

MUSTERERKENNUNG UND BILDVERARBEITUNG FÜR ANWENDUNGEN
IN DER GEOINFORMATIK

F. Leberl ¹⁾ und H. Ranzinger ²⁾

Zusammenfassung

Die maschinelle Arbeit mit erdbezogenen Digitaldaten kann mit dem Begriff Geoinformatik bezeichnet werden. Von besonderem Interesse sind Methoden der Bildverarbeitung und der automatischen Mustererkennung, da ein wesentlicher Datenträger der Erdwissenschaften die Luft- und Satellitenbilder sind, welche zunehmend in digitaler Form gewonnen werden. Die Arbeit definiert daher zunächst die Begriffe dieser Zweige der Datenverarbeitung und legt Aussagen über die Art und den Umfang der benötigten Datenmengen vor. Darauf folgt eine geraffte Darstellung von Methoden der Bildverarbeitung und Mustererkennung mit Beispielen.

Es wird gezeigt, daß die neuen Verfahren der Bildverarbeitung und Mustererkennung wesentliche Impulse für die Analyse geowissenschaftlicher Daten liefern.

1. EINLEITUNG

In ähnlicher Weise wie in anderen Fachgebieten entwickelt sich auch in den Erdwissenschaften die maschinelle Datenverarbeitung zu einer eigenen Disziplin. Aus der herkömmlichen topographischen oder thematischen Karte entsteht das digitale Informationssystem; der Begriff des sogenannten "Geoinformationssystems" oder auch

1) a.o. Professor am Institut für Angewandte Geodäsie und Photogrammetrie der Technischen Universität Graz und Leiter des Instituts für digitale Bildverarbeitung und Graphik am Forschungszentrum Graz.

2) Leiter der Abteilung für maschinelles Sehen am Institut für digitale Bildverarbeitung und Graphik am Forschungszentrum Graz.

"Landinformationssysteme" ist schon durchaus gebräuchlich (Moyer, 1978; Eichhorn, 1979). Noch nicht gebräuchlich ist hingegen die Bezeichnung "Geoinformatik", obwohl eine solche Benennung des Arbeitsgebietes naheliegt, welches sich mit der Erfassung, Speicherung und Manipulation ortsbezogener Daten der Erdoberfläche in ihren verschiedensten Zusammenhängen befaßt. Hierzu zählen Daten aus der Geologie, Hydrologie, dem Forstwesen, der Boden- und Vegetationskunde, Geographie, dem Vermessungswesen, der Orts- und Regionalplanung usw.

In den verschiedenen Teilgebieten erfolgt die Erfassung von ortsbezogenen Daten in sehr ähnlicher Weise zum Teil aus Bildern, insbesondere Flugzeug- oder Satellitenbildern, welche mit Kameras, Abtastgeräten oder Radarsensoren erstellt werden. Die Darstellung der Arbeitsergebnisse und die Datendokumentation erfolgen mit Mitteln der Kartographie durch Herstellung spezieller themabezogener Karten, eben geologischer, forstlicher, vegetationskundlicher und ähnlicher Art.

Es ergibt sich beim Übergang vom rein händischen Verarbeiten von Analogdaten und Analogdarstellungen zum maschinellen Verarbeiten von Digitaldaten und Digitaldisplays ein weites Anwendungsgebiet für das Computerwesen. Von besonderem Gewicht sind digitale Bildverarbeitung und Mustererkennung aus folgenden Gründen:

- (a) die Erhebung und Laufendhaltung von erdwissenschaftlichen Datenbeständen beruht zu einem wesentlichen Teil auf Luft- und Satellitenbildern, welche in zunehmendem Maße digital vorliegen;
- (b) der Übergang von bestehenden analogen Kartenbeständen zu digitalen Informationssystemen ist nur dann in sinnvoller Weise möglich, wenn die Umsetzung der Karte in digitale Form weitgehend automatisiert werden kann.

Sowohl die Datenerfassung aus Digitalbildern als auch die Digitalisierung bestehender Karten sind somit wesentliche Anwendungen der Mustererkennung und digitalen Bildverarbeitung; es besteht ein gemeinsames Arsenal von Methoden und Verfahren für beide Aufgabenstellungen. Die Anwendung ist weitgehend von der einzelnen erdwissenschaftlichen Fachdisziplin unabhängig. Sie unterscheidet sich jedoch wesentlich von der Nutzung der Mustererkennung und digitalen Bildverarbeitung in den anderen wesentlichen Anwendungsbereichen, welche nach Brady (1982), Ballard und Brown (1982) oder Niemann (1983) in der

Medizin, Meteorologie, industriellen Fertigungssteuerung, Qualitätskontrolle und verwandten Gebieten liegen.

Dies ist im folgenden der Anlaß, für die beschriebene erdwissenschaftliche Anwendung die Bezeichnung "Geoinformatik" zu verwenden. Es soll gezeigt werden, daß hier Daten zu bearbeiten sind, welche einem vergleichsweise beschränkten Erneuerungszyklus unterliegen. Daher besteht im Vergleich zu anderen Anwendungen kaum die Notwendigkeit der Echtzeitverarbeitung. Der Datenumfang ist wesentlich größer als in vielen anderen Nutzungen: typische Bilder können 10 000 x 10 000 Bildpunkte umfassen. Im Vergleich dazu haben große medizinische Bilder nur etwa 512 x 512 Bildpunkte.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen erdwissenschaftlichen und anderen Anwendungen der Mustererkennung und Bildverarbeitung liegt in der Art des einzubringenden "Expertenwissens". Dies ist in der industriellen Qualitätskontrolle in vergleichsweise einfacher Art formalisierbar, in den Erdwissenschaften hingegen kaum algorithmisch faßbar: man spricht auch von der "Kunst" des Bildlesens oder der "Photo-Interpretation" (Avery, 1962) und der "Kunst" des Kartenlesens.

Im folgenden werden zunächst einige einander teilweise überdeckende moderne Begriffe behandelt. Darauf folgt eine Beschreibung der zu verarbeitenden Digitaldaten. Kernstück der Arbeit ist die Diskussion einiger Gesichtspunkte der Bildverarbeitung, Mustererkennung und Datenanalyse für geowissenschaftliche Fragestellungen. Eine Reihe von Illustrationen, veranschaulicht die Anwendungen. Daran schließt ein Ausblick auf die zu erwartenden Entwicklungen.

Dieser Beitrag soll zeigen, daß Mustererkennung und digitale Bildverarbeitung vielversprechende Werkzeuge für die Weiterentwicklung der geowissenschaftlichen Methoden und ihre gesellschaftsrelevante Anwendung sind.

2. BEGRIFFE

Digitale Bildverarbeitung und Mustererkennung sind sehr junge Fachgebiete; es ist daher verständlich, wenn die Definitionen von Begriffen unscharf und die Fachgebiete selbst kaum gegeneinander abgrenzbar sind. Im folgenden werden daher einige Begriffe diskutiert, um zu einer Klärung beizutragen.

2.1 Bildverarbeitung

Bildverarbeitung ist wohl vor allem die Übertragung, Speicherung, Korrektur und Verstärkung von digitalen Bildern. Textbücher über digitale Bildverarbeitung stammen von Rosenfeld (1969), Gonzales und Wintz (1977), Pratt (1978), Kazmierczak (1980), Moik (1980) und anderen. Daraus geht hervor, daß dieses Fachgebiet die Frage der Umsetzung von analoger Objektinformation in digitale Bilder behandelt (Rasterung und Quantisierung oder Diskretisierung), die geometrischen und radiometrischen Eigenschaften diskutiert und Methoden zur Korrektur angibt (Überlagerung, engl. Registration), zur visuell ansprechenden und für die Anwendung optimierten Form der Bildwiedergabe Stellung bezieht (Enhancement), aber auch die Bildanalyse in Ansätzen als Thema betrachtet. Typische Gliederungen des Fachgebietes sind nach Goetz u.a. (1975), Pratt (1978) oder Moik (1980) etwa:

- Bildkorrektur,
- Bildverstärkung und -darstellung,
- Bildanalyse,
- Bildkomprimierung.

Die historischen Wurzeln und Anregungen zur Bildverarbeitung liegen wohl in der Raumfahrt und den dort anfallenden Digitalbildern von Planetenoberflächen (Nathan, 1966); der Fernerkundung von landwirtschaftlichen Nutzflächen mit dem Streben nach der automatischen Objektklassifizierung auf Grund von Farbtönen (Hoffer, 1967) sowie der medizinischen bildgebenden Verfahren, etwa Computertomographie (Glenn u.a., 1975) und der industriellen Qualitätsprüfung. Letztere sind jedoch offensichtlich jünger als die beiden ersten Anwendungen.

2.2 Bildverstehen - Image Understanding (IU)

Eine sehr deutliche Überlappung besteht zwischen der nunmehr schon "klassischen" Bildverarbeitung und dem neuen Begriff des "Bildverstehens" oder Image Understanding. Nach Brady (1982) ist letzteres die Aufgabe, den Bildinhalt umfassend zu beschreiben.

Der Begriff des "Image Understanding (IU)" kann jenem des "Speech Understanding" nachempfunden sein, ist jedoch bisher vor allem die Domäne einiger U.S. Forschungsgruppen, welche von öffentlichen Stellen für Arbeiten mit diesem Projekttitel Förderungsmittel erhalten; Ergebnisse liegen vor allem in den Bänden zu den jährlichen Tagungen vor (Image Understanding Workshops, seit 1977). Es leuchtet ein, daß die Beschreibung des Bildinhaltes gerade in bezug auf Kanten und Bildregionen durch Mittel der Bildverarbeitung (Image Processing - IP) erfolgen würde. IU und IP sind nicht scharf trennbar.

2.3 Mustererkennung - Pattern Recognition (PR)

Mustererkennung (Pattern Recognition - PR) ist ein viel benutzter, jedoch kaum definierter Begriff. Meist beschränken sich Autoren auf eine indirekte Definition durch Angabe dessen, was Mustererkennungssysteme tun. Meisel (1972) und Niemann (1983) definieren "Muster" als Eigenschaft von Objekten (oder Lebewesen), welche im wesentlichen ein abstraktes, logisches Konzept zur Benennung einer Ordnung darstellt, die durch Sinne wahrgenommen werden kann. Muster erlauben daher, Objekte zu identifizieren, sie voneinander zu unterscheiden, sie zu klassifizieren oder gar quantitativ zu messen. Diese Aufgaben sind Inhalt des Fachgebietes "Mustererkennung" und richten sich auf sehr verschiedenartige "Objekte", also etwa Sprache, Schrift, Fingerabdrücke, Flugbahnen von Partikeln in Blasenkammern, biologische Zellen, medizinische Elektrokardiogramme, seismische Aufnahmen usw.

Zur Mustererkennung besteht wie für die Bildverarbeitung eine reiche Literatur mit Textbüchern (Andrews, 1972; Duda und Hart, 1973; Batchelor, 1978; Pavlidis, 1978; Gelsema u. Kanal, 1980). Ein wesentlicher Teil der Mustererkennung befaßt sich mit Bildern und klassifiziert den Bildinhalt direkt. Laut Brady (1982) steht dies im Gegensatz zum Image Understanding, welches mittels symbolischer

Beschreibungen des Bildinhaltes arbeitet. IU und PR überlappen einander weitgehend, da in beiden Fällen die maschinelle Interpretation des Bildinhaltes ein Ziel darstellt.

