

Zur Integration von Unsicherheit bei Vektor- und Rasterdaten

Dieter Fritsch, Michael Glemser, Ulrike Klein, Monika Sester, Stuttgart, und Günter Strunz, Oberpfaffenhofen

Zusammenfassung

Eine wesentliche Voraussetzung für eine umfassende Nutzung hybrider Daten ist die Betrachtung und Behandlung ihrer Unsicherheit. Es lassen sich nur dann fehlerhafte Interpretationen von Analyseergebnissen vermeiden, wenn die Unsicherheit als unverzichtbarer Bestandteil miterfaßt, gespeichert und in allen Operationen berücksichtigt wird. In diesem Beitrag wird ein wahrscheinlichkeitstheoretischer Ansatz zur Modellierung der geometrischen und thematischen Unsicherheit vorgestellt. Das verwendete hybride Datenmodell wird um die Beschreibung der Datenunsicherheit ergänzt. Die Berücksichtigung der Datenqualität wird anhand von Anwendungsbeispielen verdeutlicht.

Abstract: Integration of Uncertainty of Vector and Raster Data

An essential requirement for a comprehensive use of hybrid data is the consideration and processing of its uncertainty. Erroneous interpretations of analyses can be avoided if uncertainty is integrated as a mandatory component, stored and considered in all operations. In this contribution, a probabilistic approach is presented for modelling geometrical and thematic uncertainty. The used hybrid data model is extended to manage data uncertainty. The application of the concept is demonstrated by some examples.

1 Einführung

Die Verfügbarkeit digitaler räumlicher Daten hat sich mit steigender Anzahl von Anwendungen 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/ALB), Geologie (z. B. Digitale Geologische Karte), Umwelt (z. B. Umweltinformationssysteme der Länder) und kommerzielle Daten wie Straßendaten, Satellitenbilder (z. B. Landsat, Spot, MOMS, IRS1C, IRS1D) und Marketing-Informationen (z. B. Kaufkraftdaten). 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 der Datenaustausch und der Zugriff auf externe Datenbanken in naher Zukunft direkt und unmittelbar erfolgen wird. Entsprechende technische Spezifikationen werden dazu momentan erarbeitet (McKee, Kuhn, 1997). 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.

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). Sowohl die Geometrie- als auch die Thematikkomponente sind Einflüssen unterworfen, die Unsicherheiten in den Daten hervorrufen. In den nachfolgenden Abschnitten wird getrennt für beide Komponenten auf Ursachen, Größen und mögliche Parameter zur Modellierung 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

Es existieren verschiedene Ursachen, die auf die Größe der geometrischen Unsicherheit (Burrough, 1986) einwirken. Im besonderen trägt der Erfassungsvorgang hierzu bei. Er definiert eine Abbildung der realen Welt in ein GIS-Modell (David et al., 1996). 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 Schritte untergliedern, die jeweils charakteristische Einflüsse beinhalten (Caspary, 1992). Alle Einflüsse bewirken, daß die erfaßte Geometrie stets mit einer Variation verbunden ist. Sie gilt es, zu modellieren und quantitativ zu bestimmen. Dabei können verschiedene Ansätze verfolgt werden (Glemser, 1994). Ein möglicher Ansatz verwendet ein Band (Epsilon- oder Fehlerband), das um jede Linie gelegt wird, innerhalb dem die (unbekannte) wahre Linie zu finden ist (Blakemore, 1984). Das Band grenzt den Bereich der Unsicherheit räumlich ein. Die Form des Bandes und die Übertragung auf Linienzüge und Flächen sind Gegenstand einiger Untersuchungen (Shi, 1994, Caspary, Scheuring, 1992). Eine andere Möglichkeit ist durch die Theorie der Unschärfer Mengen (Fuzzy Subset Theory) gegeben (Zadeh, 1965). Im Gegensatz zu scharfen Mengen können die Elemente von unsharp Mengen auch nur partiell der Menge angehören. Der Grad der Zugehörigkeit wird zu jedem Element mit Hilfe einer zu definierenden Zugehörigkeitsfunktion ermittelt. Zur Modellierung der geometrischen Unsicherheit ist jedes Objekt als unscharfe Menge an Punkten zu formulieren. Im allgemeinen erhält ein Punkt am Rande des Variationsbereiches eine geringe, ein Punkt weit innerhalb des Objektes eine hohe Zugehörigkeit. Besonders anschaulich lassen sich mit diesem Ansatz fließende Übergänge zwischen natürlichen Objekten modellieren (Caspary, 1992). Es entsteht eine unscharfe Grenze im Gegensatz zu der sonst scharfen Trennung der Liniengeometrie. Die Betrachtung der geometrischen Primitive (Punkt, Linie, Fläche) als stochastische Variable (Zufallsvariable) führt zum stochastischen Modell als eine weitere Möglichkeit der Modellierung von Unsicherheit (Caspary, Scheuring, 1992, Glemser, 1996). Die Erfassung wird dabei als Zufallsprozeß angesehen, der eine charakteristische Verteilung des Ergebnisses erzeugt. Wirken nur zufällige Einflüsse bei der Erfassung, so kann von einer Normalverteilung der Zufallsvariablen ausgegangen werden. Zur Beschreibung der Normalverteilung sind als Parameter der Erwartungswert μ und die Varianz σ^2 zu bestimmen.

Das stochastische Modell bildet die Grundlage für die Beschreibung der Unsicherheit in diesem Beitrag. Zu ihrer Integration in ein GIS bedarf es der Festlegung, wie sie verwaltet und visualisiert werden kann. Die Varianz als wichtigster Parameter der Verteilung kann prinzipiell als ein zusätzliches Attribut angesehen und so verwaltet werden (Drummond, Ramlal, 1992). Eine anschauliche Darstellung ist zu erzielen, wenn auf Wahrscheinlichkeiten überge-

gangen wird. Sind Verteilung und Varianz bekannt, können Wahrscheinlichkeiten für beliebige Positionen im Raum unmittelbar berechnet werden (Kraus, Haussteiner, 1993). Die entstandene räumlich-kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsfunktion ist zu diskretisieren. Die Größe des Diskretisierungsintervalls Δ kann theoretisch durch das Abtasttheorem abgeleitet werden (z. B. Brigham, 1987). Die optimale Abtastung wird für $\bar{\Delta} \approx 0.5\sigma$ erreicht. Das gewählte Intervall sollte stets kleiner als $\bar{\Delta}$ gewählt werden. Als Ergebnis der Diskretisierung entsteht ein gleichförmiges Raster mit Rasterweite Δ . Die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten erfolgt in Abhängigkeit vom Objekttyp und der Entfernung d der Rasterzelle von der mittleren Objektgeometrie:

