

## INTEGRATION OF SATELLITE IMAGERY AND GIS FOR LAND-USE CLASSIFICATION PURPOSES

**Jorge SILVA CENTENO**

Departamento de Geomática - UFPR

C.P. 19011 - Centro Político

81.531.990 Curitiba - Brazil

centeno@geoc.ufpr.br

**KEY WORDS:** Alice, Guidelines, Proceedings, Photogrammetry, Remote Sensing, Curiosity.

### ZUSAMMENFASSUNG

This paper focus on the use of spectral sensors data in conjunction with GIS databases. The paper describes the cooperative use of spatial information and remote sensing imagery to improve image analysis as well as fusion of cues from each datasource for land-use classification purposes. As the analysis is performed within a digital environment, a raster approach is proposed. In order to integrate knowledge in the digital environment, a declarative form was selected to represent information. A rule based system, in which knowledge is represented using conditional expressions and syntax, composed of antecedents, logical combination of propositions and consequences, containing a collection of decisions, is here used. Since the envolved concepts are vague, the use of less formal logic to represent knowledge is best suited to handle them. Therefore, the adopted strategy is based on fuzzy logic combination rules.

First, cues about land-use classes are obtained from each datasource. Since the nature of both datasets are different, a common base is established using fuzzy representation of information. In this manner, the information derived from each datasource, GIS and satellite imagery, can be combined using fuzzy logic.

### 1 EINLEITUNG

Aufgrund der rasanten technologischen Entwicklung der letzten Jahren, erlebten die Methoden der Bildverarbeitung tiefgreifende Veränderungen, die sich auf die Art der Problemlösungen in der Fernerkundung auswirkten. (Ehlers, 1995) sieht die rasante Hardware- und Software-Entwicklung im GIS-Bereich (Geographische-Informationssysteme), die wachsende Verfügbarkeit an hochauflösenden Sensordaten und die Fortschritte in der Automation auf dem Feld der Bildanalyse als die bedeutendsten Ursachen an. Den Wissenschaftlern der Gegenwart stellt sich das Problem der anwachsenden Datenmengen, ihrer Kombination und der Auswahl des besten Datentypes zur Lösung eines bestimmten Problems. Die Annahme, daß die Fernerkundung allein alle Probleme lösen kann ist falsch, denn zur Auswertung dieser Daten sind zusätzliche Informationen und Wissen über die Natur der Objekte und ihrer Umwelt notwendig.

Satellitenbilder liefern eine aktuelle, aber begrenzte Beschreibung der Oberfläche unseres Planeten. Die Daten der Fernerkundung spiegeln die Variation der spektralen Eigenschaften der Erdoberfläche wieder. Der Nutzer von diesen Daten ist nicht an den Daten selbst interessiert, sondern verlangt vielmehr Informationen zu einem bestimmten Thema, wie zum Beispiel der Zustand der Vegetation oder der Fruchtbarkeit eines Bodens. Der Übergang „von Daten zu Information“, erfolgt durch die Interpretation, basierend auf Kenntnissen und Erfahrungen eines menschlichen Experten.

Wegen der großen Vielfalt an Arten von digitalen Bildern wurde eine allgemein einsetzbare Methode zur Auswertung bildhafter Informationen noch nicht gefunden, aber (Bähr, 1998) zeigt, daß die Einbeziehung von externem Wissen dazu beitragen kann, einige Fragen bei der Suche nach einer automatischen Bildanalyse zu lösen. Eine dieser Fragen bezieht sich auf die Kombination von Satellitenbildern mit anderen raumbezogenen Daten.

### 2 INTEGRATION VON SATELLITENBILDER UND RAUMBEZOGENE DATEN

Satellitenbilder und raumbezogene Daten haben sich als Basis für die Analyse der Erdoberfläche als geeignet erwiesen (Hutchinson, 1982). Obwohl sie am Anfang getrennt behandelt wurden, stellte sich mit der Zeit immer deutlicher heraus, daß die Benutzung beider Datenquellen zusammen (Synergie-Effekt) zu einer Verbesserung der Analyse beitragen kann (Kunz et al., 1998). Das Ziel der Kombination dieser Daten kann sehr unterschiedlich sein. Die Liste umfaßt die Bildanalyse, Change-Detection, automatische Passpunktfindung, Trainingsgebietsbestimmung oder Darstellung einer Szene (z.B. 3D-Darstellung). Das Thema der Landnutzungsklassifizierung ist ebenfalls ein Beispiel hierfür und wird in den folgenden Kapiteln behandelt. Beispiele, für die Benutzung unterschiedlicher Karten gemeinsam mit Satellitenbildern sind in der Literatur beschrieben (Peddle, 1995), (Bronsveld et al., 1994); (Moon, 1990).