Nach Niemann (1983) zerfällt die Aufgabe der Mustererkennung in zwei Teile: die Klassifikation von Mustern und die Analyse des Klassifikationsergebnisses. Angewandt auf "Schrift" wäre dies zu interpretieren als Klassifizieren der Buchstaben und Interpretieren der Wort- und Satzbedeutung. Zentral ist für die Mustererkennung, daß die Invarianz, Beschreibung und Struktur des Musters entdeckt werden. Damit sind "Merkmale" und ein sogenannter Merkmalsraum aller möglichen auftretenden Merkmale vorgegeben.

Nach Bois (1983) sind "Muster" und "Merkmal" zwei Begriffe für dieselbe Größe, jedoch ist "Merkmal" eine Einschränkung: ein Muster ist eine hochdimensionale Größe, "Merkmale" sind einfache Annäherungen für Muster.

Ein Objektmuster ist nun im Merkmalsraum durch Vergleich mit Trainingsmustern zu erkennen. Dabei werden Verfahren der Klassifizierung eingesetzt. Der Klassifikator entscheidet, zu welcher der möglichen und im Merkmalsraum definierten Klassen ein gegebenes Muster gehört.

2.4 Verwandte Fachgebiete

(a) Computer Graphics

Ein Werkzeug in enger Verbindung zur Bildverarbeitung ist Computer Graphics (CG) oder Graphische Datenverarbeitung zur Darstellung visueller Information. CG erzeugt Bilder zum Ansehen, zum Beispiel im Rahmen der Animation; aber auch die Darstellung von Bildanalyseergebnissen, Farbbildwiedergaben, Darstellung synergistischer Datensätze usw. sind Thema von Computer Graphics. Das Standardwerk zu diesem Thema stammt von Newman und Sproull (1973); seither ist eine Vielzahl von Texten erschienen: Kanten, Flächen, räumliche Objekte, Perspektive usw. sind Arbeitsthemen des CG.

(b) Computer-Aided Design (CAD)

Ein etwas entfernter anmutender Arbeitsbereich ist das CAD. Das Entwerfen von Werkstücken, Objekten oder Landkarten mittels interaktivem Rechnerarbeitsplatz erscheint nur anfänglich kaum mit Bildverarbeitung und Mustererkennung verwandt, wohl aber mit Computer Graphics.

Es ist jedoch zu bedenken, daß CAD nicht nur der Erzeugung technischer Zeichnungen dient, sondern auch von solchen ausgeht, wenn sie bestehen, oder etwa händische Rohskizzen als Ausgangsmaterial verwenden sollte. Bestehende Zeichnungen, Rohskizzen und graphische Information werden mittels Verfahren der Bildverarbeitung, des Image Understanding und der Mustererkennung erfaßt. Die Umsetzung einer Oberfläche in den Weg eines NC (numerical control)-Werkzeuges ist ein mathematisches Problem mit großer Verwandtschaft zur Mustererkennung (Faux und Pratt, 1979).

(c) Künstliche Intelligenz - Artificial Intelligence (AI)

Menschliches Wissen ist die Basis für erfolgreiche Bildanalyse. Die Standardisierung und Strukturierung menschlichen Wissens für die und in der Datenverarbeitung ist Thema der "Künstlichen Intelligenz". Die Erfassung des Raumeindrucks für Robotersteuerung ist ein typisches technisches Problem der AI und ein Thema, welches sich vollständig in der Mustererkennung wiederfindet. Im Bereich der Bildanalyse decken einander daher PR und AI.

Die Organisation von "Wissen" als Basis der Arbeit mit Bildern ist in der AI entwickelt, aber nicht mehr darauf beschränkt. Das Konzept der sogenannten "Expertensysteme" (expert systems) schlägt vor, für eine Anwendung bestehendes Wissen mit Daten zusammenzuführen. Bekannte Beispiele sind Prospektor (Reboh, 1981) und Acronym (Marimont, 1982); McKeown u. Denlinger (1982) behandeln das AI-Konzept der Expertensysteme für Aufgaben der Photointerpretation, Bajcsy u. Tavakoli (1976) berichten über eine Anwendung in der Fernerkundung.

2.5 Einige Schlüsselbegriffe der Bildverarbeitung und Mustererkennung

Es würde den Rahmen dieser Übersicht sprengen, wollte man die Vielzahl mathematischer oder technischer Begriffe erläutern, welche in IP und PR auftreten. Einige werden im Abschnitt 4 nur illustriert. Hiefür wäre es nicht notwendig, in formaler Weise die Konzepte "Bild", "Pixel", "Kante", "Linie" usw. zu definieren. In der Literatur der Mustererkennung werden solche Definitionen allgemein verwendet, wobei es jedoch überrascht, daß sie oft nicht mit großer Strenge, sondern nur umgangssprachlich erfolgen. Um einen Eindruck von der Art der Begriffe und Definitionen zu geben, sei im folgenden aus einer früheren Arbeit von Kropatsch und Leberl (1980) zitiert, welche vor allem von den Definitionen aus der Schule um Rosenfeld ausgeht (Rosenfeld 1970).

(a) Definition eines digitalen Bildes

Digitale Bilder werden durch eine Funktion

$$(2.1) \quad g : B \rightarrow G$$

eines endlichen k -dimensionalen Bildbereiches $B \subset \mathbb{N}^k$ beschrieben.

(\mathbb{N} seien die natürlichen Zahlen $1, 2, \dots$; k meist 2), welche B in einen ebenfalls endlichen Grauwertbereich $G \subset \mathbb{N}$ abbildet. Die Anzahl der Elemente von G ist wegen der binären Darstellung der Grauwerte im Computer meist eine Potenz von 2, sodaß gilt:

$$(2.2) \quad \text{card } (G) = 2^b \quad (b \dots \text{Bitanzahl per Grauwert})$$

Im Fall eines 2-dimensionalen Bildbereichs gilt:

$$(2.3) \quad B = R \times C \subset \mathbb{N}^2 \quad (R \dots \text{Zeilen; } C \dots \text{Spalten})$$

und die Funktion g kann in Form einer Grauwertmatrix dargestellt werden, wie es etwa für Satellitenbilder eines einzelnen Frequenzbereiches üblich ist.

(b) Nachbarschaft

Auf dem Bildbereich B sei nun eine Nachbarschaft $U(x)$ eines Punktes x definiert. Daraus wird eine Metrik abgeleitet.

$U(x) \subset \mathbb{Z}^k$ heißt Menge der Nachbarn von $x \in B$, wenn gilt:

a) $x \in U(x)$

b) $x \in U(y) \iff y \in U(x)$.

\mathbb{Z} ist die Menge der ganzen Zahlen.

$\{U^n(x) \subset B \mid n \in \mathbb{N}\}$ sei ein Nachbarschaftssystem um $x \in B$, wenn gilt:

$$\forall_{x \in B} U^{(0)}(x) := \{x\}$$

$$U^1(x) := U(x) \cap B$$

$$U^{n+1}(x) := \bigcup_{y \in U^n(x)} U(y) \cap B$$

Aus den obigen Definitionen ersehen wir, daß $U(x)$ nicht notwendigerweise, wohl aber $U^1(x)$ eine Teilmenge von B zu sein hat. $U(x)$ ist nämlich eine Teilmenge der ganzen Zahlen \mathbb{Z}^k , kann also auch negative Elemente haben, während $U^1(x)$ nur positive Elemente hat.

Man beachte weiters, daß die Nachbarschaft n -ter Ordnung $U^n(x)$ nicht unbedingt jene $n-1$ -ter Ordnung $U^{n-1}(x)$ enthält.

Abb.1 zeigt für einen Punkt x eine graphische Darstellung von Nachbarschaften nullter, erster, zweiter und dritter Ordnung. In Abb.2 werden einige Nachbarschaften beschrieben, wobei elementare Bewegungen von Figuren auf einem Schachbrett als Vorstellungshilfe dienen können.

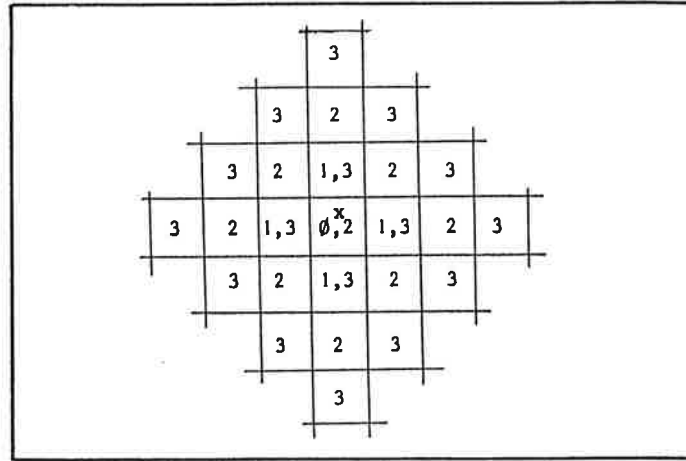


Abbildung 1: 4 - Nachbarschaften 0., 1., 2. und 3. Ordnung eines Punktes.

B 1) "4-Nachbar" (Rosenfeld, 1970):

$\Gamma_4(x) := \{\blacksquare\}$ Beachte: $\text{card}(\Gamma_4(x)) = 4$

B 2) "8-Nachbar" Königszug (Rosenfeld, 1970):

$\Gamma_8(x) := \{\blacksquare\}$ Beachte: $\text{card}(\Gamma_8(x)) = 8$

B 3) "Schräge Nachbarmengen" könnten bei Bearbeitung geometrischer verzerrter Bilder sinnvoll sein:

$\Gamma_v(x) := \{\blacksquare\}$

B 4) Als Beispiel einer besonderen Nachbarschaft sei die "Springer"-beziehung definiert:

$\Gamma_{sp}(x) := \{\blacksquare\}$

B 5) Den Zugmöglichkeiten beim "Dame"-Spiel entspricht:

$\Gamma_D(x) := \{\blacksquare\}$

Abbildung 2: Beispiele für Nachbarschaften in digitalen Bildern.

(c) Metrik

Um einen Abstand zwischen zwei Elementen von B einzuführen, ist es notwendig, daß alle Punktpaare $(x,y) \in B^2$ miteinander durch die Nachbarschaftsbeziehung verbunden sind. Bestehen Punktpaare, die in dieser Beziehung niemals einanders Nachbarn beliebiger Ordnung werden können, so ist ein Abstand nicht definiert.

(d) Weg zwischen zwei Bildpunkten

Eine Folge $(p_i)_{i=1,..n}$ von Bildpunkten $p_i \in B$ heißt Weg von p_1 nach p_n , wenn

$$\forall_{1 \leq k < n} p_{k+1} \in U^1(p_k) \cup \{p_k\}$$

(e) Zusammenhängende Menge

Eine Menge $M \subset B$ heißt zusammenhängend, wenn

$$\forall (x,y) \in M \exists \text{Weg } (p_i) \text{ von } x \text{ nach } y \quad \forall p_i \in M$$

Eine Menge $M \subset B$ heißt einfach zusammenhängend, wenn sie

- (i) zusammenhängend ist und auch
- (ii) $\bar{M} = B - M$ zusammenhängend ist, wobei in \bar{M} eine andere Nachbarschaftsbeziehung als in M gelten kann (vergleiche dazu Rosenfeld (1970)).