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

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

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

- Linien- und Punktobjekte benötigen zusätzlich eine Annahme über die Breite b der Objekte in der Wirklichkeit. Entsprechend ergibt sich die Wahrscheinlichkeit bezüglich eines Linienobjektes zu

$$p(x, y) = p(d, b) \cdot p(-d, b)$$

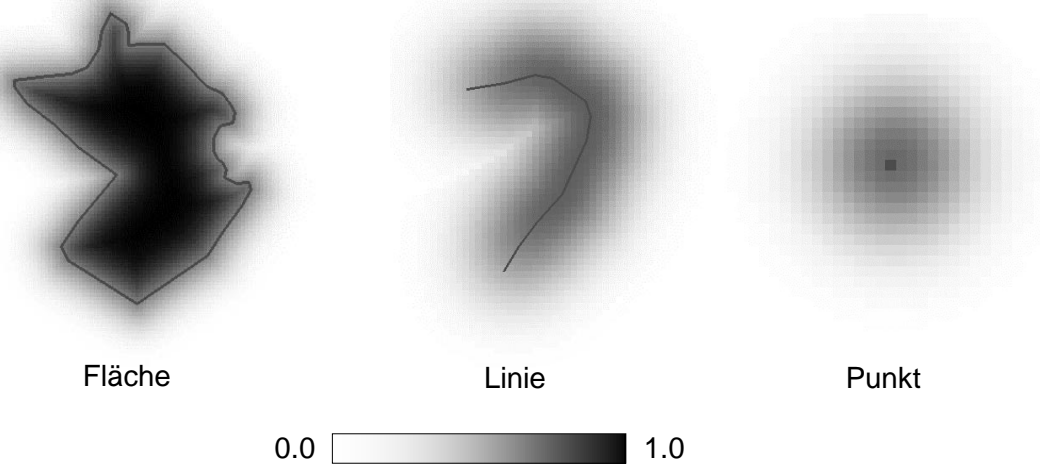
mit

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

- Bei Punktobjekten berechnet sich die gesuchte Wahrscheinlichkeit aus

$$p(x, y) = p(d, b)^2 \cdot p(-d, b)^2 \quad .$$

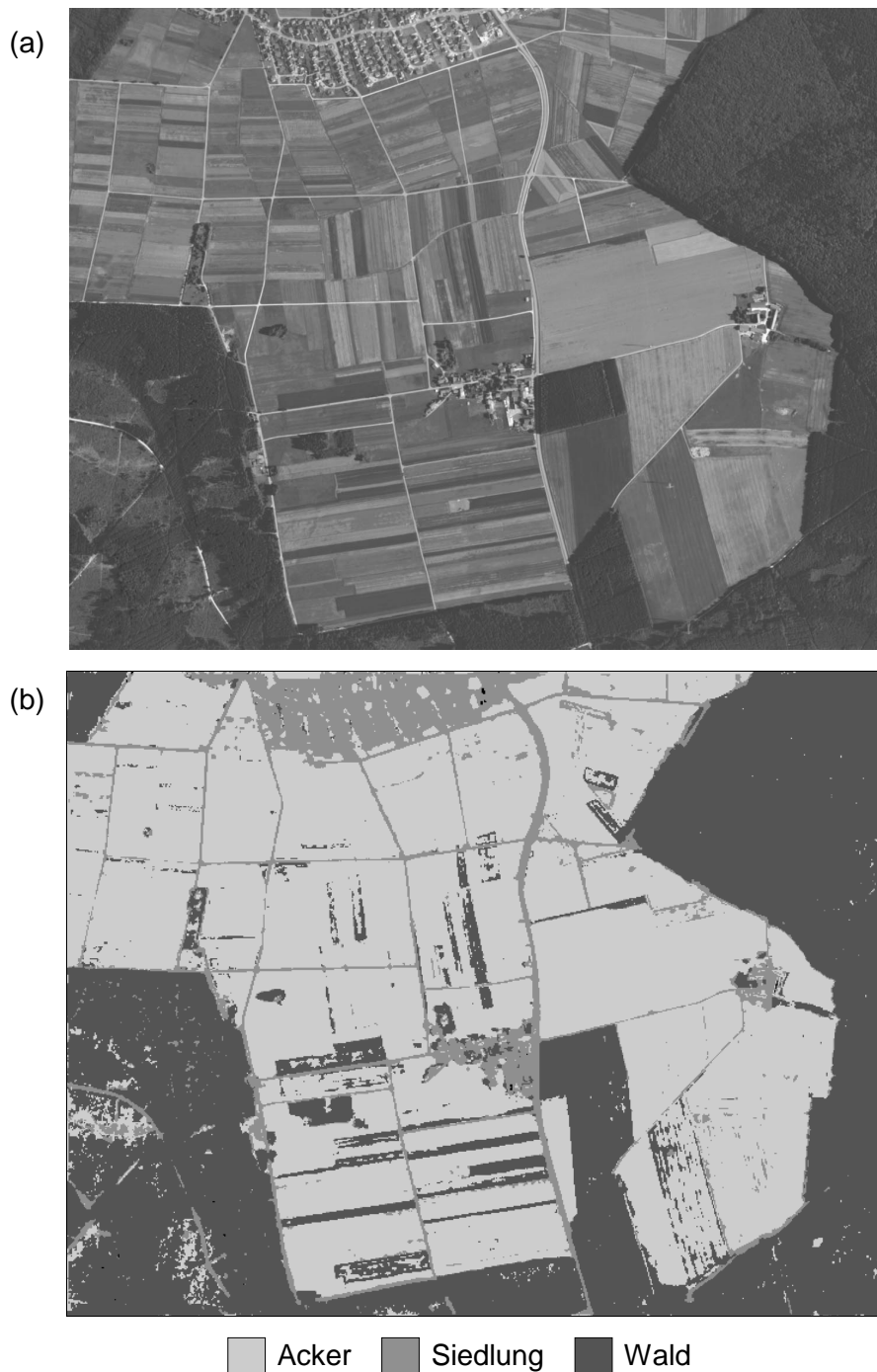
Die entstehenden Wahrscheinlichkeitsmatrizen können auch bei der Datenspeicherung genutzt werden. Sie ersetzen die Varianz als Parameter der Unsicherheit. Ein solcher Ansatz hat bei der Anwendung innerhalb eines hybriden GIS einige Vorteile, auf die in Kapitel 3.2 näher eingegangen wird. Figur 1 enthält Beispiele von Objekten, die mit ihren Wahrscheinlichkeitsmatrizen überlagert sind.