Eine wichtige Frage, die in diesem Fall eine entscheidende Rolle spielt ist, wie groß soll die menschliche Teilnahme im Prozeß sein. Ein menschlicher Bearbeiter hat den Vorteil, daß seine Entscheidung auf den Daten, seiner eigenen Erfahrung, Wissen und Gefühl basiert, während bei einer rechnerischen Analyse die Daten und bestimmte Regeln überwiegen.

Gesucht wird ein Verfahren zur Klassifizierung der Erdoberfläche ausgehend von Satellitenbildern und von bereits zur Verfügung stehenden Daten. Das Grundproblem in diesem Zusammenhang besteht darin, basierend auf Informationen aus unterschiedlichen Quellen, jedes Bildelement einer Klasse zuzuweisen. Da bei jeder Art von Datengewinnung andere Aspekte der Realität registriert werden, ist es nötig, Hinweise auf Zugehörigkeit zu der Klassen aus den unterschiedlichen Datenquellen abzuleiten und sie später zu kombinieren, so daß am Ende eine Beziehung zwischen den Pixeln und den Landnutzungsklassen besteht.

Raumbezogene Daten können die Analyse von Satellitenbildern an drei Stellen des Prozesses unterstützen (Hutchinson, 1982). Sie können vor der Analyse zur Aufteilung der spektralen Daten (*stratification*), zusammen mit den spektralen Daten im Klassifikationsschritt (*Verkettung*) oder als Hilfsmittel zur Optimierung der Ergebnisse (*postclassification sorting*) benutzt werden.

Die *Verkettung* der Daten in einem einzigen Vektor (Wald, 1999), ist eine komplexe Aufgabe, denn die Daten besitzen eigene Strukturen, die einen einheitlichen Ansatz verhindern. Faktoren wie die unterschiedliche geometrische Genauigkeit, Klassifizierungsfehler, Generalisierung, Auflösung, Maßstab und Erfassungsmethoden müssen berücksichtigt werden. Die Ansätze, die diese Aufgabe erfüllen sollen, müssen flexibel sein. Ein auf unscharfer Logik (Fuzzy-Logic) aufbauender Ansatz wird auf den folgenden Seiten behandelt.

### 3 FUZZY-LOGIK

Die Zugehörigkeit eines Elementes zu einer Menge wird in der herkömmlichen Mathematik binär dargestellt. Zwei Zugehörigkeitsgrade sind möglich. Entweder gehört das Element zu einer Klasse (1) oder nicht (0). Die Theorie der Fuzzy-Mengen (unscharfe Mengen) erlaubt, den Grad der Zugehörigkeit als eine reelle Funktion mit beliebig vielen Werten zwischen 0 und 1 darzustellen.

$$A = \{x \in X \mid 0 \leq \mu_A(x) \leq 1\} \quad (1)$$

Die Funktion  $\mu_A(x)$  wird Zugehörigkeitsfunktion (*membership function*) genannt.  $\mu_A(x) = 0$  entspricht der Nichtzugehörigkeit, während  $\mu_A(x) = 1$  für totale Zugehörigkeit steht. Zwischenwerte sind möglich. Diese Darstellung eignet sich gut zur Beschreibung der Beziehung zwischen den Grauwerten eines Pixels und den Landnutzungsklassen. Die Form dieser Funktionen ist beliebig. Dreiecksförmige Funktionen werden oft benutzt, da sie einfach zu behandeln sind.

Für die Bearbeitung von unscharfen Mengen stehen eine Reihe von Operatoren zur Verfügung. Die Grundoperatoren sind Komplement, Vereinigung (ODER) und Durchschnitt (UND).