(f) Kante

Eine Kante e in einem digitalen Bild ist ein Paar $(i,o) \in B^2$ von Nachbarbildpunkten, wenn gilt:

$$i \in U(o)$$

Unter dem Gewicht oder der Stärke einer Kante versteht man eine Funktion

$$w : B^2 \rightarrow R \quad (R = \text{Zahlenkörper der reellen Zahlen})$$

Die Richtung einer Kante wird ebenfalls durch eine Funktion

$$r : B^2 \rightarrow R$$

ausgedrückt.

Somit definiert jedes benachbarte Punktepaar eine Kante. Erst ihr Gewicht, welches mittels der Grauwerte, der Textur oder der Farbe des Punktepaars bestimmt wird, verleiht dieser Kante ihre physikalische Bedeutung.

(g) Linie

Eine Linie L ist eine endliche Folge von Kanten (e_i) , $i = 1, \dots, n$, wenn je zwei aufeinanderfolgende Kanten e_i und e_{i+1} in einer Nachbarschaftsbeziehung Λ bezüglich B^2 stehen:

$$e_{i+1} \in \Lambda(e_i) \quad (\Lambda \text{ Nachbarmenge bezüglich Punkten aus } B^2)$$

(h) Region

Eine Region (Fläche, Gebiet) in einem digitalen Bild ist jede einfach zusammenhängende Teilmenge von B .

(i) Randlinie

Als Randlinie L einer Region R bezeichnet man eine Linie

$L = (e_i)_{i=1, \dots, n}$ von Kanten $e_i = (p_i, q_i) \in B^2$, wenn gilt:

$$\forall e_i = (p_i, q_i) \quad p_i \in R \quad \& \quad q_i \notin R$$

2.6 Bemerkungen

Digitale Bildverarbeitung (Image Processing - IP), Bildverstehen (Image Understanding - IU), Mustererkennung (Pattern Recognition - PR), Computer Graphics (CG), Computer-Aided Design (CAD) und Künstliche Intelligenz (Artificial Intelligence - AI) überlappen einander in unterschiedlicher Weise. Dieser Abschnitt hat versucht, einige im allgemeinen äußerst selten definierte Begriffe gegeneinander abzugrenzen und einen Einblick in mathematische Formulierungen aus der Mustererkennung zu vermitteln.

Bildkanten, Linien, Regionen, Nachbarschaften usw. sind umgangssprachlich verwendete Begriffe, deren Definition im Bereich der Mustererkennung notwendig ist. Der hierfür aufzubringende Aufwand ist aus den Ausführungen dieses Kapitels ersichtlich. Nicht ersichtlich ist die weiterführende Vertiefung, Nutzung in parallelen und sequentiellen Algorithmen.

Ein in der Mustererkennung oft verwendetes Begriffspaar betrifft den sogenannten "statistischen" oder "stochastischen" und den "strukturellen" Zugang zur Bildanalyse (Fu, 1982). Die Ermittlung der Geländehöhe aus Shape-from-Shading (Photoklinometrie) ist eine strukturelle Methode; die Ermittlung der Getreideanbauflächen aus der Klassifizierung von spektralen Merkmalsvektoren zu jedem Pixel ist ein statistisches Verfahren.

Damit sind wesentliche Basisbegriffe definiert. Im weiteren werden Methoden der Bildverarbeitung und der Mustererkennung nur mehr beschreibend behandelt.

3. DATEN FÜR DIE WISSENSCHAFTLICHE MUSTERERKENNUNG UND BILDVERARBEITUNG

3.1 Bestehende Karten

Ein Ausgangspunkt für die moderne Geoinformatik sind bestehende Karten. Es liegt nahe, die vorgegebene Information, welche das Arbeitsergebnis von Generationen wissenschaftlicher Fachkräfte darstellt, in ein computerorientiertes, digitales Informationssystem einzubringen, solange dies wirtschaftlicher erscheint als die Neuerhebung mit modernen Methoden.

Vom Territorium eines Landes wie Österreich mit einer Fläche von rund 84 000 km² bestehen etwa 200 topographische Karten 1:50 000. Ohne die in Nachbarländer reichende Kartenfläche bedecken diese Karten etwa 36 m².

Für die digitale Beschreibung des Inhalts einer topographischen Karte sind thematische Lage- von Höheninformationen zu unterscheiden. In einem Gebirgsland sind je Kartenblatt etwa 10^6 Höhenwerte zu verarbeiten. Für Österreich resultiert daraus eine Höhendatenmenge von etwa $2 \cdot 10^8$ Werten. In der Lage- oder Themenbeschreibung ist die Datenmenge nicht auf einfache Weise exakt zu ermitteln. Erfahrungen zeigen vielmehr, daß ein Kartenblatt etwa durch 10 000 Punkte (Koordinatenpaare) mit je 20 Byte beschreibbar ist. Ein ähnlich großer Platzbedarf besteht insgesamt für die Speicherung in relationeller Form. Damit folgt für Österreich ein Bestand von etwa 80 MByte lagebezogener Information aus topographischen Karten.

Die Anzahl sogenannter thematischer Karten ist wesentlich höher als jene der topographischen, da die Anzahl der Themen auch groß ist. Um hievon einen Eindruck zu vermitteln, sei auf eine derzeit laufende integrierende Naturraumpotentialkartierung verwiesen, welche bezirksweise im Bundesland Steiermark durchgeführt wird. Zu diesem Zweck werden verschiedenste Themenkarten zusammengetragen oder neu erstellt. Je Kartenblatt 1:50 000 werden etwa 128 Themenfolien erzeugt. Für die digitale Beschreibung sind nach Erfahrung etwa 50 KByte je Folie notwendig; auf Österreich umgelegt ergibt sich 1 GByte Speicherbedarf. Ein Beispiel einer Themenfolie stellt Abb. 3 dar.

Neben topographischen und flächendeckenden thematischen Karten besteht die graphische Information über den Grundbesitz in der Form von Katastermappen sowie über die Widmung in der Form der Flächenwidmungspläne. Eine ungefähre Abschätzung zeigt, daß die etwa 12 Millionen Grundstücke Österreichs durch 120 Millionen Koordinatenpaare und - mit der dazugehörigen Beschreibung - durch rund 2.4 GByte digital beschreibbar sind.

Aus den obigen Ausführungen ist noch nicht ersichtlich, welcher Aufwand für die Erstellung der digitalen Beschreibung geleistet werden muß. Eine händische Digitalisierleistung von etwa 350 Punkten pro Stunde läßt jedoch erwarten, daß für die Grundstücke insgesamt ein Aufwand von 170 Mann-Jahren nötig wäre, falls keine automatische Unterstützung gegeben ist.

Es leuchtet ein, daß durch Automatisierung mittels Mustererkennung die Aufgabe der Umsetzung von bestehenden Karten in digitale Form machbarer erscheint. Dabei ist zu prüfen, welche Methoden der Mustererkennung sinnvoll eingesetzt werden können.

3.2 Luftbilder

(a) Kameras

Die ursprüngliche Datenerfassung für geowissenschaftliche Anwendungen beruht zu einem wesentlichen Teil auf Luftbildern. Diese Datenträger liegen heute nahezu ausnahmslos in analoger Form vor. Ein typisches Luftbild hat das Format von 23 x 23 cm² und eine geometrische Auflösung von etwa 20 Linienpaaren pro Millimeter (Abb.4).

Den Informationsgehalt eines Luftbildes kann man durch seinen Maßstab 1:M beschreiben. Im Falle Österreichs ist das gesamte Territorium in einem Maßstab von etwa 1:30 000 bedeckt; daneben sind auch verschiedene andere Maßstäbe gebräuchlich, aber auch Bilder unterschiedlichen Filmtyps.

Damit Luftbilder mittels Methoden der Mustererkennung und digitaler Bildverarbeitung ausgewertet werden können, sind sie zu digitalisieren: Das Bild wird in eine Grauwertmatrix umgesetzt, deren Elemente Bildpunkte oder Picture Elements (Pixels) heißen (Abb.5).

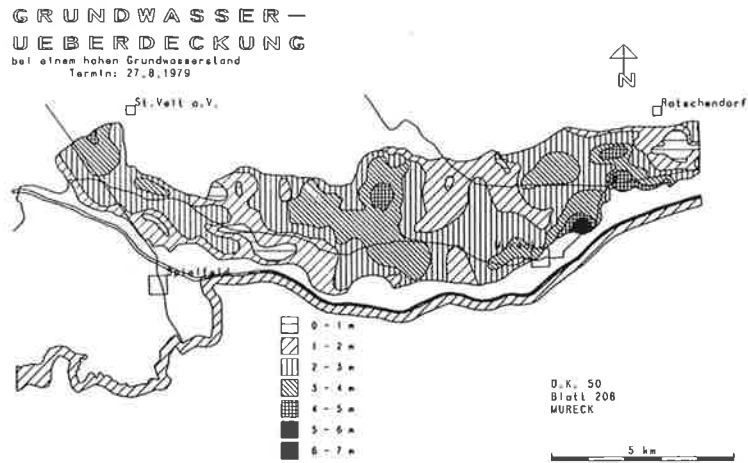


Abbildung 3: Themenfolie einer Naturraumpotentialkartierung im Bezirk Radkersburg, Österreich. Die Information ist mit rund 2200 Punkten und 85K Byte digital darstellbar.



Abbildung 4: Ausschnitt aus einem Luftbild des Stadtgebietes von Graz mit einem Auflösungsvermögen von 20 Linienpaaren pro Millimeter.

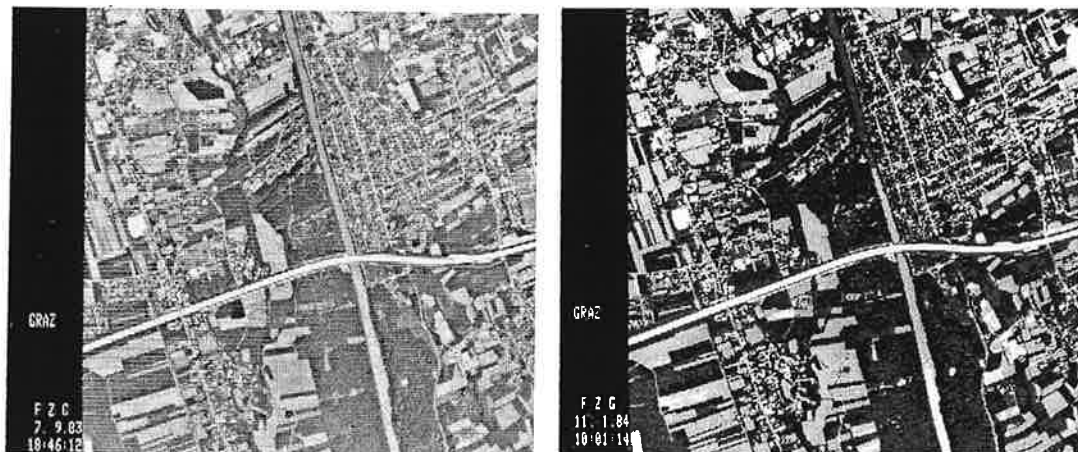


Abbildung 5: Digitaler Luftbildausschnitt nach Rasterung und Quantisierung (a) 8 Bit je Bildpunkt, (b) 2 Bit je Bildpunkt. Vergleiche mit Abb. 4.