Figur 1: Beispiele zur Darstellung der Wahrscheinlichkeiten

2.2 Thematische Unsicherheit

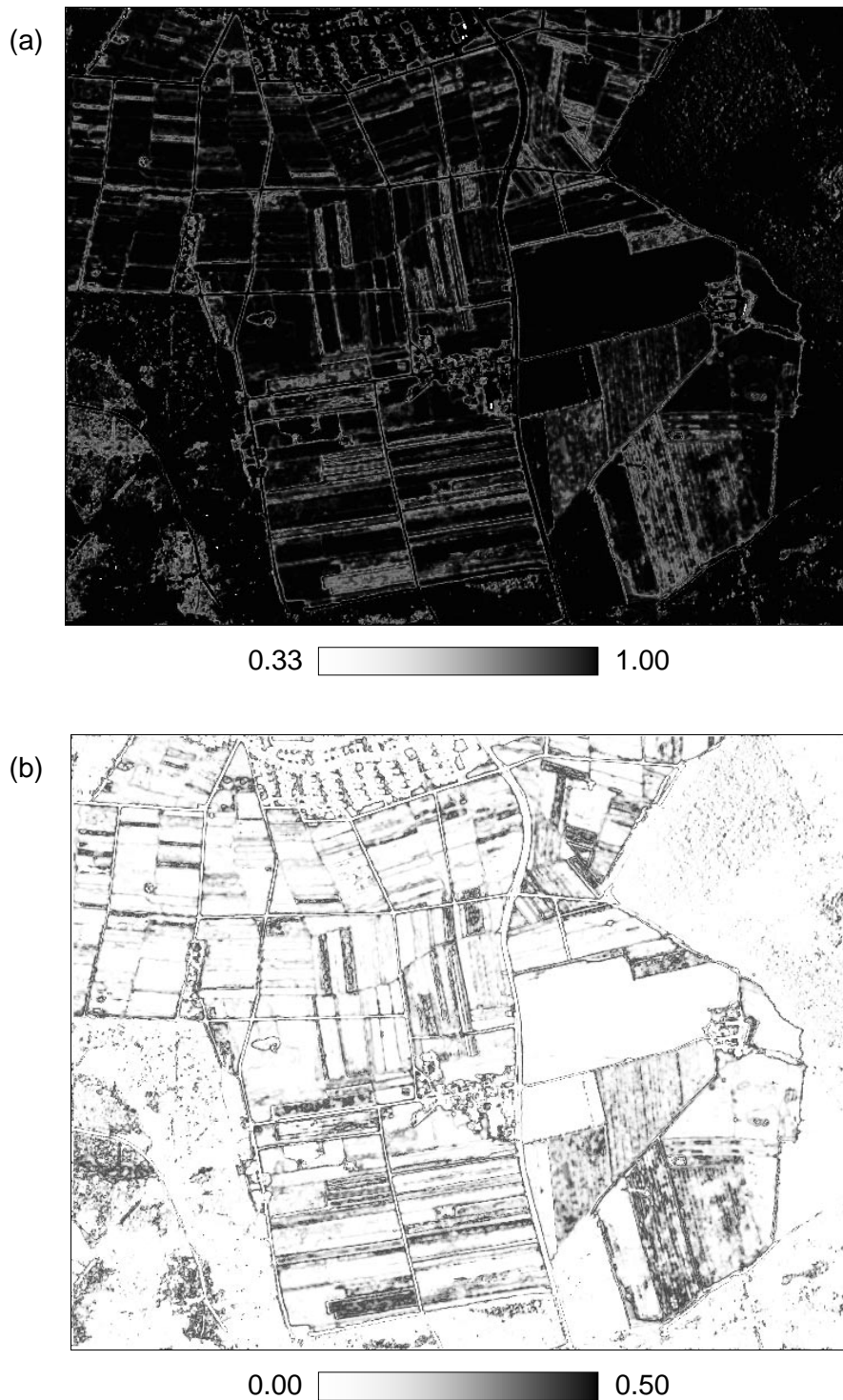
Die Beschreibung der Thematik erfolgt durch Attribute, die entweder diskrete oder kontinuierliche Werte annehmen können. Eine wichtige Datenquelle für die Erstellung thematischer Karten sind multispektrale Fernerkundungsaufnahmen, die als Ausgangsdaten für die nachfolgenden Untersuchungen dienen. Die 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 Landnutzungsklasse 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. Figur 2 zeigt ein Testgebiet (a) mit dem Ergebnis der Klassifizierung (b) der Landnutzungsklassen Acker, Siedlung und Wald.



Figur 2: 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. Diese beiden Größen liefern jedoch keine Information über die Genauigkeiten der einzelnen Klassen. Zur Beurteilung der Güte der einzelnen Klassen 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 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.



Figur 3: 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 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 Landnutzungsklassen zugewiesen werden kann. Die Dimension des Wahrscheinlichkeitsvektors entspricht der Anzahl der Landnutzungsklas-

sen. Der Wertebereich der größten Wahrscheinlichkeit liegt im Intervall $[0.33,1.00]$, der der zweitgrößten Wahrscheinlichkeit im Intervall $[0.00,0.50]$ und der der drittgrößten Wahrscheinlichkeit im Intervall $[0.00,0.33]$. Die Summe sämtlicher Wahrscheinlichkeiten pro Bildelement ergibt 1.00. Im Gegensatz zu den externen Genauigkeitsmaßen werden die Wahrscheinlichkeiten für die Klassenzugehörigkeiten als interne Genauigkeitsmaße bezeichnet. In Figur 3 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 Landnutzungs Klasse 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 Information zur Genauigkeitsbeschreibung der jeweiligen Landnutzungs Klasse 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 Landnutzungs Klassen räumlich überlappen können. Dies ist als ein Vorteil zu sehen, da dadurch Mischpixel, die längs der Grenzlinie zwischen verschiedenen Landnutzungs Klassen auftreten, modelliert werden können, ohne zusätzliche Klassen definieren zu müssen.

3 Hybrides Datenmodell mit Modellierung der Datenunsicherheit

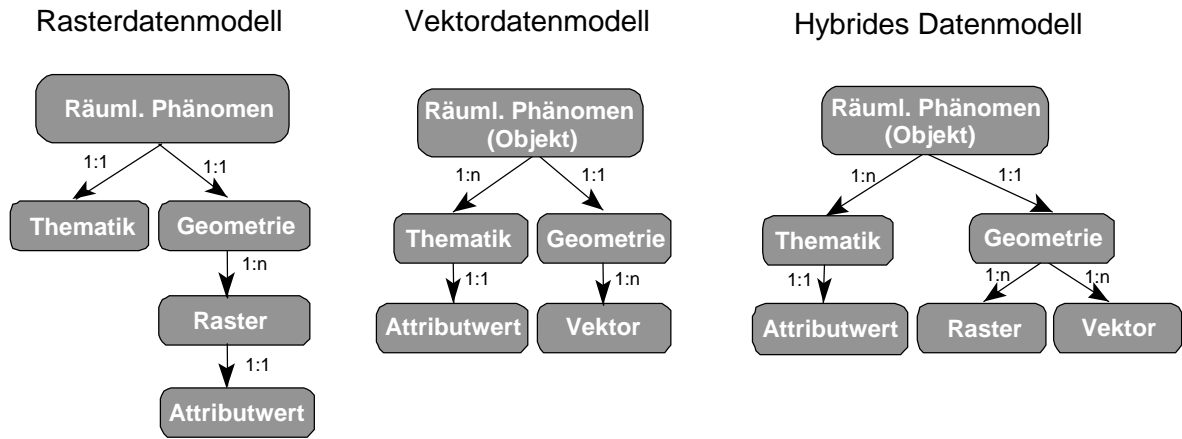
3.1 Hybrides Datenmodell

Eine einfache Charakterisierung eines GIS wird aufgrund der verwendeten Datenart erhalten. Beim Einsatz von Rasterdaten spricht man von einem Raster-GIS, bei Vektordaten von einem Vektor-GIS. Eine Vielzahl von Anwendungen läßt sich mit dem einen oder anderen System erledigen. Doch gibt es eine Reihe von Bereichen, die eine gemeinsame Verarbeitung von Raster- und Vektordaten erfordern. Dies führte zum Begriff des hybriden GIS (Fritsch, 1988). Ein hybrides GIS erlaubt die Integration sowohl von Vektor- als auch von Rasterdaten (Figur 4). In der Form der Integration bestehen jedoch Unterschiede. Sie kann in verschiedenen Stufen ausgeführt werden (Ehlers et al., 1989, Yang, 1992):

- 1. Stufe: Datenintegration – Einlesen und Visualisieren der jeweils anderen Datenart (z. B. Rasterbild im Hintergrund eines Vektor-GIS).
- 2. Stufe: Methodenintegration – Konversion der Datenart zum Zwecke der Analyse
- 3. Stufe: Modellintegration – Nutzung eines hybriden Datenmodells

Nur wenn die dritte Integrationsstufe in einem System realisiert ist, kann die Integration als vollständig bezeichnet werden. Dazu sind die beiden bisher getrennten Datenmodelle für Vektor- und Rasterdaten zu vereinigen. Es entsteht ein gänzlich neues, jetzt hybrides Modell. Die Umsetzung der dritten Integrationsstufe bedeutet für bestehende Systeme häufig eine komplette Neuentwicklung der Funktionalitäten. Hierin ist einer der Gründe zu finden, weswegen heute kein gängiges System dieser Stufe zuzuordnen ist.