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2)$$

$$\mu_A(x) \vee \mu_B(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (3)$$

$$\mu_A(x) \wedge \mu_B(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (4)$$

Der Inferenzprozeß benutzt eine Reihe von Zugehörigkeitsfunktionen und Regeln, um eine Schlußfolgerung aus den Eingabedaten  $X$  zu ziehen (Abb. 1). Die Zugehörigkeitsfunktionen für die Eingabedaten und die Schlußfolgerungen werden zuerst im Schema definiert. Die Regeln sind in der Form WENN-DANN gegeben:

$$\text{Regel}_1: \quad \text{Wenn } x_1 = A_{11} \quad \text{und } x_2 = A_{12} \quad \dots \quad \text{und } x_n = A_{1n} \quad \text{dann } y = B_1$$

$$\text{Regel}_2: \quad \text{Wenn } x_1 = A_{21} \quad \text{und } x_2 = A_{22} \quad \dots \quad \text{und } x_n = A_{2n} \quad \text{dann } y = B_2$$

$$\dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots$$

$$\text{Regel}_m \quad \text{Wenn } x_1 = A_{m1} \quad \text{und } x_2 = A_{m2} \quad \dots \quad \text{und } x_n = A_{mn} \quad \text{dann } y = B_m$$

$x_j$  sind die Eingabedaten und  $y$  ist das Schlußfolgerungsergebnis.  $A_{ij}$  und  $B_i$  sind ihre linguistischen Terme, welche die Variablen  $x_j$  beschreiben. Das Übereinstimmungsmaß der Regeln wird mittels der Fuzzy-Operatoren (*min* und *max*, Gl. 2) bestimmt.

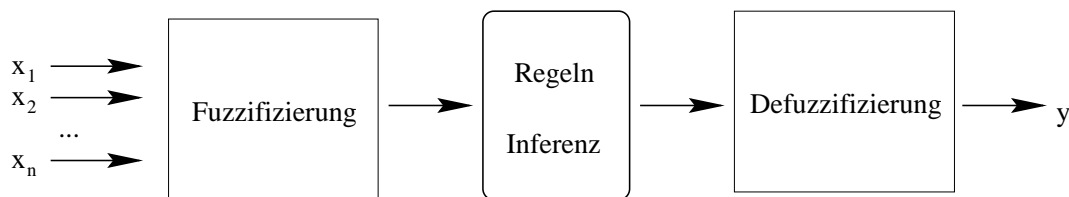


Abbildung 1: Fuzzy-Logik-regelbasiertes System

Erst werden die entsprechenden Werte der Zugehörigkeitsfunktionen berechnet (*Fuzzifizierung*). Danach werden die aktiven Regeln bestimmt. Aktiv sind diejenigen Regeln, bei denen das Übereinstimmungsmaß größer als Null ist.

Das Übereinstimmungsmaß der Schlußfolgerung wird nun auf das Schlußfolgerungsergebnis  $y$  übertragen. Da zur Fuzzy-Inferenz der unscharfe *min*-Operator benutzt wird, entspricht das einem Schneiden der unscharfen Ergebnismengen  $y$  in der Höhe der Übereinstimmungsmaße der Schlußfolgerung. Die resultierenden Ausgangs-Fuzzy-Mengen werden durch den *max*-Operator (ein logisches ODER) verknüpft und eine neue Fuzzy-Menge wird erzeugt.

Falls ein numerisches Ergebnis benötigt wird, wäre die Defuzzifizierung der Fuzzy-Ergebnis-Menge der letzte Schritt. Dafür gibt es verschiedene Methoden. Zwei der allgemeineren Techniken sind die Methoden des *Maximalwertes* und des *Schwerpunktes* (Stanley and Zhu, 1995).

#### 4 INFERENZSCHEMA

Voraussetzung für den Erfolg des regelbasierten Systems ist es, die Beziehung zwischen Fakten und Schlußfolgerungen, welche sprachlich von einem Menschen formuliert werden, durch Regeln und algorithmische Berechnungsverfahren darzustellen. Die Fuzzy-Linguistik bietet dafür eine passende Lösung. Eine sprachliche Problemstellung wird mit Hilfe von fuzzy-linguistischen Variablen und Termen ausgedrückt.