Um eine Vorstellung vom zu bearbeitenden Datenumfang zu geben, ist festzuhalten, daß einem Luftbild der angegebenen Art etwa 10^8 Pixel entsprechen. Dies ergibt sich aus dem Zusammenhang von 2.8 Pixel je ~~Linienpaar~~ und den ~~4600~~ Linienpaaren pro 23 cm Formatlänge. Für ein Pixel eines Schwarz-Weiß-Bildes wird ein Byte benötigt, somit je Luftbild 160 MByte. Um Österreich im Maßstab 1:30 000 einmal mit Luftbildern zu bedecken, sind etwa 6000 Bilder zu erstellen. Damit ergibt sich ein digitaler Datenumfang von 960 GByte für Schwarz-Weiß-Bilder.

Diese sehr großen Datenmengen haben es bisher verhindert, daß der herkömmlichen Kamera ein digitaler Sensor gleich hoher Auflösung und Datendichte als Konkurrent entstanden ist. Digitalkameras bestehen in anderen Anwendungsbereichen; in der Luftphotographie jedoch sind bisher nur Entwicklungsarbeiten geleistet worden (Hofmann, 1982), ohne zu (semi-)operationeller Anwendung durchzubrechen.

Die Nutzung von Methoden der Mustererkennung und digitaler Bildverarbeitung setzt nicht voraus, daß Luftbilder in digitaler Form erstellt werden. Vielmehr ist es durchaus sinnvoll und denkbar, das analoge Bild für Bearbeitungszwecke zu digitalisieren. Die hierfür notwendigen Analog/Digitalwandler bestehen als industrielle Produkte (Optronics, undatiert); auch existieren bisher spezielle Hybridsysteme, welche nur einen Bildausschnitt in digitale Form umsetzen, um damit spezielle Auswertungen vorzunehmen (Helava und Chapelle, 1972).

Es ist absehbar, daß gänzlich digitale Bildauswertesysteme für digitale Luftbilder entstehen. Eine Entwicklung wurde von Case (1982) beschrieben.

(b) Andere Sensoren

Neben der herkömmlichen zentralperspektivischen Kamera bestehen auch Sensoren zur Erstellung von Wärmebildern (Abb.6), von Abtastbildern in verschiedenen Bereichen des sichtbaren Lichtes und nahen Infrarotes, sowie von Radarbildern (Abb.7). Diese Sensoren erzeugen zunehmend Digitaldaten, sind jedoch in Anwendungen aus Flugzeugen von vergleichsweise geringer Bedeutung; erst aus Satelliten sind umfassendere Datenmengen zu erwarten.

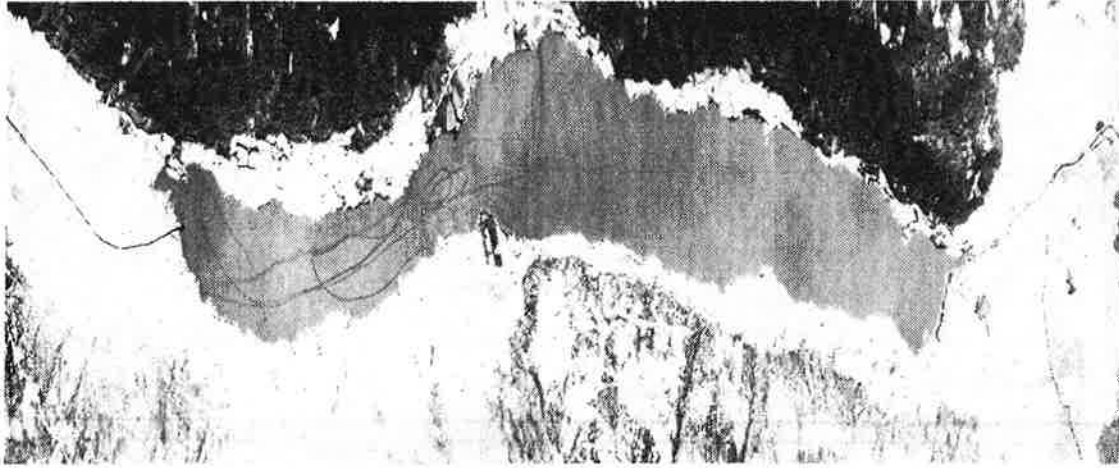


Abbildung 6: Ausschnitt aus einem Wärmebild des Ossiacher-Sees in Kärnten, Österreich.

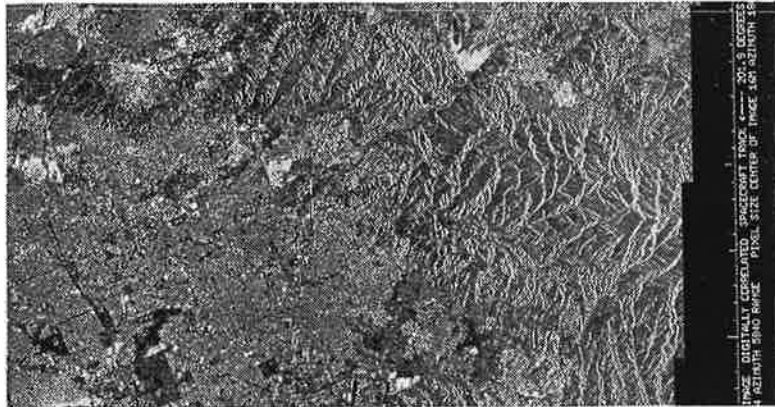


Abbildung 7: Ausschnitt eines digitalen Satellitenradarbildes von Los Angeles, aufgenommen 1978 mit dem Satelliten Seasat aus 800 km Höhe.



Abbildung 8: Ausschnitt eines digitalen Satellitenbildes der Steiermark, Österreich, Landsat MSS, Kanal 7, 30.12.81, 1536 Spalten, 1024 Zeilen. Dies entspricht bei einer geometrischen Bildpunktgröße von $57 \times 79 \text{ m}^2$ einer Fläche von rund 7.000 km^2 . In der Mitte der linken Hälfte liegt das Grazer Becken. Durch die Schneebedeckung heben sich Tallagen deutlich von der bewaldeten Hügellandschaft ab.

3.3 Satellitenbilder

Die Erstellungskosten aktueller Luftbilder sind so hoch, daß nur einmal in mehreren Jahren eine derartige Datenherstellung erfolgen kann. Demgegenüber bietet ein Satellit einen Sensorträger, welcher stets wiederkehrend eine vollständige Bildbedeckung liefern kann, solange die Daten durch Funkübermittlung zur Erde gebracht werden. Die Digitalform ist für diese funkübertmittelten Daten selbstverständlich. Typische Satellitenbilder bestehen für die Meteorologie etwa im halbstündigen Zeitabstand, für die geowissenschaftliche Fernerkundung etwa aus U.S.-Satelliten vom Typ Landsat in 16 bis 18-tägigen Intervallen für jeden Punkt der Erde.

Diese Daten der Erdoberfläche bestehen aus Pixeln der Dimension $57 \times 79 \text{ m}^2$ oder $30 \times 30 \text{ m}^2$, wobei je Satellitenbahn eine Bildbreite von 3000 bis 6000 Pixel aufgenommen wird. Abb. 8 zeigt ein Beispiel aus der Steiermark.

In näherer Zukunft (1985) werden funkübertmittelte Satellitenbilder des französischen Satelliten SPOT mit Pixelgrößen von bis zu $10 \times 10 \text{ m}^2$ zu erwarten sein, wobei je Bahn 3000 Bildpunkte erzeugt werden (Ducher, 1980). Es ist dann davon auszugehen, daß ein Datenfluß von etwa $8.2 \cdot 10^8$ Pixeln pro etwa 21 Tagen für ein Territorium wie jenes von ganz Österreich zur Verfügung stehen wird.

Es sollte klar sein, daß ein derartiger Datenfluß für eine Vielzahl von Anwendungen einschneidende Folgen haben wird, wenn die geometrische Auflösung für die kleinflächige westeuropäische Territorialgliederung geeignet hoch ist. Es sollte jedoch auch ersichtlich sein, daß eine sinnvolle Datenanalyse weitgehend automatisiert zu werden hat, um Datenredundanzen zu eliminieren und Anwendungsbezüge zu erleichtern.

4. METHODEN DER BILDVERARBEITUNG UND MUSTERERKENNUNG

4.1 Allgemeines

Als Disziplin und auch als Industriezweig ist die digitale Bildverarbeitung heute ein durchaus eingeführtes Fachgebiet; es wurde schon festgestellt, daß umfassende Literatur mit Lehrbüchern und Zeitschriftenreihen besteht.

Demgegenüber ist die Mustererkennung ein eher grundlagenbezogenes Fach mit akademischer Ausprägung. Auch hier ist eine reiche Literatur vorhanden und es bestehen im angelsächsischen Raum viele akademische Einrichtungen und Ausbildungsprogramme. Im deutschsprachigen Raum ist zum Beispiel der Lehrstuhl für Mustererkennung an der Universität Erlangen, der Lehrstuhl für Bildwissenschaften der ETH-Zürich oder das Forschungsinstitut für Mustererkennung und Informationsverarbeitung in Karlsruhe zu nennen.

Eine Abgrenzung zwischen Bildverarbeitung und Mustererkennung ist nur unklar möglich und wurde im Abschnitt 2 diskutiert. Eine umfassende Diskussion ist angesichts der gegebenen Ausreifung und des Umfangs des Faches weit außerhalb des Rahmens dieser Arbeit.

Daher wird im folgenden versucht, aufgrund von Beispielen typische Elemente der Bildverarbeitung und Mustererkennung zu verdeutlichen, ohne hierbei zwischen den beiden Fachgebieten zu unterscheiden.