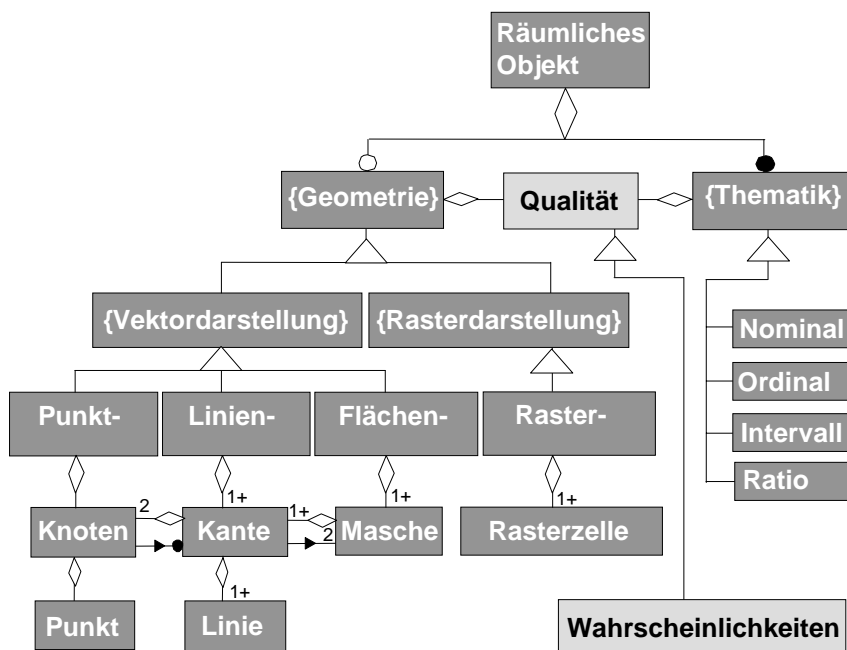
Die Vereinigung der beiden Modelle zu einem hybriden Modell bereitet aufgrund der Unterschiede der Modelle Schwierigkeiten. Das Raster-Modell verbindet Geometrie und Thematik durch die Zuweisung genau eines Attributwertes zu jeder Rasterzelle. Zelle und Wert definieren dabei eine untrennbare Einheit. Im Vektor-Modell sind Thematik und Geometrie über den Begriff des Objektes gekoppelt. Eine direkte Verbindung wie im Rastermodell besteht nicht mehr. In der Systemarchitektur führte dies zur oftmals anzutreffenden Aufteilung in der Datenhaltung, bei der Geometrie und Thematik unabhängig voneinander gespeichert werden (z. B. Sachdaten in einer Datenbank, Geometriedaten in einem Dateiensystem). Ein weiterer Unterschied besteht darin, daß im Rastermodell jeder Rasterzelle nur ein Attributwert (d. h. eine Thematik) beigefügt werden kann. Dagegen erlaubt das Vektor-Modell die Beschreibung beliebig vieler Attribute zu jedem Objekt.



Figur 4: Gegenüberstellung des Raster-, Vektor- und hybriden Datenmodells

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, innerhalb des Rasterdatenbestandes eine Objektbildung durchzuführen. Damit wird eine gemeinsame Basis durch den Oberbegriff des Objektes geschaffen, mit deren Hilfe sich die entsprechenden Daten strukturieren lassen.

In Figur 5 ist eine objektorientierte Beschreibung der entwickelten Modellierung in OMT-Notation (Rumbaugh et al., 1991) gegeben. Sie besitzt deutliche Ähnlichkeiten zum Vektor-Modell. 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 Thematisierungskomponente ist identisch zum Vektormodell.



Figur 5: Hybrides Datenmodell (OMT-Notation) mit Qualitätsmodellierung

3.2 Modellierung der Datenunsicherheit

Einflüsse zur geometrischen und thematischen Unsicherheit wirken prinzipiell auf Raster- und Vektordaten ein. Dies führt dazu, daß im hybriden Datenmodell Beschreibungen zur Unsicherheit der beiden Komponenten unabhängig von der Datenart berücksichtigt werden

müssen. Untersucht man die Annahmen, die bei der Erfassung der Daten getroffen werden, so ergibt sich eine vereinfachte Situation. Generell gilt bei der Erfassung das Prinzip, daß eine der beiden Komponenten als fest, die andere als variabel angenommen werden kann (Chrisman, 1991). Die jeweils variable Komponente ist zu bestimmen. Vektordaten entstehen, indem zu vorgegebenen Attributwerten die Ausdehnung dieser Attribute erfaßt wird. Rasterdaten geben dagegen eine fest definierte Form der Geometrie vor, so daß die entsprechenden Attributwerte zu jeder Zelle zu bestimmen sind. Da feste Werte keine Unsicherheiten beinhalten, müssen nur die Unsicherheiten in der erfaßten 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.

Wie in Kapitel 2 diskutiert, werden für die Beschreibung der Unsicherheit der Daten Wahrscheinlichkeiten genutzt. Sowohl für geometrische als auch thematische Unsicherheit lassen sich die Werte in Matrixform strukturieren. Figur 5 enthält zusätzlich die Erweiterung des hybriden Modells um die Komponenten der Beschreibung der Unsicherheit. Die Nutzung eines gemeinsamen Parameters für Geometrie und Thematik 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.

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 Objektbildung

Zur Realisierung eines hybriden Datenmodells ist es notwendig, innerhalb des Rasterdatenbestandes eine Objektbildung durchzuführen, d. h. benachbarte Rasterzellen sind zu einem Objekt zusammenzufassen, wenn ein gegebenes Einheitlichkeitskriterium erfüllt ist. Im Bereich der Fernerkundungsdaten werden benachbarte Bildelemente zu einem Objekt zusammengefügt, wenn sie dieselbe Landnutzungs Klasse aufweisen. Im Zusammenhang mit der Modellierung der thematischen Unsicherheit sind die Wahrscheinlichkeiten der Bildelemente auf das zu bildende Objekt zu übertragen, um ihre Berücksichtigung in weiterführenden Analysen zu gewährleisten.