Ein Beispiel für eine linguistische Variable ist: „*Nach dem Satellitenbild, handelt es sich bei der Klasse um Wald*“. Diesen Variablen werden linguistische Terme zugeordnet. Beispiele dafür sind „*handelt es sich bestimmt*“ oder „*handelt es sich vielleicht*“. Durch die Kombination der Variablen und Terme ist es möglich, linguistische Sätze zu bilden, die eine Regel definieren. Zum Beispiel: WENN *Nach dem Satellitenbild, handelt es sich bestimmt bei der Klasse um Wald* UND *nach der raumbezogenen Daten, es sich bestimmt bei der Klasse um Wald handelt*, DANN *gehört das Pixel bestimmt zur KlasseWald*.

Grundsätzlich wurden drei Variablensorten definiert. (a) Variable, die die spektrale Information des Satellitenbildes darstellen, (b) eine Variable, welche die Textur des Spot Bildes darstellt und (c) Variablen, welche die Informationen aus der GIS-Daten darstellen.

Aus der Klassifizierung des Landsat-Bildes wurde eine Menge linguistischer Variablen abgeleitet, welche die möglichen Zustände der Punkte auf der Erdoberfläche beschreiben. Linguistische Variable wurden für die Klassen Wasser, Wald, Siedlungsbereiche, Reisanbau und Landwirtschaft definiert. Dazu wurden jeweils zwei linguistische Terme benutzt, „*niedrig*“ und „*hoch*“, zur Beschreibung der Zustände dieser Variablen.

Eine einzige Variable wurde zur Darstellung der Textur des Spot Bildes benutzt. Die Variation der lokalen Homogenität im Spot-Bild wurde als Basis für diese Variable genommen. Ihre linguistischen Terme sind „*klein*“, „*mittel*“ und „*groß*“.

Die aus den GIS-Daten abgeleiteten Informationen wurden als unscharfe Mengen dargestellt. Die berücksichtigten linguistischen Variable sind deswegen „*Wasser*“, „*Wald*“, „*Sumpfbereich*“, „*Siedlungsbereiche*“ und „*Straßenetz*“. Für diese Variable wurden entweder zwei oder drei linguistische Terme vorgeschlagen: „*klein*“, „*groß*“ und, wenn nötig, „*mittel*“.

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenfassung aller Variablen. Die ersten 6 Variablen beschreiben die spektralen Eigenschaften des Bildes, die nächsten 5 die Informationen aus dem GIS und die letzte die Textur (räumliche Information) des Bildes. Das Ergebnis wird durch eine einzige Variable mit 5 linguistischen Termen dargestellt.

#### 5 UNSCHARFE FUNKTIONEN

Der Erfüllungsgrad der Komponenten einer Regel wird von einer Menge unscharfer Funktionen dargestellt. Die Kenntnis der Fakten spiegelt sich durch die Form der Funktionen wieder. Eine sehr scharfe Kurve stellt eine große Sicherheit dar, denn der Übergang von einem Null-Wert (keine Zugehörigkeit) zur Eins (volle Zugehörigkeit) geschieht sehr schnell. Andererseits stellen Funktionen mit einer flachen Steigung dieses Übergangs eine Situation dar, in der die Definition des

Tabelle 1: Inferenzschema: Linguistische Variablen und ihre Adjektive

Variable	Adj. 1	Adj. 2	Adj. 3
Sat. Wasser	niedrig	hoch	
Sat. Wald	niedrig	hoch	
Sat. Siedlungsgebiet	niedrig	hoch	
Sat. Sumpfgebiet	niedrig	hoch	
Sat. Landwirtschaft	niedrig	hoch	
Sat. Reisanbau	niedrig	hoch	
Karte Sumpfgebiet	niedrig	hoch	
Karte Wasser	niedrig	hoch	
Karte Wald	niedrig	hoch	
Karte Siedlungsgebiet	niedrig	hoch	sehr hoch
Karte Straßennetz	niedrig	hoch	sehr hoch
Lokale Homogenität	niedrig	mittel	hoch

Zugehörigkeitsgrades nicht deutlich ist. Die Funktionen in Abb. 2 zeigen zwei verschiedene Situationen. Die Funktion  $f_2$  stellt eine fast binäre Funktion dar, es gibt weniger Platz für Zwischenwerte. Der Übergang von Eins zu Null bei der anderen Funktion ( $f_1$ ) ist milder in Vergleich zu  $f_2$ , und Zwischenwerte kommen öfter vor.

