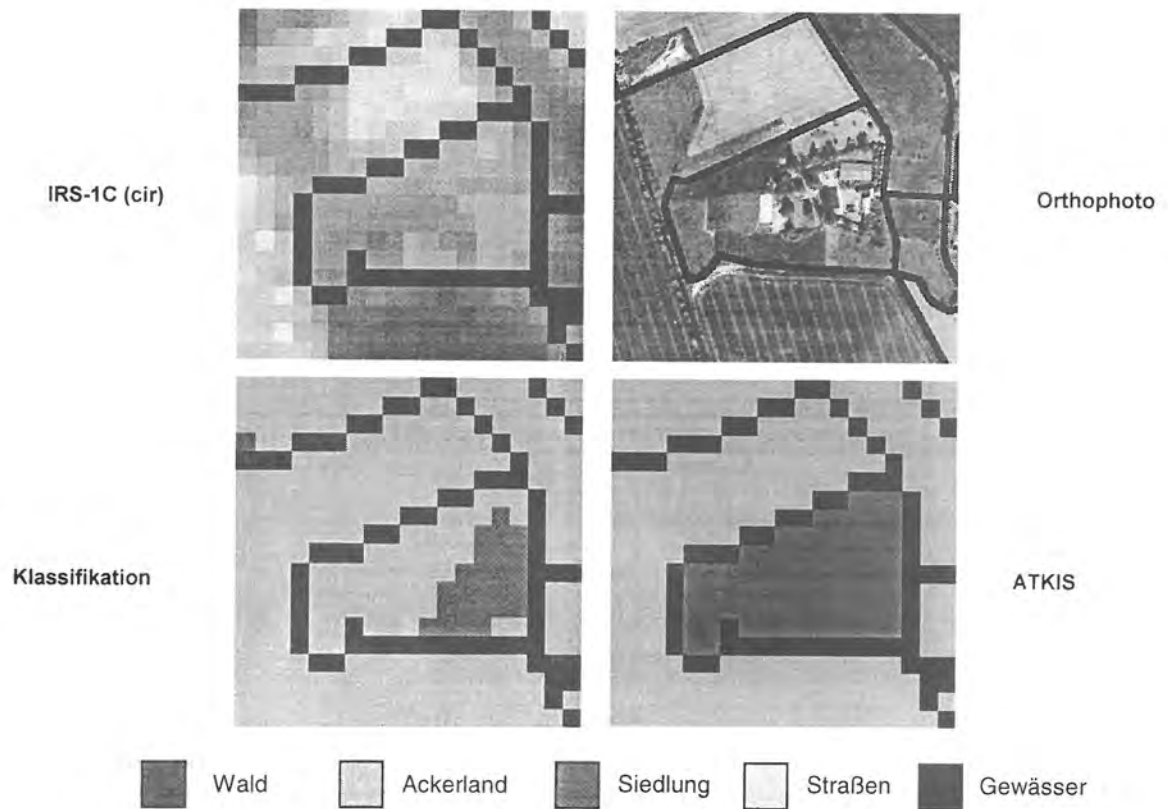


Abbildung 11: Klassifikation IRS-1C-Aufnahme (Beispiel 2)

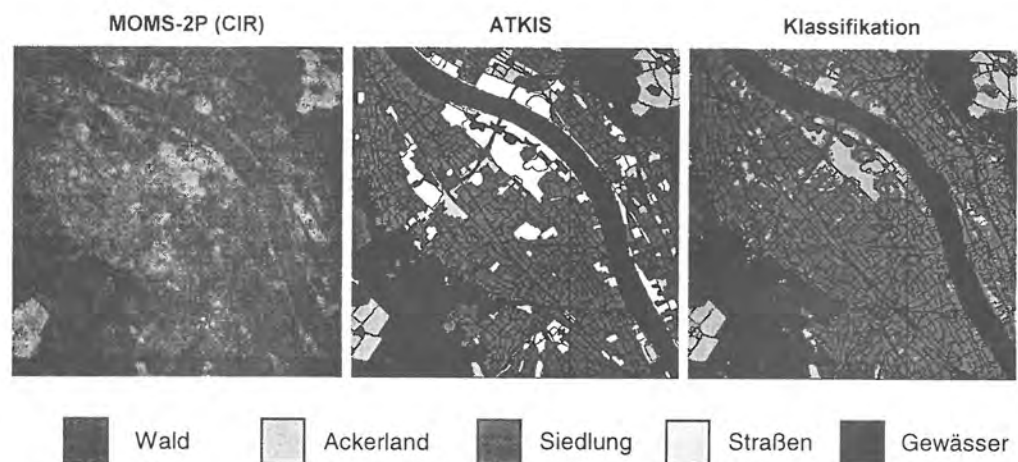


Abbildung 12: Klassifikation MOMS-2P-Daten (Übersicht)