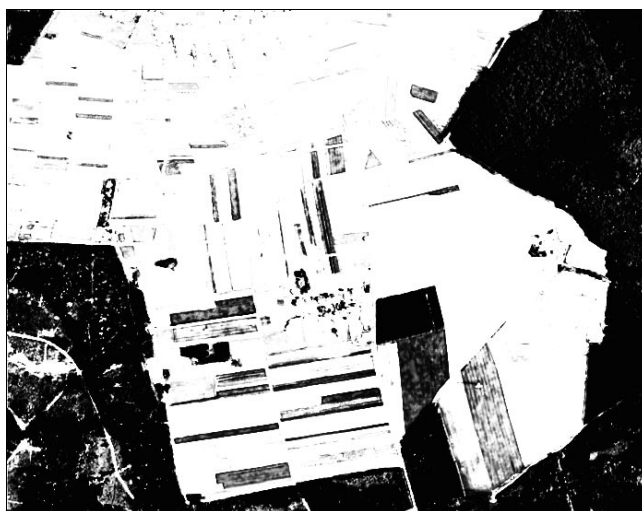
(a) Acker



(b) Siedlung



(c) Wald

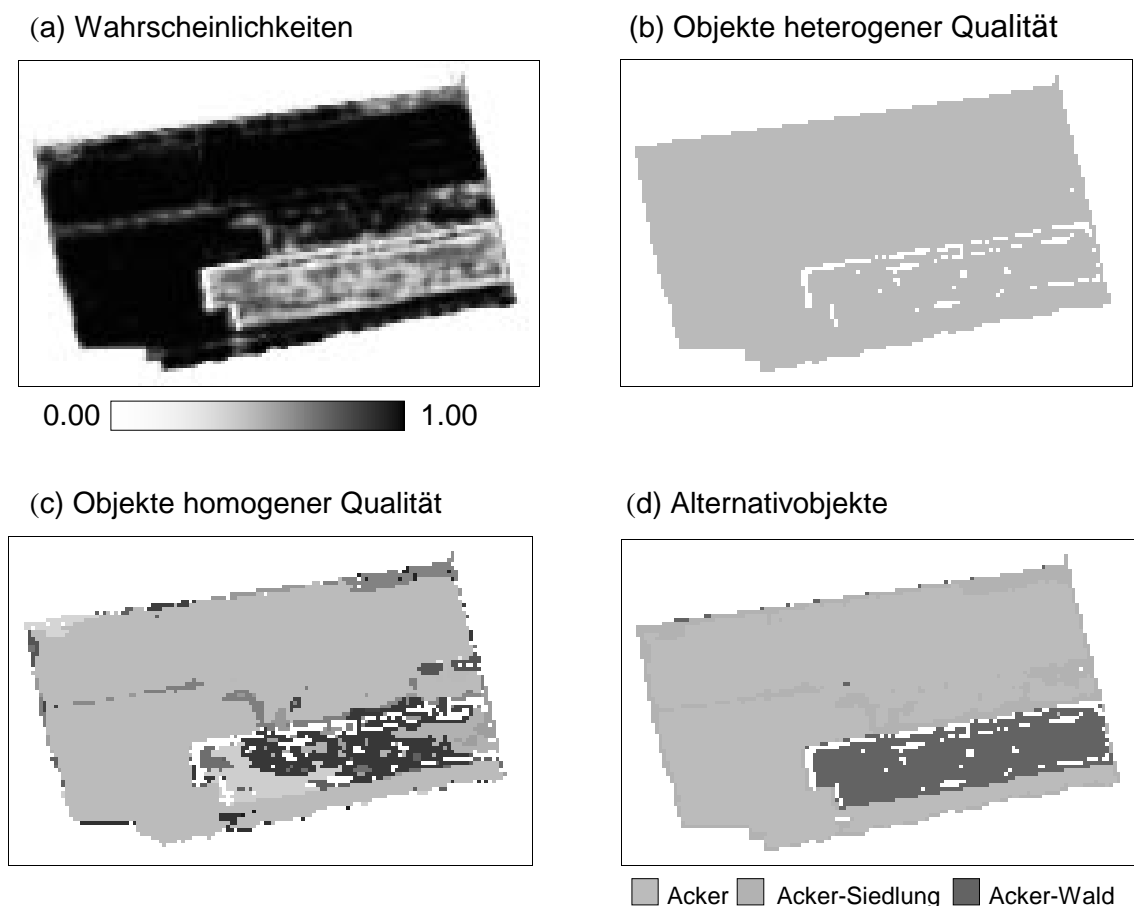


0.00  1.00

Figur 6: Darstellung der Wahrscheinlichkeiten

Ausgangsdaten für die Objektbildung sind die Landnutzungsklassen und die dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten. Die Aufgabe besteht in der Bildung von Objekten innerhalb der einzelnen Landnutzungsklassen, z. B. sind zur Bildung von Objekten der Klasse Acker alle Bildelemente, die als Acker klassifiziert wurden, einzubeziehen. Dabei ist jedoch die Größenordnung ihrer Wahrscheinlichkeit zu berücksichtigen. In Figur 6 werden die Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Klassen getrennt voneinander dargestellt. Dunkle bzw. helle Bereiche deuten auf eine hohe bzw. geringe Wahrscheinlichkeit hin.

Es werden drei Verfahren zur Objektbildung unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeiten vorgestellt, wobei nur die Bildelemente verwendet werden, deren Wahrscheinlichkeiten größer als der Grenzwert $p=0.20$ sind. Der Vergleich der Verfahren erfolgt für einen Teil des Bildes anhand der Ergebnisse für die Klasse Acker. In Figur 7 sind unter (a) die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten und unter (b), (c) und (d) die gebildeten Objekte enthalten. Die Darstellung der Wahrscheinlichkeiten zeigt, daß es sich um einen Bereich handelt, der zu einem großen Teil mit hoher Wahrscheinlichkeit zugewiesen werden kann und einen Streifen beinhaltet, der nur mit geringer Wahrscheinlichkeit als Acker bestimmt wird.



Figur 7: Ergebnisse der Objektbildung für Acker

Ein sehr einfaches Verfahren zur Objektbildung besteht darin, pro definierter Landnutzungsklasse benachbarte Bildelemente unabhängig von der Größenordnung der Wahrscheinlichkeit zu Regionen zusammenfassen (Figur 7b). Die so gebildeten Objekte unterscheiden sich von denen der herkömmlichen Objektbildung um die zusätzliche Qualitätsinformation und um den Überlappungsbereich mit den anderen Landnutzungsklassen. Da die einzelnen Objekte Bereiche sehr unterschiedlicher thematischer Genauigkeit aufweisen, können sie als Objekte heterogener Qualität bezeichnet werden. Die Weiterverarbeitung dieser Objekte in einem GIS

unter Berücksichtigung der Qualität erfordert die Bereitstellung der Wahrscheinlichkeit pro Bildelement.

In einem zweiten Verfahren werden Objekte (Figur 7c) aufgrund ähnlicher Wahrscheinlichkeiten benachbarter Bildelemente durch Regionenwachstum (Haralick, Shapiro, 1985) gebildet. Das Einheitlichkeitskriterium besteht darin, die Wahrscheinlichkeit eines Bildelementes mit der eines benachbarten Bildelementes zu vergleichen. Ist die Differenz der Wahrscheinlichkeiten kleiner als ein definierter Grenzwert, so wird das Bildelement in das Objekt mit einbezogen. Aufgrund des gewählten Kriteriums ergeben sich Bereiche ähnlicher thematischer Genauigkeit, die als Objekte homogener Qualität bezeichnet werden können. Große Objekte deuten auf (homogene) Bereiche gleicher Wahrscheinlichkeit hin, kleine Objekte auf (inhomogene) Bereiche unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit.

Bei den beiden bisher beschriebenen Verfahren wird die Objektbildung für die einzelnen Landnutzungsklassen getrennt durchgeführt. Erst die Überlagerung der Ergebnisse zeigt die Überlappungsbereiche an. Ein weiterer Ansatz liefert Objekte mit ihren potentiellen Alternativen (Figur 7d). Die Objektbildung wird aufgrund gleicher Klassenzugehörigkeiten im Wahrscheinlichkeitsvektor benachbarter Pixel jedoch unabhängig von der Größenordnung der Wahrscheinlichkeiten durchgeführt. Zwei benachbarte Pixel werden demselben Objekt zugewiesen, wenn sie beide entweder eine einzige, eindeutige Klassenzugehörigkeit ($p=1.0$) zur gleichen Objektklasse oder gemischte Klassenzugehörigkeiten zu den gleichen Objektklassen (jeweils $p<1.0$) aufweisen. Dies erfordert die Definition aller vorhandenen gemischten Objektklassen zusätzlich zu den bereits definierten Objektklassen. Im Falle des Testgebietes sind das die Mischklassen Acker-Siedlung, Acker-Wald, Siedlung-Wald und Acker-Siedlung-Wald. Insgesamt werden somit sieben Objektklassen definiert (drei reine Objektklassen, vier Mischklassen). Das beschriebene Verfahren bietet die Möglichkeit, für die Bereiche, die nur mit geringer Wahrscheinlichkeit zugewiesen werden konnten, eine alternative Klasse anzugeben. Figur 7d läßt erkennen, daß die Bildelemente innerhalb des Streifens, der nur unsicher als Acker bestimmt wurde, alternativ der Klasse Wald zugewiesen werden. Die Begrenzungslinie des Objekts wird alternativ der Klasse Siedlung zugewiesen. Dies kann beispielsweise auf einen Feldweg entlang des Flurstückes hindeuten.