Im Hinblick auf die hier behandelten speziellen Anwendungen ist eine Gliederung der Vielzahl der Methoden nach den schon im Abschnitt 2 aufgeführten Bereichen sinnvoll:

- (a) Datentransfer (Lesen, Schreiben);
- (b) radiometrische Korrekturen (engl. Restoration);
- (c) geometrische Korrekturen;
- (d) Bildverstärkung für visuelle Analyse (engl. Enhancement)
- (e) Bildanalyse;
- (f) Datenkomprimierung, Bildspeicherung und Ergebnisdarstellung

Mit * bezeichnete Befehle benötigen spezielle Geräte
 Mit + bezeichnete Befehle sind auf das verwendete Computersystem abgestimmt und müssen angepaßt werden

Lesen/Schreiben von Magnetbändern verschiedener Formate
 Umwandlung von Datenformaten

CT256		Computertomogramme
DEZDSK		Liste mit Dezimalwerten
LDSAT		LANDSAT MSS - NASA
OPTIN		Optronics - Abtasterdaten lesen
OPTOUT		Bild für Ausgabe auf Optronics - Filmschreiber aufbereiten
SAR		SAR-580 (Flugzeugradar)
SARTEST		Begleitinformation SAR-580
SEASAT		SEASAT JPL - Format
TELSAT		LANDSAT MSS Telespazio-Format
TELEHD		Begleitinformation LANDSAT - Telespazio-Format
TELRBV		LANDSAT RBV Telespazio-Format

Bilddarstellung

BDDEZ		Bild als Dezimalzahlen in Matrixform drucken
BDGRAY	*	Bild auf elektrostatischem Drucker darstellen
PLOTFO	*	Äquidensitenlinien zeichnen
PRINT		Bild als Grautondarstellung (8 Stufen) drucken mit automatischer Histogrammqualisierung

Organisation

ASN	+	Zuordnung von Ein- und Ausgabegeräten
BDINFO	+	Information über vorhandene Bilder
BKW	+	Definition des zu bearbeitenden Bildes und Bildausschnittes für mehrere Verarbeitungen
COM	+	Einfügung von Kommentaren in das Protokoll
END	+	Beendigung der Arbeit mit DIBAG
EXIT	+	Unterbrechung der Arbeit mit DIBAG
HELP	+	Information über Programmfunktionen
KILLBD	+	Löschen eines Bildes
KILLBIN	+	Löschen der Masken-Arbeitsdatei
KILLHIS	+	Löschen der Histogramm-Arbeitsdatei
KILLLOK	+	Löschen der Lookup-Tabellen-Arbeitsdatei
KILLWORK	+	Löschen aller Arbeitsdateien
LOG	+	Ausgabe der Protokolldatei
WORK		Information über Inhalt der Arbeitsdateien

Tabelle 1: Bildverarbeitungsbeehle des Systems DIBAG am Institut für digitale Bildverarbeitung und Graphik in Graz (Stand 12.1983).

Binärbild- und Maskenbearbeitung	
BINAREA	Flächen- und Schwerpunktsberechnung
BINCORR	Maskenkorrelation
BINDRU	Maske drucken
BINEX	Maske für Verarbeitung unwirksam machen
BINFIL	Inneres eines von der Maske umschlossenen Gebietes auffüllen
BININ	Maske für Verarbeitung wieder wirksam machen
BINOP	Logische Verknüpfung von Masken
BINSHI	Maske in ihrem Fenster verschieben
LIBIN	Maske von Bilddatei in Arbeitsdatei laden
LIMAS	Maske von Maskendatei in Arbeitsdatei laden
MASKBD	Bilddatei im Bereich der Maske auf einen bestimmten Wert setzen
NOTBIN	Logisches Komplement der Maske bilden
REGION	Regionenwachstum (region growing)
STOBIN	Maske von Arbeitsdatei in Bilddatei speichern
STOMAS	Maske von Arbeitsdatei in Maskendatei speichern
Bildmanipulation	
CHEOPS	Aufbau einer Bildpyramide
COPYBD	Bild(ausschnitt) kopieren; Maske und Transformationstabelle, wenn vorhanden, werden berücksichtigt
DIRECT	Geometrische Transformation (Vergrößerung, Verkleinerung, Drehung)
GRKEIL	Graukeil (Referenzmuster mit aufsteigenden Bildwerten) in ein Bild einfügen
LADBGR	Bilddatei erzeugen und mit vorgegebenem Wert beschreiben
NOISE	Aufbringen von synthetischem Rauschen
Histogramme	
GENHIS	Histogramm berechnen und auf Arbeitsdatei speichern
HIST2	Zweidimensionales Histogramm berechnen und als Bild speichern
LIHIS	Histogramm aus Bildzeile lesen
MINMAXBD	Minimum und Maximum des Bildes berechnen
PLOHIS	Histogramm zeichnen
PRIHIS	Histogramm drucken (Balken als Druckzeichen)
SPAHIS	Spaltenhistogramm eines Binärbildes
STOHIS	Histogramm in Bildzeile schreiben
ZEIHIS	Zeilenhistogramm eines Binärbildes
Lookup-Tabellen	
HISLOK	Transformation zur Angleichung des Histogramms an eine vorgegebene Verteilung berechnen
LOK	Lookup-Tabellenmanipulation
NEGATE	Umkehrung der Lookup-Tabelle
SETLOK	Setzen einer linearen Transformation

Tabelle 1 (Fortsetzung)

		Filter im Ortsbereich
LAPABS		Laplace - Absolutbetragssumme
LAPLAC		Laplace
LAPPOS		Laplace - Absolutbetrag
MASK33		Allgemeiner 3x3 - Filter mit vorgebbaren Werten
RANGOP		Rangoperator
ROBABS		Roberts - Absolutbetrag
ROBERT		Roberts
ROBMAX		Roberts - Maximum
SMOOTH		Glättung mit Durchschnittsfilter
SOBABS		Sobel - Absolutbetrag
SOBEL		Sobel
SOBMAX		Sobel - Maximum
		Bildverknüpfungen
ADIMAG		Linearkombination von Bildern
DIRCOS		Richtungscosinusbild
DIST		Distanzbildberechnung
RATIO		Ratiobildberechnung
THRESHOLD		Schwellwertbildung
VECLEN		Vektorlängenbild
		Liniensuche
LINSEA		Liniensuche - Vorwärtsverfolgung
PASCOO	*	Interaktive Vorgabe von Punkten der Linie
TRACK		Liniensuche - Rückverfolgung
		Vektor-Raster-Umwandlung
POLBIN		Durch Vektoren gegebenes Polygon in Binürbild umformen, wahlweise auffüllen
POLFIT		Polygone glätten
POLGEN		Polygondatei aus Äquidensitenlinien generieren
POLINF		Polygondatei-Information ausgeben
POLPLO	*	Polygone zeichnen
		Schnittstelle zum Bildverarbeitungsprozessor DeAnza
ANZABD	*	Bild vom Bildspeicher lesen und in DIBAG-Format auf Magnetplatte speichern
ANZLOK	*	Lookup-Tabelle aus Tabellenspeicher lesen und in DIBAG-Arbeitsdatei speichern
ANZMAS	*	Binärbild aus Graphic Overlay lesen und in DIBAG Arbeitsdatei speichern
BDANZA	*	Bildausschnitt eines Bildes im DIBAG-Format mit Wertebereich (0,255) in Bildspeicher schreiben
DISPLAY	*	Bildausschnitt eines Bildes im DIBAG-Format mit Werten 0 oder 255 in Bildspeicher schreiben
LOKANZ	*	Lookup-Tabelle aus DIBAG-Arbeitsdatei lesen und in Tabellenspeicher speichern
MASANZ	*	Binärbild aus DIBAG-Arbeitsdatei lesen und in Graphic Overlay speichern

Tabelle 1 (Fortsetzung)

Geometrische Entzerrung	
GRIGEN	Berechnung des Deformationsgitters
GRIANA	Kontrollausdruck des Gitters
PLOKNO	* Gitter auf Zeichengerät darstellen
RESAMP	Umbildung der Bildmatrix
CORREL	* Digitale Bildkorrelation
Behandlung von Digitalen Geländemodellen (GTM)	
BDGTM	Bild in Digitales Geländemodell
GTMBD	Digitales Geländemodell lesen
OBERFL	Oberflächendatei zur Darstellung perspektiver Ansichten generieren
D3DISP	* Synthetische perspektive Ansicht eines Geländemodells mit verschiedenen Beleuchtungsmodellen; wahlweise Speicherung der Verzerrungsinformation
PQPARA	Bestimmung des lokalen Normalvektors
SLOPE	Bestimmung von Neigung und Expositur
VISBIN	Erzeugung einer Maske der sichtbaren Geländeteile
ILLUIM	Erzeugung einer synthetischen Beleuchtung

Tabelle 1 (Fortsetzung)

	Restoration	Enhancement	Data Compression	Geometry Manipulation	Radiometric Correction	Interpretation Enhance	Pattern Recognition	Data Transfer	Image Presentation	
Image read								x		SAR-580, Optronics, sequential formats, LANDSAT MSS, RBV, SEASAT
Image write								x		Optronics-Filmwriter
Image transforms			x							Hadamard, Discrete Cosine, Fast Fourier
Frequency filtering	x	x		x						notch, wedge, high pass, low pass, band pass
Spatial filtering	x	x		x						averaging, median, rank, weighted
Edge operators		x					x			Roberts, Sobel, Laplace, Compass gradient
Gray scale manipulation		x		x				x		linear, non-linear, histogram adaption
Color transforms		x						x		pseudocoloring, IHS-RGB-transform
Image statistics		x	x	x			x			histogramming, distribution estimators (mean, covariance)
Texture measures							x			co-occurrence matrices, sub-image statistics
Distortion modelling				x						control data acquisition, warp functions
Resampling			x	x						parametric models, correlation
Line following						x	x			nearest neighbour, bilinear, convolution
Relaxation labelling							x			heuristic search
Feature classification							x			multi-parameter models, sequential similarity detection
Thresholding							x			feature space discrimination functions, factor analysis, clustering
Image combination			x	x			x			one- and multi-dimensional, level slicing, contouring
Map-Image overlay				x	x		x	x		ratioing, vector length, directional cosine, principal component, arithmetic
Terrain model overlay				x	x	x	x	x		vector-to raster conversion, map-guided interpretation
Image rendition						x		x		radiation modelling, geometric modelling, synthetic views, image simulation
<p>General features: sub-image selection (windowing), masking of operations with arbitrary binary masks system administration with information about images and status, work protocol unique internal image data format.</p>										

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Bildverarbeitungsfunktionen und ihrer Anwendung. Beispiel: die Bildfilterung ist für Korrekturen und zur Verstärkung anwendbar. Die Funktionen beziehen sich auf das System DIBAG (vgl. Tabelle 1).

Diese Gliederung ist für den Benutzer von Bildern relevant, nicht jedoch für den Hersteller der Werkzeuge der Bildverarbeitung und Mustererkennung.

Daher sei im Rahmen der Tabellen 1 und 2 der Versuch unternommen, die für Bilder notwendigen Werkzeuge der Verarbeitung für den Fall eines konkreten Systems aufzulisten und einer Anwendungsklasse gegenüberzustellen. Einige wesentliche Methoden seien im folgenden näher diskutiert.

4.2 Grauwertmanipulationen

Die erste Prüfung eines digitalen Bildes besteht aus der Erstellung eines Grauwertehistogramms. Daraus ist die Grauwertverteilung über den gegebenen Wertevorrat von meist 0 bis 255 zu ersehen und die Basis für eine verbesserte Unterscheidung von Objekten aufgrund ihrer Grautöne gegeben. Abb. 9 ist das Beispiel eines Bildes und seines Histogrammes mit einer Neuverteilung der Grauwerte und dem visuell beurteilbaren Ergebnis.

Die Durchführung der Grauwertneuverteilung erfolgt über eine sogenannte Look-up-table (LUT), welche jedem Eingabewert einen Ergebniswert zuordnet. Mit der Besetzung der LUT kann eine lineare oder auch nicht-lineare Grauwerttransformation erreicht werden. Von besonderem Interesse ist die Herstellung eines Bildes mit uniformem Histogramm, da hierin jeder Grauwert dieselbe Wahrscheinlichkeit des Auftretens hat und somit der Informationsgehalt maximiert ist.