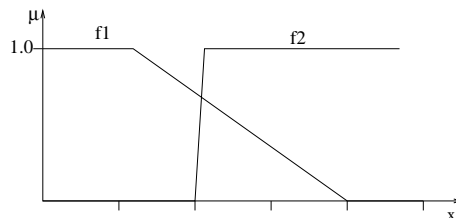


Abbildung 2: Beispiel Fuzzy-Funktionen

Die Aufgabe eines Analysten wäre, die Variation der Funktionen zu bestimmen, so daß sie zu einer guten Klassifizierung führen. Als Alternative zur Bestimmung der unscharfen Funktionen bietet sich eine rechnerische Annäherung mit Hilfe eines numerischen Verfahrens an.

## 6 ANWENDUNG DER GENETISCHEN ALGORITHMEN ZUR BESTIMMUNG DER UNSCHARFEN FUNKTIONEN

Genetische Algorithmen gehören zu den stochastischen Optimierungsverfahren, die auf den Prinzipien der natürlichen Evolution basieren. Es handelt sich dabei um Suchalgorithmen, die einen mehrdimensionalen Variablenraum nach einer optimalen Lösung durchsuchen. Diese Verfahren eignen sich gut zur Schätzung unbekannter Parameter einer oder mehrerer Funktionen. Die Suchstrategie ähnelt dem natürlichen Auswahlprozess und basiert auf Prinzipien der Evolution. Deswegen werden genetische Algorithmen zu den naturanalogen Verfahren gerechnet. Genetische Algorithmen (Goldberg, 1989) werden als robuste und vielseitig einsetzbare Methoden beschrieben, die sehr gute, sub-optimale Lösungen ermitteln.

Das Ziel des Optimierungsverfahrens ist es, die Parameter der Funktionen zu schätzen, die die richtige Klassifizierung der Pixel anhand der zur Verfügung stehenden Hinweise ermitteln. Diese Schätzung erfolgt aus einer Lernphase, in der die Ein- und Ausgabedaten analysiert werden und ein Modell vorgeschlagen wird. Dafür ist eine Trainingsmenge mit der wahren Klassifizierung einiger Pixel nötig. Deswegen wurde ein Gebiet im Bild gesucht, wo die unterschiedlichen Klassen anwesend sind und die Variation der Merkmale deutlich geschätzt werden kann. Es ist sehr wichtig, daß die Trainingsmenge nicht nur Pixel in homogenen Regionen einschließt, sondern auch Pixel, die sich auf Übergängen zwischen Klassen befinden. Diese Maßnahme spielt bei der Schätzung der Fuzzy-Mengen eine entscheidende Rolle, denn der Zugehörigkeitsgrad wird nicht nur für die extremen Fälle geschätzt, sondern auch für die Übergänge zwischen „keine Zugehörigkeit“ und „volle Zugehörigkeit“. Die Satellitenbilder und die raumbezogenen Daten wurden analysiert und ein Sollbild für diese Region hergestellt. Ein direkter Vergleich zwischen dem Sollbild und den Zwischenergebnissen der genetischen Algorithmen ermöglicht die Berechnung der Anpassung jeder Lösung.

## 7 ERGEBNIS

Für die Arbeit wurden Daten aus einem Gebiet in Süd-Brasilien, in der Nähe der Stadt Porto Alegre, benutzt. Es handelt sich um den unteren Teil Einzugsgebietes des Rio dos Sinos zwischen Porto Alegre und Novo Hamburgo in Bundesland

Rio Grande do Sul (Abb. 3). In diesem Gebiet bestehen Nutzungskonflikte zwischen Landwirtschaft, Industrie und Siedlungen, die zu Veränderungen in der Bodennutzung führt. Bei dieser Arbeit stehen zwei Satellitenbilder zur Verfügung: eine multispektrale Aufnahme des Landsat-TM und eine panchromatische Spot-Szene. Daneben wird kartographische Information aus einer Karte (im Maßstab 1:50.000) benutzt.