Die unterschiedlichen Ergebnisse der Objektbildungen (Figur 7b, 7c und 7d) sollen nun mit dem Ergebnis der Klassifizierung und dem Satellitenbild, das die Realität beschreibt, verglichen werden. Der Vergleich wird exemplarisch für den Streifen durchgeführt. Dieser Streifen wird sowohl der Objektklasse Wald als auch der Objektklasse Acker zugewiesen. Da die Wahrscheinlichkeiten für die Zugehörigkeit zur Klasse Wald größer sind, wird der Streifen in der Klassifizierung zum größten Teil der Klasse Wald zugewiesen. Im Satellitenbild hingegen ist Acker zu erkennen. Das Auftreten der gemischten Objektklassen deutet auf Problemflächen hin. Diese können, wie Figur 7d zeigt, linienförmig oder flächenförmig sein. Die linienförmigen Mischobjekte beschreiben die thematische Unsicherheit im Grenzverlauf zwischen zwei Objekten. Die flächenförmigen Mischobjekte deuten eher auf Probleme bei der Klassifizierung hin. Im Testgebiet wird den meisten der Mischobjekte Acker-Wald fälschlicherweise Wald zugeordnet. Es handelt sich um Ackerflächen, deren Bewuchs ein ähnliches Spektralverhalten wie Wald aufweist. Dies bedeutet, daß eine weitere Landnutzungsklasse zu definieren ist, um das Ergebnis durch eine erneute Klassifizierung zu verbessern.

4.2 Vektor-/Raster-Konversionen

Wichtige Grundfunktionen innerhalb einer hybriden Verarbeitung stellen die Vektor-/Raster-Konversionen dar. Sie ermöglichen die Umformung der Daten von der einen in die andere Repräsentation. Ein solcher Schritt ist notwendig, wenn die anzuwendende Methode nur für eine Art implementiert wurde und die Daten in bestimmter Form voraussetzt. Für den Nutzer

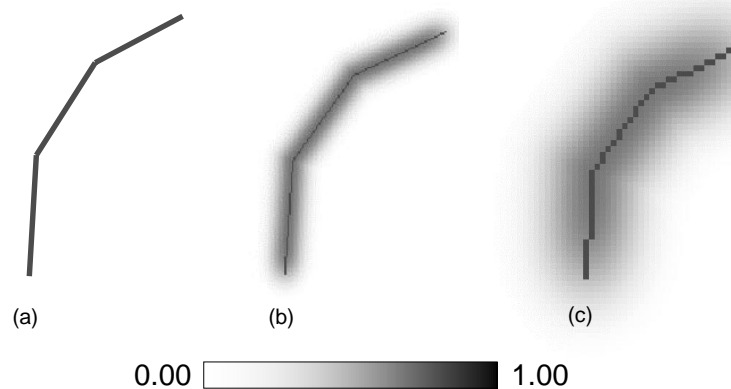
ergibt sich der Vorteil, daß alle Methoden unabhängig von der Form der vorhandenen Daten anzuwenden sind. Er ist somit in der Lage, immer die geeignetste Methode für das jeweilige Problem auszuwählen. Die Arbeitsweise wandelt sich von einer methodenorientierten in eine problemorientierte Vorgehensweise. Die beiden Konversionsarten gestalten sich unterschiedlich schwierig. Die Vektor-Raster-Konversion stellt sich als der einfachere Prozeß dar, da sie in einem Schritt ablaufen kann. In der Praxis wird diese Konversion recht häufig eingesetzt. Ein Beispiel sind Graphikkarten, die diese Aufgabe zur Darstellung von Daten auf Bildschirmen ausführen. Demgegenüber bereitet die Raster-Vektor-Konversion deutlich mehr Probleme. Sie kann nur als mehrstufiger Prozeß ausgeführt werden, der oftmals mehrere Ergebnisse liefert. Durch den Einsatz von zusätzlichem Wissen lassen sich problemspezifisch optimierte Lösungen erzeugen.

Hybride Systeme verwenden Konversionen zusammen mit Analysemethoden als Prozesse, die im Hintergrund vor oder nach der eigentlichen Funktion ablaufen. Sie sollten daher ohne zusätzliche Nutzerinteraktion vollständig automatisiert erfolgen. Im folgenden werden je ein Lösungsansatz für beide Konversionsrichtungen mit Berücksichtigung der Unsicherheit erläutert.

4.2.1 Vektor-Raster-Konversion

Ein gebräuchlicher Ansatz zur Vektor-Raster-Konversion stellt der Bresenham-Algorithmus (Jäger, 1990) dar, der die Konversion einer Linie erlaubt. Nach der Transformation von Anfangs- und Endpunkt der Linie schreitet man zeilenweise voran und bestimmt zu jeder Zeile, welche Spalte von der Linie durchquert wird. Alle berührten Rasterzellen zählen zu den gesuchten Linienpixeln. Für punkt- und flächenförmige Objekte ergeben sich geringfügig zu modifizierende Aufgaben.

Als einziger Parameter des Prozesses ist die Rasterweite vom Nutzer festzulegen. Sie wird anwendungsabhängig anhand des Maßstabsbereiches der Anwendung gewählt. Oftmals sind Informationen über den Maßstab aber nicht zugänglich, oder es treten heterogene Werte innerhalb eines Datenbestandes auf, so daß dieser Weg ungeeignet ist. Ersatz liefern die Wahrscheinlichkeitsmatrizen, die für jedes Objekt gebildet wurden. Die verwendete Rasterweite (Kapitel 2.1) eignet sich auch zur Festlegung der Auflösung bei der Vektor-Raster-Konversion. Dadurch wird eine direkte Verbindung der Objektgeometrie zu ihrer Unsicherheit hergestellt, d. h. je genauer die Geometrie ist, desto kleiner ist die Rasterweite (Figur 8).



Figur 8: Vektor-Raster-Konversion eines Objektes (a) mit kleiner (b) und großer Unsicherheit (c)

4.2.2 Raster-Vektor-Konversion

Die einfachste Lösung zur Raster-Vektor-Konversion ergibt sich, wenn man jedes Pixel gesondert betrachtet und einzeln in die Vektorgeometrie umwandelt. Die Ausdehnung der Rasterzelle wird dabei durch Umringslinien beschrieben (z. B. ein quadratisches Pixel durch vier Kanten des Quadrats). Aus jeder Rasterzelle entsteht stets ein flächenförmiges Objekt. Dieser einfache Ansatz ist allgemein anzuwenden, weist aber deutliche Schwächen auf. Neben dem stufigen Erscheinungsbild ist eine Unterscheidung im Objekttyp nach punkt-, linien- und flächenförmigen Objekten nicht möglich. Welcher Typ aus der Konversion erhalten werden soll, ist durch die jeweilige Anwendung festgelegt. Wichtigste Einflußfaktoren für dessen Wahl sind der Maßstabsbereich im Verhältnis zur Objektgröße und die Bedeutung der Objekte. Da alle drei Typen in Anwendungen vertreten sein können, ist jeweils eine typspezifische Konversion bereitzuhalten.