Ein sehr oft verwendetes Verfahren ist die Schwellwertbildung und Binärisierung eines Bildes, in dem über dem Schwellwert zu 1, alle Grauwerte darunter zu 0 gesetzt werden.

4.3 Bildfilterung

Für verschiedenste Anwendungen ist es sinnvoll, das Bild mit einem Filter zu bearbeiten. Mit der Bezeichnung $g(i,j)$ als Grauwert im Eingabebild an der Stelle i,j und $f(i,j)$ im Ausgabebild gilt:

$$(4.1) \quad f(i,j) = \sum_{l=-N}^N \sum_{m=-M}^M g(i+l,j+m) h(l,m)$$

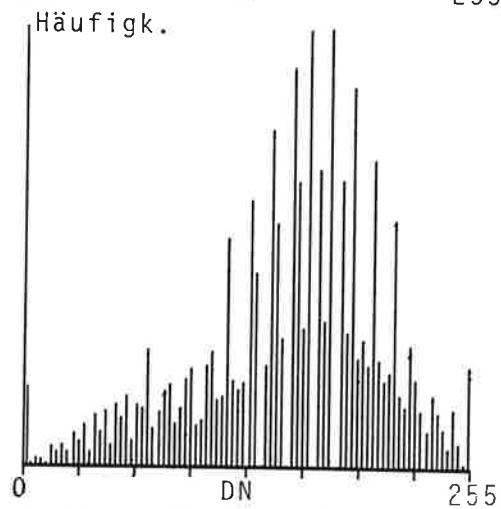
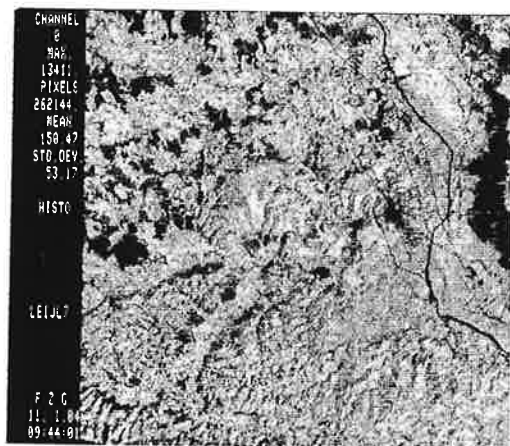
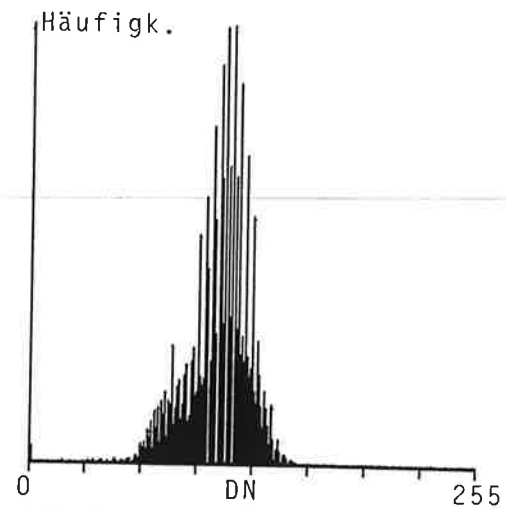
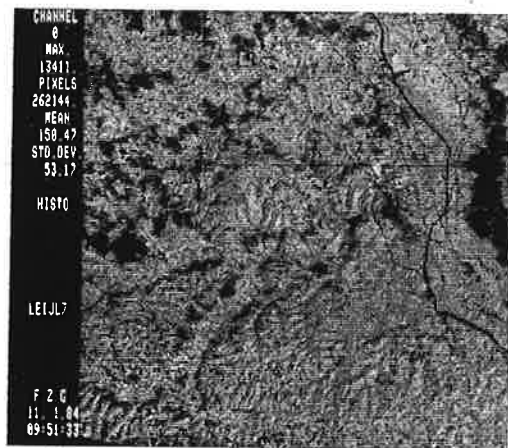


Abbildung 9: Landsat MSS, Kanal 7, 2.7.81, Leibnitz, entzerrt.
(a) Digitales Satellitenbild; (b) Grauwertehistogramm;
(c) Optimiertes Bild; (d) Neues Histogramm.

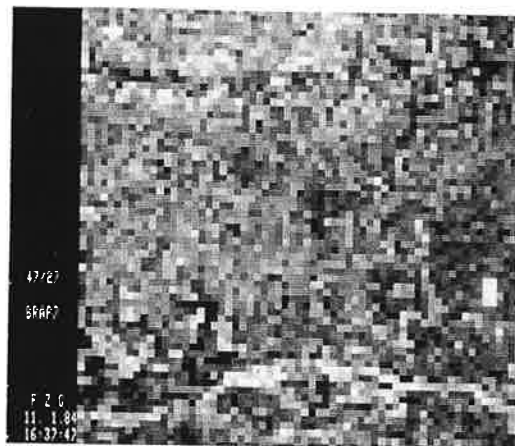
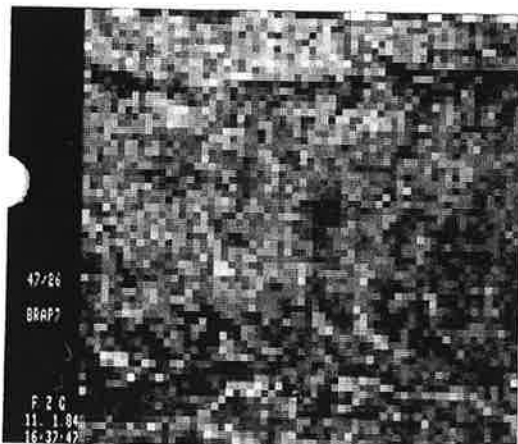


Abbildung 10: Beispiele für verschiedene Texturparameter. Auf das Satellitenbild von Abb. 12 wurde ein Kantenoperator angewandt. Aus dem Kantenbild wurden für je 8 x 8 Bildpunkte (a) Mittelwerte und (b) Standardabweichungen zur Bestimmung einer Kantentextur berechnet.

wobei $h(l,m)$ eine diskrete Filtermatrix darstellt. Diese Konvolution von Eingabebild und Filter kann auch in der Spektraldarstellung des Bildes erfolgen. Für die Spektraldarstellung sind die Fourier-Transformierten $F(g)$, $F(h)$ zu bilden. Damit gilt:

$$(4.2) \quad F(f) = F(g) \cdot F(h)$$

$$(4.3) \quad f = F^{-1}(f)$$

wobei mit $F^{-1}(\cdot)$ die inverse Fouriertransformation bezeichnet wird.

Nach der Darstellung von Moik (1980) ist die Filterung bei Filtermatrizen der Größe über 13×13 besser in der Spektraldarstellung durchzuführen.

Die Anwendung der Bildfilterung ist vielfältig und reicht von der Unterdrückung kohärenter Störfunktionen über die Kompensation der Abbildungsunschärfe bis zur Verstärkung gewisser Bildfrequenzen, insbesondere der hohen, zur Betonung feiner Grauwertunterschiede.

4.4 Textur und Kanten

Der Begriff "Textur" ist nicht scharf, sondern durch Beispiele und allgemeinere Beschreibungen definiert (Abb. 10): er betrifft eine Eigenschaft von Flächen, die jedoch punktweise zugeordnet wird. Textur ist mit der räumlichen Verteilung von Bildkanten oder den Grauwertdifferenzen je Flächeneinheit zu beschreiben. Als Beispiel einer Vielzahl heuristischer Texturparameter sei ein von Rosenfeld (siehe Pratt, 1978) angegebener genannt:

$$(4.4) \quad T(j,k) = c \sum_{m=j-W}^{j+W} \sum_{n=k-W}^{k+W} E(m,n)$$

wobei $T(j,k)$ der Texturwert an der Stelle (j,k) ist; c ist eine Konstante, $E(m,n)$ sind Kanten im Binärbild, also ist $E = 1$ im Fall eines hohen Kantenwertes, 0 im anderen Fall. $2 \cdot W + 1$ ist die Dimension eines Berechnungsfensters um den Ort (j,k) .

Textur kann zur Objektbeschreibung genutzt werden, sofern eine charakteristische Textur besteht und algorithmisch erfaßt wird. Die Schwellwertbildung über ein Texturbild würde die zu einem Objekt gehörenden Bildpunkte absondern. Wesentliche Arbeiten wurden von z.B. Haralick u.a. (1973), im deutschen Sprachraum von Bargel (1980) geleistet.

Kantenwerte werden für "benachbarte" Bildpunkte definiert. Nachbarschaften wurden in Abschnitt 2 nach Rosenfeld (1970) in allgemeiner Weise definiert. Für zwei oder mehr benachbarte Pixel $g(i,j)$ ist der Kantenwert e auf verschiedene Weise zu ermitteln. Vielverwendete Kantenoperatoren sind jene von Roberts, Sobel, oder mittels Laplace-Operator. Pratt (1978) gibt eine ausführliche Diskussion der Kantenbestimmung. Eine Übersicht wurde auch von Kropatsch und Leberl (1980) zusammengestellt.

Ein Schwellwertoperator liefert nach Anwendung auf das Kantenbild eine binäre Darstellung der hohen Kantenwerte.

Kantenbilder sind nur ein Zwischenschritt der Bildverarbeitung und Mustererkennung. Sie können die Grundlage von Texturparametern bilden, der nachfolgenden Suche von Linien oder der Verstärkung des hochfrequenten Bildinhaltes dienen. Ein Beispiel ist in Abb.11 dargestellt.

4.5 Die Suche nach Linien

Linien verbinden einen vorgegebenen Anfangs- mit einem Endpunkt. Liniensuche ist damit als Verfolgen eines Grates im Grauwertgebirge zu beschreiben. Die Liniensuche ist nach Pratt (1978) einer von 3 Verfahrenskategorien zuzuordnen:

- Linienbildung durch Verknüpfen von Kanten,
- heuristische Suche im Grauwertgebirge,
- Verfolgen von Objektkonturen.

Die Liniensuche ist der eigentlichen Mustererkennung zuzuordnen und ein zentrales Problem der Bildanalyse; es ist jedoch nicht in befriedigender Weise gelöst. Die automatische Festlegung von Anfangs- und Endpunkten ist äußerst fehlerbehaftet; die Überbrückung von

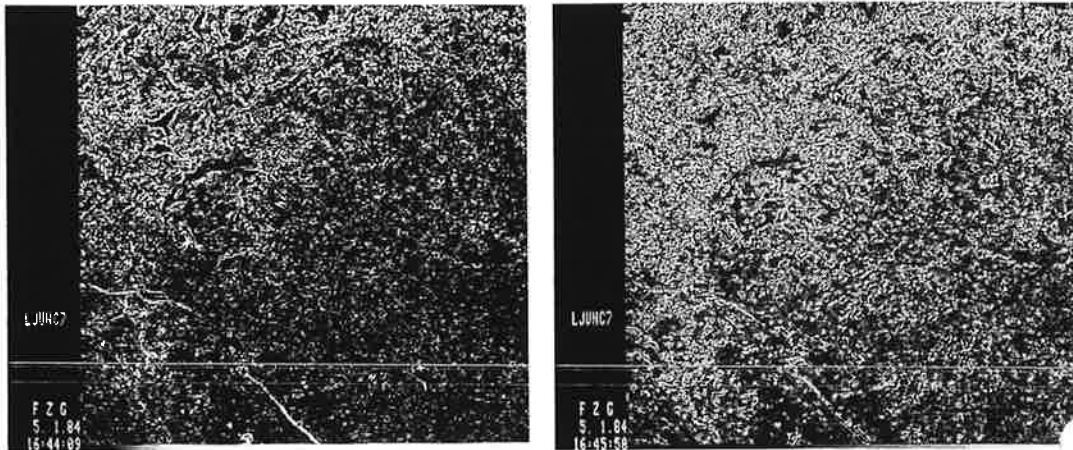


Abbildung 11: Beispiel eines Kantenbildes, berechnet aus einem digitalen Satellitenbild. Kantenoperatoren (a) nach Roberts, (b) nach Sobel (vgl. Pratt, 1978).