Im Ausschnitt in Abbildung 13 kann jedoch gesehen werden, daß teilweise Probleme bei der Klassifikation auftreten. Zum Vergleich ist ein rgb-Orthophoto desselben Gebietes dargestellt. Bei der Unterscheidung der Landnutzungsklassen Siedlung und Wald treten insbesondere an den Grenzen zwischen diesen beiden Klassen Fehlklassifikation auf.

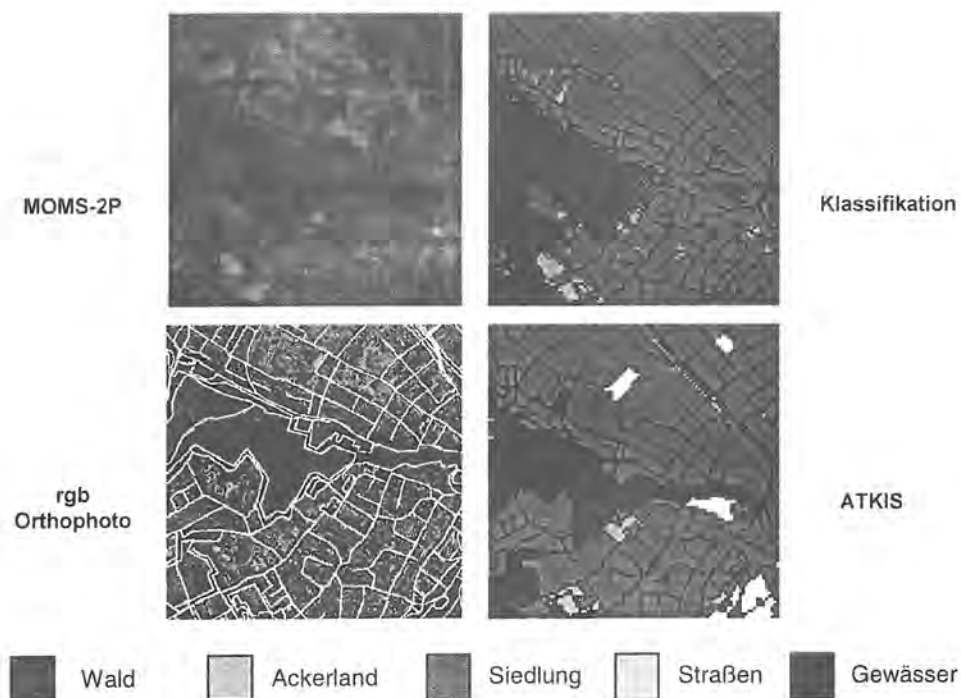


Abbildung 13: Klassifikation MOMS-2P-Daten

Das schlechte Klassifikationsergebnis läßt sich mit dem geringen Kontrast der Aufnahme erklären. Abbildung 14 zeigt einen Histogrammvergleich der unterschiedlichen Kanäle der IRS-1C-Aufnahme (welche bereits weiter oben dargestellt wurde) und der vorliegenden MOMS-2P-Aufnahme. Es kann gesehen werden, daß die MOMS-2P-Aufnahme in allen Kanälen eine Grauwertdynamik von deutlich weniger als 100 unterschiedlichen Grauwerten aufweist. Dies ist der Grund dafür, daß die Auswertungen der IRS-1C-Aufnahmen zu besseren Ergebnissen führen, da hier (trotz einer schlechteren technischen Spezifikation der Kamera bzgl. radiometrischer und geometrischer Auflösung) wesentlich kontrastreichere Aufnahmen vorlagen.

7 Test mit Laserdaten

Da das Programmpaket so implementiert wurde, daß keinerlei Einschränkungen bezüglich der Eingabedaten bestehen, können auch Laserdaten als zusätzliche Informationsquelle für die Klassifikation genutzt werden. Abbildung 15 zeigt das Klassifikationsergebnis eines rgb-Orthophotos (resampled auf 2 Meter) ohne bzw. mit Laserdaten als zusätzlicher Kanal. Insbesondere die Klassen Straßen und Häuser lassen sich bei der Hinzunahme von Laserdaten wesentlich besser unterscheiden.