Die Raster-Punkt-Konversion dient der Erzeugung eines Objektes, dessen Geometrie durch einen Einzelpunkt beschrieben wird. Sie kann in einfacher Weise durch die Berechnung des Schwerpunktes der Objektfläche erfolgen.

Im Fall der Raster-Linien-Konversion wird eine linienförmige Geometrie erzeugt. Das von uns verwendete Verfahren (Cramer, 1993) untergliedert sich in die Distanztransformation, die Skelettierung, die Linienextraktion und die Linienglättung. Die Distanztransformation kodiert den Abstand zum Rand des Objektes für jedes Objektpixel in Abhängigkeit von der eingesetzten Metrik und dient als Basis für die nachfolgende Skelettierung. Das Skelett ist das auf eine Pixelbreite reduzierte Minimalgerüst des Objektes und entspricht damit einer Mittelachsen-darstellung. Die topologische Skelettierung ist ein spezielles Verfahren, das die gefundenen Skelettpunkte nach ihrer Bedeutung in Linienanfangs- bzw. Endpixel, Knotenpixel und Linienpixel klassifiziert (Lichtner, 1981) und bereits die Topologie des Linienobjektes erzeugt. Die eigentliche Raster-Vektor-Konversion findet innerhalb der Linienextraktion statt. Ausgehend von einem Anfangspixel werden solange benachbarte Skelettpixel gesucht, bis man bei einem End- oder Knotenpixel angelangt ist. Diese Prozedur wird so oft wiederholt, bis alle Linienpixel einmal durchlaufen sind. Alle Linienpixel werden anschließend in Linienpunkte transformiert. Eine Glättung der Linienpunkte über den bekannten Douglas-Peucker-Algorithmus (Douglas, Peucker, 1973) beseitigt das stufige Erscheinungsbild. Als einziger Parameter ist der Schrankenwert zur Glättung festzulegen. Da in einer hybriden Anwendung unterschiedliche Rasterweiten auftreten, ist eine variable Wahl in Abhängigkeit der Rasterweite erforderlich. Wie bereits erwähnt, gibt die Auflösung einen Hinweis auf die enthaltene geometrische Unsicherheit, so daß die Glättung in Abhängigkeit von der Qualität des Objektes erfolgen kann.

Flächen werden in der Vektorgeometrie durch Umringslinien beschrieben, so daß eine Raster-Flächen-Konversion durch eine Raster-Linien-Konversion ersetzt werden kann. Nach der Extraktion des Randes des Rasterobjektes ist mit den entstandenen Randlinien eine Maschenbildung durchzuführen. Jede Masche entspricht einer Fläche.

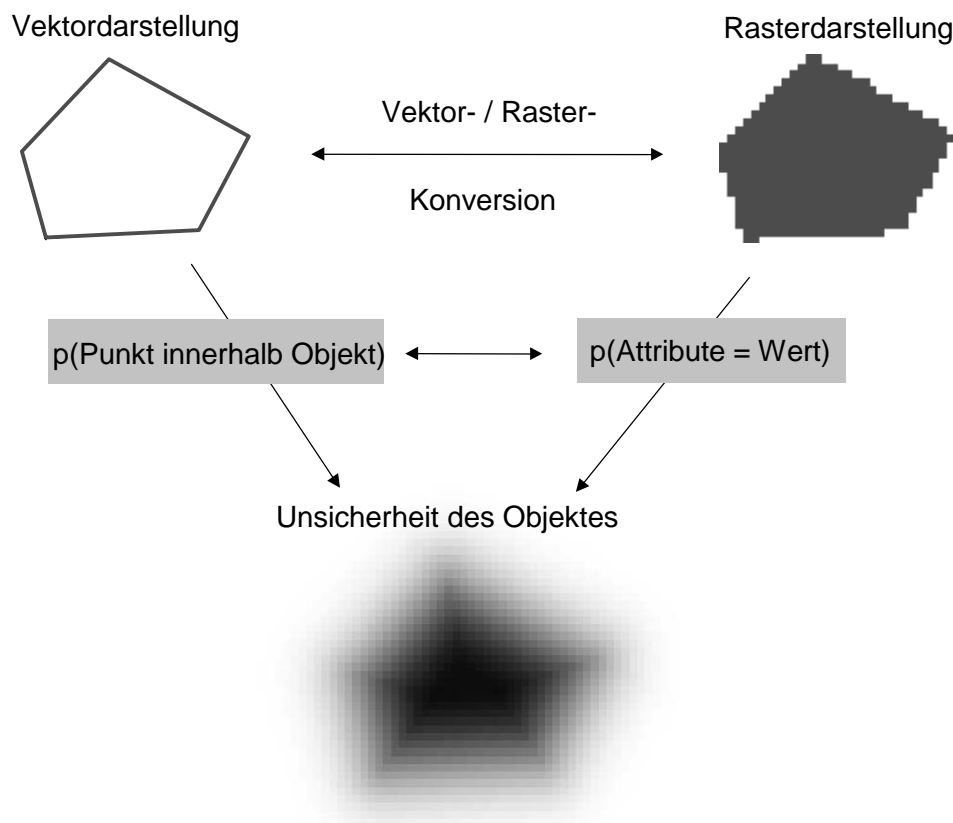
4.2.3 Qualität der Konversionen

Aufgrund der Veränderung der Objektgeometrie stellt sich die Frage nach der Qualität einer Konversion. Die Bewahrung der Qualität ist die wesentliche Voraussetzung für die Anwendung von hybriden Methoden. Innerhalb der Vektor-Raster-Konversion wird die Qualität durch die Festlegung der Rasterweite beeinflusst. Je kleiner die Rasterweite ist, desto genauer kann die Übertragung ins Raster erfolgen (Burrough, 1986). Der Einfluß kann vernachlässigt werden, wenn die Rasterweite klein gegenüber der Unsicherheit der Liniengeometrie ist. Dies wird erreicht, indem die Rasterweite identisch zur Auflösung der Wahrscheinlichkeitsmatrix

des Objektes gewählt wird (Kapitel 2.1). Der Schrankenwert zur Glättung ist für die Qualität der Vektorgeometrie bei der Raster-Vektor-Konversion verantwortlich. Je kleiner der Schrankenwert ist, desto geringer fallen die Positionsabweichungen zwischen Raster- und Vektorgeometrie aus. Durch die Anpassung des Schrankenwertes an die Rasterweite der Wahrscheinlichkeitsmatrix wirken sich die Positionsabweichungen wiederum nur geringfügig auf die Ausdehnung des Objektes aus und können vernachlässigt werden. Dadurch ist sichergestellt, daß durch mehrfache Anwendung der Konversionen nicht schleichend ein Verlust an Genauigkeit entsteht, der den beliebigen Gebrauch der hybriden Methoden einschränken würde.

4.2.4 Konversion der Unsicherheit

Die gegenseitige Konversion in die jeweilige andere Datenart bewirkt den Wechsel in der geometrischen Darstellungsart. Nachdem die Geometrie eines Rasterobjektes als fest definiert wurde, die Geometrie eines Vektorobjektes aber Unsicherheiten beinhaltet (Kapitel 2, Kapitel 3.2), ist mit der Konversion der Darstellungsart auch immer eine Konversion der Unsicherheit verbunden.