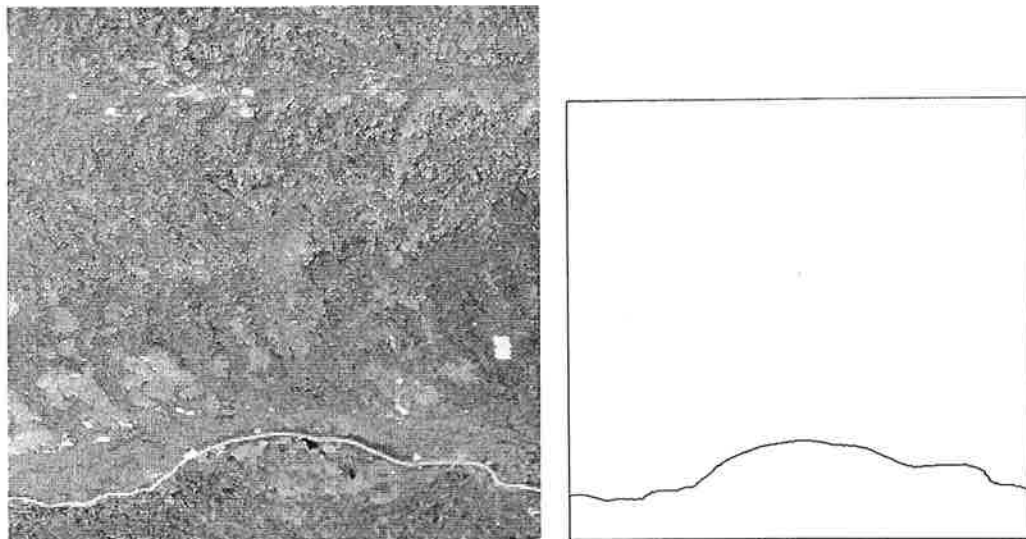


Abbildung 12: Automatische Liniensuche
 (a) Landsat-MSS, Kanal 7, 23.4.1981. Ausschnitt Bad Radkersburg
 (b) erkanntes linienhaftes Objekt (Fluß Mauer).

Linienunterbrechungen gelingt nur unvollständig; die Verfahren sind sehr anfällig gegen Störungen. Diese Aussagen resultieren aus eigenen unveröffentlichten Arbeiten und Äußerungen von anderen. Einige gute Beispiele von geowissenschaftlich relevanten Arbeiten sind von Montoto (1977), Groch (1982) und anderen. Abb. 12 stellt ein Ergebnis für ein Satellitenbild dar.

Die bedeutendste Anwendung im gegenständlichen Zusammenhang liegt in der automatischen Digitalisierung bestehender Karteninformation (Beer, 1981, Lichtner, 1981). Durch Rasterabtastung einer Kartenfolie wird nach Schwellwertbildung und Schließen von Löchern ein Muster nach Abb.13 erhalten. Es besteht die Aufgabe, die Linienachsen und Knoten zu ermitteln und in einer Knoten-Liniensegmente-Struktur zu beschreiben.

Die Vielzahl möglicher Verfahren wurde von Woetzel (1978) beschrieben. Ein spezielles und erfolgreiches Verfahren erzeugt die Konturen der im Binärbild wiedergegebenen Schwarzregionen. Konturermittlung ist ein z.B. bei Pratt (1978) beschriebenes Verfahren. Daran schließt die Ermittlung einer Distanztransformation, die jedem Weißpixel im Konturbild den Minimalabstand zum nächsten Linienrand zuweist. Maxima dieser Distanztransformierten stellen die Linienachse dar, welche nunmehr in Vektordarstellung als Punktfolge abgelegt werden kann.

Ein derartiges Verfahren liefert mit Ausnahme von Linienschnitten (Knotenpunkten) befriedigende Ergebnisse. Das Problem der guten Knotenfestlegung ist bisher nicht gelöst. Sogenannte "state-of-the art" Lösungen sind in Abb. 14 wiedergegeben und zum Teil nicht brauchbar.

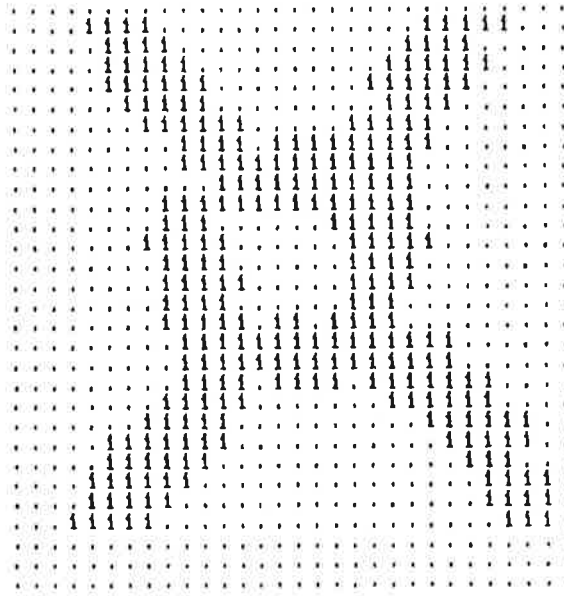


Abbildung 13: Binärbild eines abgetasteten Kartenausschnittes nach Füllen von Lücken.

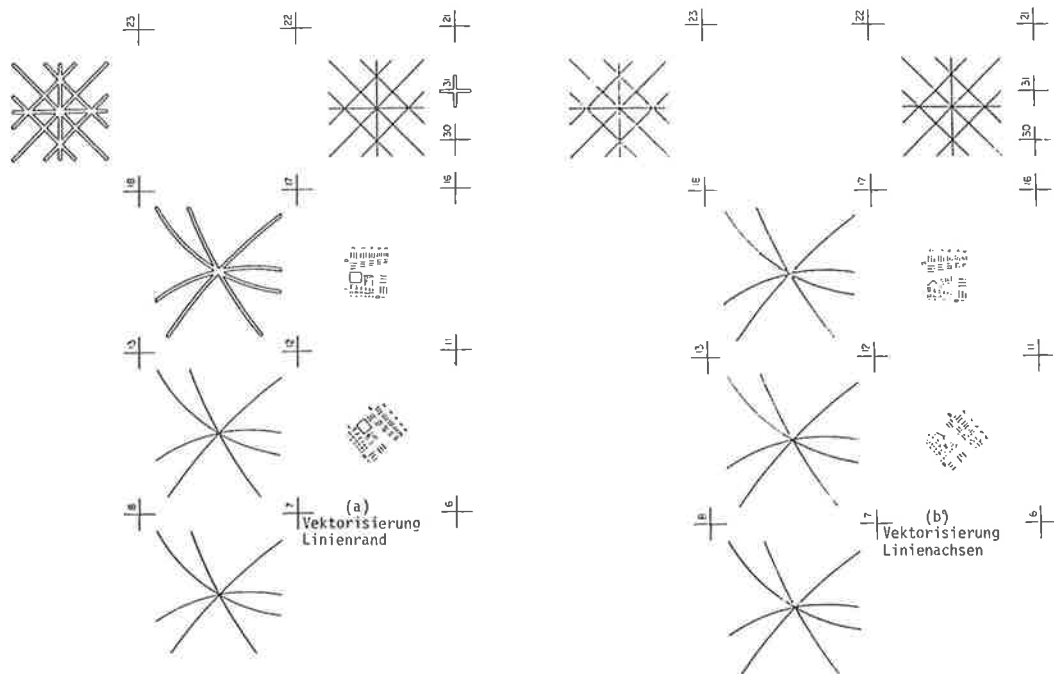


Abbildung 14: State-of-the-Art der Raster-zu-Vektor-Umwandlung graphischer Vorlagen, dargestellt an einem Testmuster.

4.6 Geometrische Entzerrung

Eine Klasse von wichtigen Bildmanipulationen betrifft die geometrische Entzerrung. Diese läuft allgemein in zwei Teilschritten ab:

- (a) zunächst Festlegung der Bilddeformationen unter Verwendung von Entsprechungspunkten und einem geeigneten mathematischen Deformationsmodell;
- (b) sodann Erzeugung des neuen Bildes unter Verwendung der Deformationsinformation.

Der erste Schritt beruht auf sogenannten Paßpunkten, welche das Bild mit der Sollgeometrie in Verbindung bringen (Abb. 15). Die Paßpunkte dienen dem Zweck, eine geometrische Transformation zwischen Ist- (Eingabe-) und Soll- (Ausgabe-) bild zu bestimmen.

$$(4.5) \quad \begin{aligned} x &= T_x (a_i, i=1, \dots, n ; X, Y) \\ y &= T_y (b_j, j=1, \dots, m ; X, Y) \end{aligned}$$

wobei $g(x,y)$ das Ist-Bild, X, Y die Bildkoordinaten im Ausgangsbild, a_i, b_j die Transformationsparameter und x, y die Ergebniskoordinaten darstellen. Typische geometrische Transformationen T_x, T_y sind die Zentralperspektive oder Polynome.

Üblicherweise werden die Parameter a_i, b_j mittels Überbestimmung ermittelt und sodann benutzt, um ein Gitter von sogenannten "Knotenpunkten" zu definieren. Vier Knotenpunkte bestimmen ein quadratisches Fenster im Ausgabebild, wobei die Fenstergröße $n \times n$ Pixel umfaßt. Als Ergebnis wird eine Knotendatei von x_i, y_i - Knotenpunkten des Eingabebildes erstellt, die diesem Quadrat-Raster im Ausgabebild entsprechen.

Im zweiten Schritt wird das sogenannte "Resampling" zur Erzeugung des Ausgabebildes durchgeführt. Dabei wird zunächst für einen Punkt (i,j) des Ausgabebildes unter Verwendung der 4 umliegenden Knoten die Lage (x,y) im Eingabebild festgelegt. Aus den diese Lage umgebenden Bildpunkten des Eingabebildes wird dann ein Grauwert ermittelt (Abb. 16). Die Zuweisung erfolgt mittels einem von 4 typischen Verfahren:

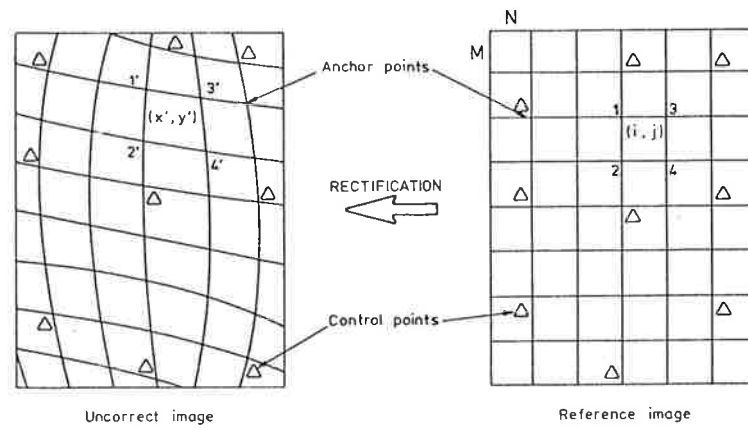


Abbildung 15: Ermittlung der Bilddeformation mittels Paßpunkten und Darstellung der Knotenpunkte, die die Deformation modellieren.