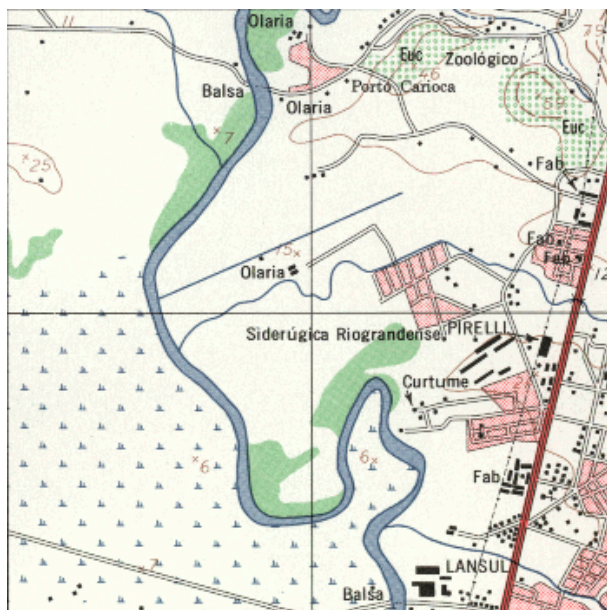


Abbildung 3: Unterer Teil des Rio dos Sinos Einzugsgebietes in Brasilien (<http://edcwww.cr.usgs.gov>).

Der Datensatz wurde mit Hilfe der rechnerisch geschätzten Fuzzy-Funktionen klassifiziert. Abb. 4 stellt das Ergebnis dieser Klassifizierung vor. Das Ergebnis der Klassifizierung muß unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Eigenschaften der benutzten Datensätze analysiert werden. Das Bild ist von der Anwesenheit großer homogener Regionen und weniger gestreuter Pixel gekennzeichnet. Im Vergleich zur GIS-Daten, enthält es eine aktualisierte Klassifizierung des Gebietes, mit Verbesserung der Konturen der Siedlungen und eine neue Kartierung der grünen Flächen. Im allgemeinen ist die räumliche Definition der Objekte besser als im Ergebnis einer multispektralen Klassifizierung, aber es gibt einen großen Verlust am Detail, wenn man die multispektrale Klassifizierung als Vorbild nimmt, weil viele Klassen zusammengefaßt werden.

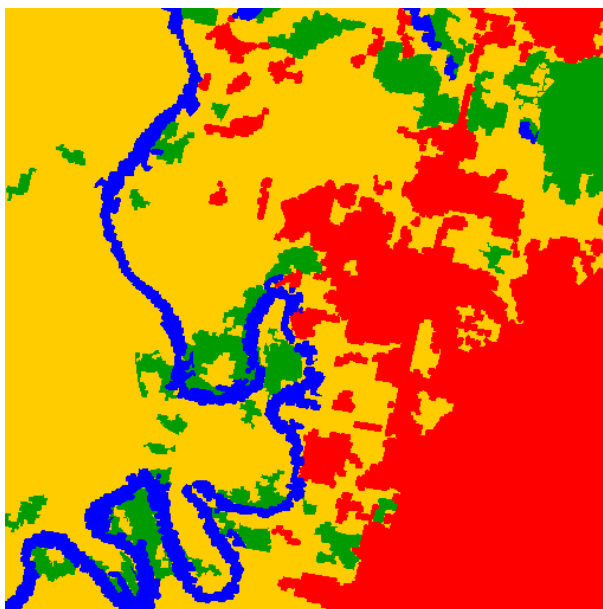


Abbildung 4: Klassifizierung. Die Zugehörigkeitsfunktionen wurden mit Hilfe der genetischen Algorithmen geschätzt. Rot: Siedlungsgebiete, grün: Wald, gelb: Landwirtschaft, blau: Wasser.