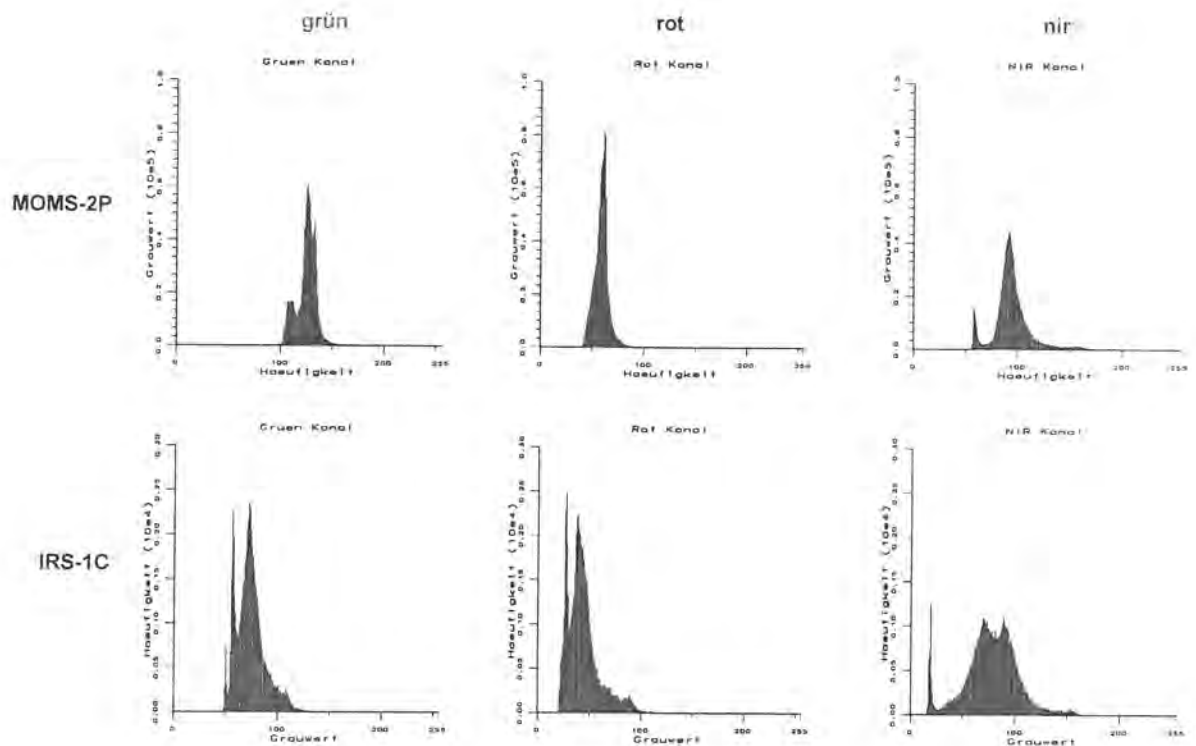


Abbildung 14: Histogrammvergleich MOMS-2P- und IRS 1C-Aufnahme

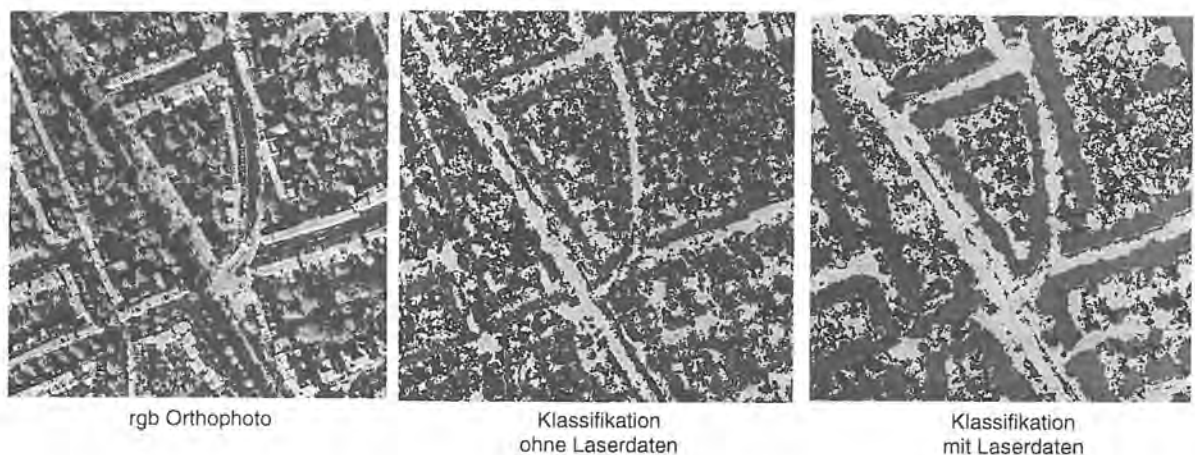


Abbildung 15: Klassifikation mit Laserdaten

8 Zusammenfassung

Das in diesem Projekt entwickelte Verfahren zur automatischen Fortführung von ATKIS-DLM25-Daten zeigt vielversprechende Ergebnisse. Die entwickelte Software ist in der Lage Daten von unterschiedlichen Sensoren zu verarbeiten. Dadurch ist es möglich unterschiedlichste Datensätze auf ihr Potential zur automatischen Fortführung von ATKIS zu untersuchen.

Da zu Projektbeginn keine MOMS-Daten zur Verfügung standen, wurden zuerst IRS-1C-Daten und später DPA-Daten als Ersatz genutzt. Das Hauptproblem bei den IRS-1C-Daten ist die schlechte visuelle Interpretierbarkeit. Dies liegt zum einen an der niedrigen radiometrischen und geometrischen Auflösung und zum anderen an der Tatsache, daß kein blauer Kanal zur Verfügung steht, um rgb-Bilder zu erzeugen. Dies führt dazu, daß die Ergebnisse der automatischen Fortführung nur sehr schlecht von einem Operateur überprüft werden können.

Dagegen hat die MOMS-Kamera eine höhere geometrische und radiometrische Auflösung und ist in der Lage Daten in vier spektralen Kanälen aufzuzeichnen (Mode B). Dies müßte zu deutlich besseren Ergebnissen führen. Unglücklicherweise weist jedoch die für den Test verwendete Aufnahme einen extrem niedrigen Kontrast auf. Dies ist auf die äußeren Aufnahmebedingungen zurückzuführen und nicht auf technische Probleme, da Aufnahmen von anderen Gebieten (z.B. Kapstadt, Südafrika) zeigen, daß mit der MOMS-Kamera Bilder mit einer sehr hohen radiometrischen Qualität aufgezeichnet werden können.