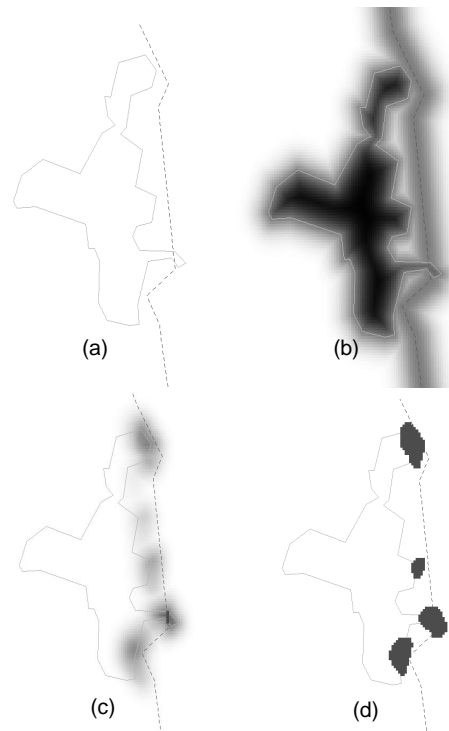
Figur 9: Konversion der Unsicherheit

Diese Konversion ist durch die Eigenheiten der beiden Datenarten begründet. Bei einem Vektorobjekt 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 gleichzeitig die Aussage, daß man sich innerhalb des Objektes befindet, unsicher. Diese Unsicherheit läßt sich auf die sichere Gültigkeit der Attribute übertragen. Befindet man sich nur unsicher innerhalb des Objektes (z. B. in den

Randbereichen), so können die mit dem Objekt verbundenen Attribute auch nur unsicher zutreffen. Damit gilt die Behauptung, daß an einer festen Stelle (insbesondere innerhalb eines Pixels) die Attribute unsicher festgelegt sind. Dieser Wechsel von der Unsicherheit in der Geometrie zu der Unsicherheit in den Attributen findet genau innerhalb der Vektor-Raster-Konversion statt. Da sich nur die zugehörige Interpretation ändert, bleiben die Größenwerte (Wahrscheinlichkeiten) und damit die Wahrscheinlichkeitsmatrizen unverändert erhalten (Figur 9). Entsprechendes trifft für die Raster-Vektor-Konversion zu.

4.3 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 überlappenden 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.



Figur 10: Verschneidung zweier Objekte (a), deren Unsicherheit (b), Ergebnisobjekt mit Unsicherheit (c) und Objektgeometrie für $p=0.25$

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 Objekte wieder Wahrscheinlichkeitsmatrizen berechnet werden, so daß diese für weiterführende Zwecke in gleicher Weise im System zu benutzen sind.

Figur 10 verdeutlicht die Verschneidung an einem Beispiel. Ein flächenhaftes Objekt (Stadtgebiet) und ein linienhaftes Objekt (Stromleitung) werden miteinander verschnitten (Figur 10a). Sie besitzen unterschiedliche geometrische Genauigkeiten, wie aus den visualisierten Wahrscheinlichkeitsmatrizen ersichtlich ist (Figur 10b). Das Ergebnis der Verschneidung (Figur 10c) 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 Figur 10c visualisiert ist. Es existieren weitere Regionen, 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 (Figur 10d).

5 Ausblick

Die Arbeiten zur Integration der geometrischen und thematischen Unsicherheit sind um einige wichtige Erweiterungen zu ergänzen. Die Einbeziehung von digitalen Geländemodellen, Meßreihen geophysikalischer Parameter usw. macht es erforderlich, im Bereich der thematischen Unsicherheit die Betrachtungen auf kontinuierliche Attributwerte auszudehnen, so daß Daten wie z. B. Höhen oder Temperaturen qualitativ beschrieben und deren Unsicherheiten bei Analysen berücksichtigt werden können. Da sich hierfür Wahrscheinlichkeiten nicht eignen, sind alternative Qualitätsmodelle in den Ansatz einzufügen.

Das Schwergewicht der bisher untersuchten Analyseverfahren lag auf der Anwendung von geometrischen Operationen. Es fehlen jedoch Untersuchungen zu komplexen Analysen mit kombinierten geometrischen, topologischen und thematischen Fragestellungen. In diesem Zusammenhang spielen Korrelationen der gemeinsam zu verarbeitenden Daten eine wichtige Rolle. Zum einen ist der Grad der Korrelation der einfließenden Daten qualitativ und quantitativ zu bestimmen, und zum anderen sind die Auswirkungen nicht vernachlässigbarer Korrelationen auf das Analyseergebnis zu untersuchen.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des von der DFG geförderten Projektes „Datenunsicherheit in hybriden Geo-Informationssystemen“, das vom Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart und vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen bearbeitet wird.

Referenzen

- Bill, R., Fritsch, D. (1991): Grundlagen der Geo-Informationssysteme. Band 1: Hardware, Software und Daten. Wichmann, Karlsruhe.
- Blakemore, M. (1984): Generalization and Error in Spatial Data Bases. Cartographica, Vol. 21, 131-139.
- Brigham, E. O. (1987): FFT: Schnelle Fourier-Transformation. Oldenbourg Verlag, München.
- 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).
- David, B., Herrewegen, M., Salge, F. (1996): Conceptual Models for Geometry and Quality of Geographic Information. In: Burrough, P. A., Frank, A. U., *Geographic Objects with Indeterminate Boundaries*, GISDATA Vol. 2, Taylor&Francis.
- Douglas, D. H., Peucker, T. K. (1973): Algorithms for the Reduction of the Number of Points Required to Represent a Digitized Line of Caricature. *The Canadian Cartographer*, Vol.10.
- Drummond, J.; Ramlal, B. (1992): A Prototype Uncertainty Sub-System implemented in ITC's ILWIS PC-based GIS and tested in a Dutch Land Reallotment Project. *EGIS-Proceedings*, Vol. 1, 234-243.
- 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.
- 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.
- Haralick, R. M., Shapiro, L. G. (1985): Image segmentation techniques. *Computer Vision Graphics and Image Processing*, Vol. 29, 100-132.
- 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.
- Lichtner, W. (1981): Anwendungsmöglichkeiten der Rasterdatenverarbeitung in der Kartographie. *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen*, Universität Hannover, Nr. 105.
- 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.
- Richards, J. A. (1993): Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer-Verlag
- Rumbaugh, J., Blaha, M., Premerlani, W., Eddy, F., Lorenzen, 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.
- Yang, H. (1992): Zur Integration von Vektor- und Rasterdaten in Geo-Informationssystemen. DGK, Reihe C, Nr. 389, München.
- Zadeh, L. A. (1965): Fuzzy Sets. Information and Control, Vol. 8, 338-353.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. DIETER FRITSCH, Universitätsprofessor und Direktor des Instituts für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, E-Mail: Dieter.Fritsch@ifp.uni-stuttgart.de.

Dipl.-Ing. MICHAEL GLEMSER, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, E-Mail: Michael.Glemser@ifp.uni-stuttgart.de.

Dr.-Ing. ULRIKE KLEIN, Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, E-Mail: Ulrike.Klein@ifp.uni-stuttgart.de.

Dr.-Ing. MONIKA SESTER, Leiterin der Forschungsgruppe „Geo-Informationssysteme“ am Institut für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, E-Mail: Monika.Sester@ifp.uni-stuttgart.de.

Anschrift: Institut für Photogrammetrie, Geschwister-Scholl-Straße 24, 70174 Stuttgart.

Dr.-Ing. GÜNTER STRUNZ, Leiter der Forschungsgruppe „Datenanalyse und GIS“ am Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum. Anschrift: Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum, Postfach 1116, 82230 Oberpfaffenhofen, E-Mail: Guenter.Strunz@dlr.de.