Die Definition der Objekte, gemäß den raumbezogenen Daten, ist sehr deutlich. Deswegen wird das Ergebnis von den geometrischen Eigenschaften der GIS-Daten an manchen Stellen dominiert, zum Beispiel bei der Definition der Grenzen

von Siedlungsgebieten. Obwohl ein Spielraum aufgrund der Fuzzifizierung der Daten entsteht, werden viele Pixel mit dem maximalen Wert (volle Zugehörigkeit) gefunden. Diese Werte überwiegen bei der Bewertung der beiden Quellen.

Wenn es auf den GIS-Daten keine Informationen gibt (leere Regionen) dann wird das Ergebnis von Informationen aus den Satellitenbildern bestimmt. In diesem Fall entstehen öfter kleine homogene Regionen. Diese besondere Eigenschaft wird aus der spektralen Klassifizierung geerbt. Die Qualität der Klassifizierung hängt von den verfügbaren Daten und der Ableitung der Hinweise aus allem Datensätze, die eine gute Qualität haben müssen, ab. Das gilt sowohl für die raumbezogenen, als auch für die spektralen Datensätze.

## 8 SCHUSSBETRACHTUNG

Methoden zur Klassifizierung der Landnutzung durch die Analyse unterschiedlicher Datensätze und neuer Merkmale gewinnen an Bedeutung mit der technischen Entwicklung von Fernerkundung und raumbezogene Daten. Die vollständige Integration dieser beiden Technologien verlangt nach Datenverarbeitungsmethoden, welche die Besonderheiten jedes einzelnen Datensatzes berücksichtigen.

Die Verfügbarkeit an Experten, die diese Daten und Systeme wirkungsvoll benutzen können, spielt jetzt die entscheidende Rolle. Erfahrung und Wissen wird gefragt sein. Die Anwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz und von wissensbasierten Systemen, die Fakten und Prozesse für die Lösung des Problems speichern, kann eine günstige Alternative werden. Methoden wie die genetischen Algorithmen können dabei helfen, das Wissen von Experten zu übertragen und an andere Probleme anzupassen.

Das hier vorgestellte Modell eignet sich zur Klassifizierung der Landnutzung aus Daten der Fernerkundung und GIS-Daten. Das Fuzzy-Klassifizierungsschema bietet ein offenes Modell, das an Eigenschaften der Szene angepaßt werden kann, denn es basiert auf Regeln und unscharfen Funktionen. Das Inferenzschema besitzt die Fähigkeit, unterschiedliche Daten aus demselben Gebiet in die Analyse einzubeziehen.

## LITERATUR

- Bähr, H.-P., 1998. From data to inference: Examples for knowledge representation in image understanding. In: ISPRS (ed.), Proceedings of ISPRS, Commission 3, Columbus, Ohio, ISPRS, pp. 23–30.
- Bronsveld, K., Chutirattanapan, S., Pattanakanok, B., Suwanwerakamton, R. and Trakooldir, P., 1994. The use of knowledge in land use/land cover mapping from satellite images. ITC Journal pp. 349–358.
- Ehlers, M., 1995. Integrating remote sensing and GIS for environmental monitoring and modeling: where are we? Geo Info System pp. pp.36–43.
- Goldberg, D., 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning,. Addison-Wesley, New York.
- Hutchinson, C., 1982. Techniques for combining Landsat and ancillary data for digital classification improvement. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 48(1), pp. 123–130.
- Kunz, D., Vöglte, T. and Schilling, K., 1998. Integrierte verarbeitung von satellitenbild- und vektorieller karteninformation. In: H. Bähr and T. Vöglte (eds), Digitale Bildverarbeitung, 3 edn, Wichmann, Heidelberg, pp. 220–242.
- Moon, W., 1990. Integration of geophysical and geological data using evidential belief function. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 28(4), pp. 711–719.
- Peddle, D., 1995. Knowledge formulation for supervised evidential classification. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 61(4), pp. 409–417.
- Stanley, L. and Zhu, Q., 1995. Fuzzy and Evidence Reasoning. Physica-Verlag, Heidelberg. 360 Seiten.
- Wald, L., 1999. Definitions and terms of reference in data fusion. In: ISPRS (ed.), International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 32: 7-4-3 W6, ISPRS, Valladolid, Spain.