Anhand der DPA-Daten konnte aufgezeigt werden, daß das Verfahren ebenso für Daten mit einer höheren Auflösung anwendbar ist. Dies ist insbesondere im Hinblick auf zukünftige Satellitengeneration von besonderen Interesse, da die entwickelte Software ebenso für solche Systeme eingesetzt werden kann.

Durch den Umstand, daß die MOMS-Aufnahme erst sehr spät zur Verfügung stand und durch die Tatsache, daß die Daten eine nur geringe radiometrische Qualität besitzen, stehen jedoch endgültige Aussagen zur Brauchbarkeit von MOMS-Daten zur Fortführung von ATKIS-DLM25 noch aus.

Anschriften der Autoren:

Anders, Karl-Heinrich: Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24 D, D-70174 Stuttgart, Tel.: +49 (0) 711 121-4090, Fax: +49 (0) 711 121-3297, E-mail: kh.anders@ifp.uni-stuttgart.de, URL: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de>

Anshelm, Frank: Institut für Navigation, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24 D, D-70174 Stuttgart, Tel.: +49 (0) 711 121-4172, Fax: +49 (0) 711 121-2755, E-mail: anshelm@nav.uni-stuttgart.de, URL: <http://www.nav.uni-stuttgart.de>

Gauger, Thomas: Institut für Navigation, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24 D, D-70174 Stuttgart, Tel.: +49 (0) 711 121-4177, Fax: +49 (0) 711 121-2755, E-mail: gauger@nav.uni-stuttgart.de, URL: <http://www.nav.uni-stuttgart.de>

Glemser, Michael: Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24 D, D-70174 Stuttgart, Tel.: +49 (0) 711 121-3398, Fax: +49 (0) 711 121-3297, E-mail: michael.glemser@ifp.uni-stuttgart.de, URL: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de>

Güth, Stefan: Institut für Navigation, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24 D, D-70174 Stuttgart, Tel.: +49 (0) 711 121-3412, Fax: +49 (0) 711 121-2755, E-mail: gueth@nav.uni-stuttgart.de, URL: <http://www.nav.uni-stuttgart.de>

Henneberg, Christian: Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24 D, D-70174 Stuttgart, Tel.: +49 (0) 711 121-3386, Fax: +49 (0) 711 121-3297

Klein, Ulrike: Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24 D, D-70174 Stuttgart, Tel.: +49 (0) 711 121-4095, Fax: +49 (0) 711 121-3297, E-mail: ulrike.klein@ifp.uni-stuttgart.de, URL: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de>

Krauß, Sandra: Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24 D, D-70174 Stuttgart, Tel.: +49 (0) 711 121-3386, Fax: +49 (0) 711 121-3297

Schneider, Christian: Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24 D, D-70174 Stuttgart, Tel.: +49 (0) 711 121-3386, Fax: +49 (0) 711 121-3297

Sester, Monika: Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24 D, D-70174 Stuttgart, Tel.: +49 (0) 711 121-3384, Fax: +49 (0) 711 121-3297, E-mail: monika.sester@ifp.uni-stuttgart.de, URL: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de>

Volz, Steffen: Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24 D, D-70174 Stuttgart, Tel.: +49 (0) 711 121-4092, Fax: +49 (0) 711 121-3297, E-mail: steffen.volz@ifp.uni-stuttgart.de, URL: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de>

Walter, Volker: Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24 D, D-70174 Stuttgart, Tel.: +49 (0) 711 121-4091, Fax: +49 (0) 711 121-3297, E-mail: volker.walter@ifp.uni-stuttgart.de, URL: <http://www.ifp.uni-stuttgart.de>

- | | | | |
|-----|----|--------|---|
| Nr. | 1 | (1976) | Vorträge des Lehrgangs Numerische Photogrammetrie (III),
Esslingen 1975 - vergriffen |
| Nr. | 2 | (1976) | Vorträge der 35. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1975 |
| Nr. | 3 | (1976) | Contributions of the XIIIth ISP-Congress of the Photogrammetric
Institute, Helsinki 1976 - vergriffen |
| Nr. | 4 | (1977) | Vorträge der 36. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1977 |
| Nr. | 5 | (1979) | E. Seeger: Das Orthophotoverfahren in der Architekturphoto-
grammetrie, Dissertation |
| Nr. | 6 | (1980) | Vorträge der 37. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1979 |
| Nr. | 7 | (1981) | Vorträge des Lehrgangs Numerische Photogrammetrie (IV):
Grobe Datenfehler und die Zuverlässigkeit der
photogrammetrischen Punktbestimmung, Stuttgart 1980 -
vergriffen |
| Nr. | 8 | (1982) | Vorträge der 38. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1981 |
| Nr. | 9 | (1984) | Vorträge der 39. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1983 |
| Nr. | 10 | (1984) | Contributions to the XVth ISPRS-Congress of the Photogramme-
tric Institute, Rio de Janeiro 1984 |
| Nr. | 11 | (1986) | Vorträge der 40. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1985 |
| Nr. | 12 | (1987) | Vorträge der 41. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1987 |
| Nr. | 13 | (1989) | Vorträge der 42. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1989 |
| Nr. | 14 | (1989) | Festschrift - Friedrich Ackermann zum 60. Geburtstag, Stuttgart
1989 |
| Nr. | 15 | (1991) | Vorträge der 43. Photogrammetrischen Woche Stuttgart 1991 |
| Nr. | 16 | (1992) | Vorträge zum Workshop "Geoinformationssysteme in der Ausbil-
dung", Stuttgart 1992 |

- | | | | |
|-----|----|--------|---|
| Nr. | 1 | (1987) | K. Eren: Geodetic Network Adjustment Using GPS Triple Difference Observations and a Priori Stochastic Information |
| Nr. | 2 | (1987) | F.W.O. Aduol: Detection of Outliers in Geodetic Networks Using Principal Component Analysis and Bias Parameter Estimation |
| Nr. | 3 | (1987) | M. Lindlohr: SIMALS; SIMulation, Analysis and Synthesis of General Vector Fields |
| Nr. | 4 | (1988) | W. Pachelski, D. Lapucha, K. Budde: GPS-Network Analysis: The Influence of Stochastic Prior Information of Orbital Elements on Ground Station Position Measures |
| Nr. | 5 | (1988) | W. Lindlohr: PUMA; Processing of Undifferenced GPS Carrier Beat Phase Measurements and Adjustment Computations |
| Nr. | 6 | (1988) | R.A. Snay, A.R. Drew: Supplementing Geodetic Data with Prior Information for Crustal Deformation in the Imperial Valley, California 1988 |
| Nr. | 7 | (1989) | H.-W. Mikolański, P. Braun: Dokumentation der Programme zur Behandlung beliebig langer ganzer Zahlen und Brüche |
| Nr. | 8 | (1989) | H.-W. Mikolański: Wigner 3j Symbole, berechnet mittels Ganzzahlarithmetik |
| Nr. | 9 | (1989) | H.-W. Mikolański: Dokumentation der Programme zur Multiplikation nach Kugelfunktionen entwickelter Felder |
| Nr. | 10 | (1989) | H.-W. Mikolański, P. Braun: Dokumentation der Programme zur Differentiation und zur Lösung des Dirichlet-Problems nach Kugelfunktionen entwickelter Felder |
| Nr. | 11 | (1990) | L. Kubáčková, L. Kubáček: Elimination Transformation of an Observation Vector preserving Information on the First and Second Order Parameters |
| Nr. | 12 | (1990) | L. Kubáčková: Locally best Estimators of the Second Order Parameters in Fundamental Replicated Structures with Nuisance Parameters |
| Nr. | 13 | (1991) | G. Joos, K. Jörg: Inversion of Two Bivariate Power Series Using Symbolic Formula Manipulation |
| Nr. | 14 | (1991) | B. Heck, K. Seitz: Nonlinear Effects in the Scalar Free Geodetic Boundary Value Problem |
| Nr. | 15 | (1991) | B. Schaffrin: Generating Robustified Kalman Filters for the Integration of GPS and INS |
| Nr. | 16 | (1992) | Z. Martinec: The Role of the Irregularities of the Earth's Topography on the Tidally Induced Elastic Stress Distribution within the Earth |
| Nr. | 17 | (1992) | B. Middel: Computation of the Gravitational Potential of Topographic-Isostatic Masses |
| Nr. | 18 | (1993) | M.I. Yurkina, M.D. Bondarewa: Einige Probleme der Erdrotationsermittlung |
| Nr. | 19 | (1993) | L. Kubáčková: Multiepoch Linear Regression Models |
| Nr. | 20 | (1993) | O.S. Salychev: Wave and Scalar Estimation Approaches for GPS/INS Integration |

- | | |
|-------------------|--|
| Nr. 1994.1 (1994) | H.-J. Euler: Generation of Suitable Coordinate Updates for an Inertial Navigation System |
| Nr. 1994.2 (1994) | W. Pachelski: Possible Uses of Natural (Barycentric) Coordinates for Positioning |
| Nr. 1995.1 (1995) | J. Engels, E.W. Grafarend, P. Sorcik: The Gravitational Field of Topographic-Isostatic Masses and the Hypothesis of Mass Condensation - Part I & II |
| Nr. 1995.2 (1995) | Minutes of the ISPRS Joint Workshop on Integrated Acquisition and Interpretation of Photogrammetric Data |
| Nr. 1996.1 (1996) | Festschrift für Klaus Linkwitz anlässlich der Abschiedsvorlesung im Wintersemester 1995/96; herausgegeben von Eberhard Baumann, Ulrich Hangleiter und Wolfgang Möhlenbrink |
| Nr. 1996.2 (1996) | J. Shan: Edge Detection Algorithms in Photogrammetry and Computer Vision |
| Nr. 1997.1 (1997) | Erste Geodätische Woche Stuttgart, 7. - 12. Oktober 1996; herausgegeben von A. Gilbert und E.W. Grafarend |
| Nr. 1997.2 (1997) | U. Kälberer: Untersuchungen zur flugzeuggetragenen Radaraltimetrie |
| Nr. 1998.1 (1998) | L. Kubáček, L. Kubáčková: Regression Models with a weak Nonlinearity |
| Nr. 1999.1 (1999) | GIS-Forschung im Studiengang Geodäsie und Geoinformatik der Universität Stuttgart; herausgegeben von M. Sester und F. Krumm |