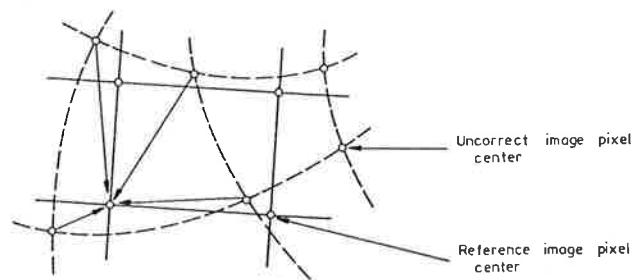


Abbildung 16: Prinzip des "Resampling" zur Zuweisung von Grauwerten an das Ergebnisbild und Grauwertermittlung aus umliegenden Pixeln (durch bilineare Interpolation).

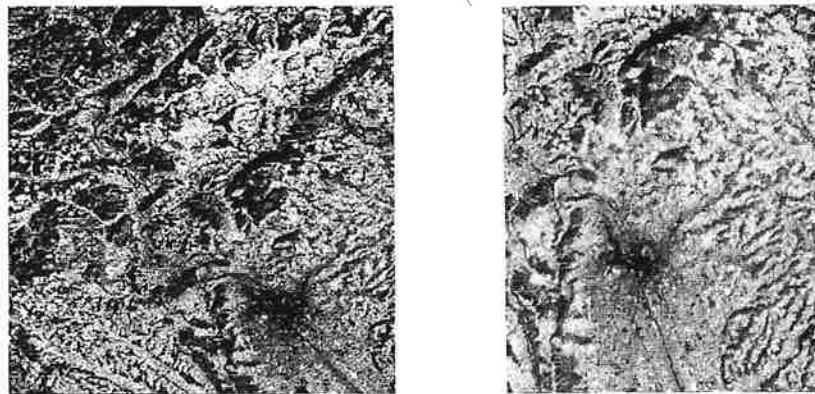


Abbildung 17: Beispiel eines Original-Satellitenbildes und der entzerrten Wiedergabe. (a) Landsat MSS, Kanal 7, 13.9.1981 Ausschnitt Graz. Im entzerrten Bild (b) entspricht ein Bildpunkt einer Fläche von $50 \times 50 \text{ m}^2$. Die Grauwerte wurden mittels bilinearer Interpolation ermittelt.

- nächster Nachbar;
- bi-lineare Interpolation;
- biquadratische Interpolation;
- bi-kubische Interpolation.

Die Methode des nächsten Nachbarn läßt alle Grauwerte des Eingabebildes unberührt. Auch ein Binärbild bleibt nach der Transformation ein Binärbild. Diagonallinien neigen jedoch zu einer Wiedergabe als Treppe.

Höherwertige Grauwertinterpolationen verringern den Treppeneffekt, verändern jedoch die Grauwerte. Aus einem Binärbild würde daher ein Bild mit Grauwerten zwischen 0 und 1 werden. Es ist anwendungsabhängig zu prüfen, welches Vorgehen besser ist. Die geometrische Entzerrung ist eine sehr rechenaufwendige Operation, wobei die Methode des nächsten Nachbarn vergleichsweise die wirtschaftlichste ist.

Abb. 17 gibt ein Beispiel eines ursprünglichen sowie eines entzerrten Landsat-MSS Bildes, welches an einer VAX 11/750 in etwa 20 Minuten CPU-Zeit erstellt wurde. Die Genauigkeit des Ergebnisses wird durch den mittleren Fehler der Pixellage im entzerrten Bild beschrieben, wobei als Maßeinheit der Pixeldurchmesser benutzt wird. Typische Werte sind ± 0.5 Pixel.

4.7 Bildüberlagerung

Das Zur-Deckung-Bringen von mehreren Bildern eines Objektes wird mit "Bildüberlagerung" (engl. Image registration) bezeichnet. Die Herstellung des neuen Bildes erfolgt durch Resampling in der unter 4.6 angegebenen Weise. Die Erzeugung der Knotendatei oder der Paßpunktlagen beruht auf Bildkorrelation. Hierzu werden mit einem von vielen möglichen Algorithmen Gebiete in zwei Bildern aufgesucht, die einander entsprechen. Dies geschieht durch Ermittlung von Korrelations- oder Ähnlichkeitsmaßen (Anuta, 1970); Barnea u. Silverman, 1972) zwischen den Grauwertmasken im Referenz- und Suchbild. Der Mittelpunkt in der Lage der Referenz- und Suchfenster bei maximaler Korrelation definiert ein Paar von homologen Entsprechungspunkten.

4.8 Mehrfachbilder, Merkmalsräume und Klassifizierung

Die Beschreibung eines Musters beruht (vgl. Abschnitt 2) auf dem Konzept des Merkmalraumes. Die Lage eines Punktes in diesem n -dimensionalen Raum R_n wird durch einen Merkmalsvektor $\underline{x} = (x_1, \dots, x_n)$ festgelegt. Die Werte x_1, \dots, x_n sind Zahlen zur Beschreibung eines vorgegebenen Musters. Muster werden in Musterklassen eingeteilt und klassifiziert.

In diesem Sinne besteht für Muster und das Klassifizieren kein Unterschied in verschiedensten Anwendungsbereichen. Die Klassifizierung des zu einem Schriftzeichen gehörenden Merkmalsvektors beruht auf demselben Verfahren wie die Klassifizierung der Bildpunkte einer Luftaufnahme eines geschädigten Waldes. Unterschiede bestehen in der Erstellung des Merkmalsvektors.

Für Aufgaben der geowissenschaftlichen Mustererkennung liegen mehrdimensionale Datensätze vor, welche in jedem Bildort Werte über

- spektrale Eigenschaften
- temporale Eigenschaften
- Textur-Eigenschaften

liefern. Die Erstellung dieser Datensätze erfordert (a) die Erzeugung von Spektralinformationen durch geeignete Sensoren; (b) die Überlagerung von Bildern aus verschiedenen Zeitpunkten; (c) die Ableitung von räumlich-nachbarschaftlichen Zusammenhängen in der Form von Texturbildern. Abb. 18 zeigt Ausschnitte aus einem typischen multitemporalen Datensatz.

Die Klassifizierung selbst ist ein in der Literatur ausführlich diskutiertes Thema (Niemann, 1983). Für das Beispiel eines 2-dimensionalen Datensatzes wird in Abb. 19 schematisch dargestellt, wie aufgrund bekannter Objektdaten der Merkmalsraum in Regionen gegliedert wird. Jeder neue Merkmalsvektor (x_1, x_2) wird nun jener Klasse zugeordnet, in deren Region er zu liegen kommt.

Die Aufgabe ist komplex; es sind geeignete Objektvorkenntnisse zu erheben, geeignete Formulierungen zur Gliederung des Merkmalraumes zu verwenden und vor allem im nachhinein Aussagen über das Ergebnis einer Anwendung zu machen: mit welcher Gewißheit ist denn nun ein Bildmerkmal



Abbildung 18: Ausschnitte aus einem typischen Fernerkundungsdatensatz: Landsat MSS, Kanal 7, Leibnitz, entzerrt. Multitemporale Darstellung (a) 23.4.81 (b) 14.6.81 (c) 2.7.81 (d) 30.12.81. Die Entwicklung der Vegetation von April bis Juli ist deutlich sichtbar (helle Flächen).

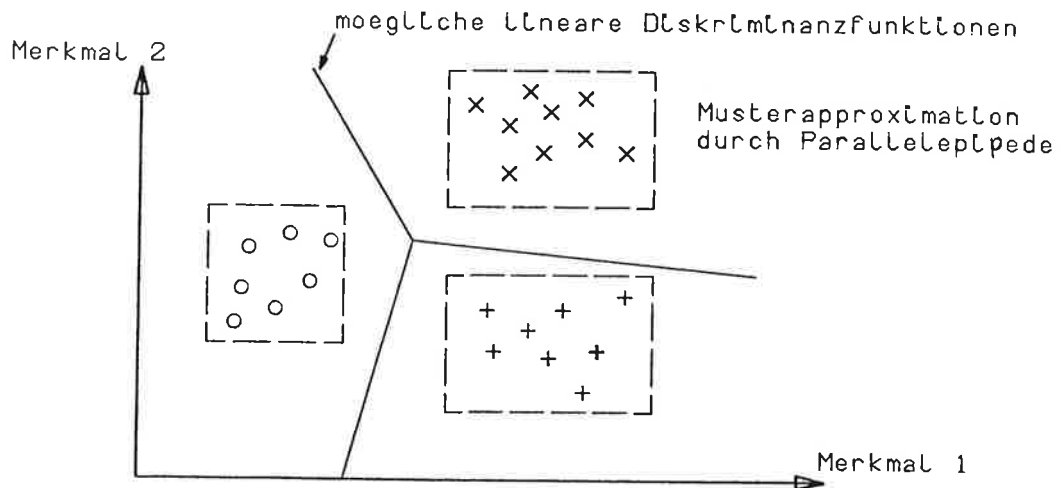


Abbildung 19: Zwei-dimensionaler Merkmalsraum (siehe Text).

in der Tat einer Objektklasse zuzuordnen?

In den Geowissenschaften waren die Arbeitsergebnisse bisher weitgehend nur auf die Nutzung spektraler Information beschränkt; erst in jüngerer Zeit entsteht eine breitere Verwendung von zeitabhängigen Eigenschaften und von Nachbarschaftsoperatoren. Damit werden auch signifikante Verbesserungen der Ergebnisse erreicht (z.B. Dehn, 1981).

Eine bedeutende Beschränkung der Leistungsfähigkeit der Objektklassifizierung liegt in den Daten selbst: die Geowissenschaften können bisher im wesentlichen nur grobauflösende Landsat-Satellitenbilder benutzen. Die auftretenden Spektralsignaturen lassen eine sinnvolle Objekttrennung nicht zu und führen zu Mischeffekten ("Mixel"). Erst durch höherauflösende Daten bevorstehender Satellitensysteme ist mit geeigneter hoher Genauigkeit der Klassifizierung zu rechnen.

4.9 Datenredundanz

Die für die Objektklassifizierung benötigte Datenvielfalt beinhaltet die Möglichkeit der Datenredundanz. Diesem Problem widmet sich der Bereich der Bildkomprimierung. Eines der angewandten Verfahren beruht auf der Hauptkomponententransformation der gegebenen Merkmalsvektoren \underline{x} in neue Vektoren \underline{y}

$$(4.6) \quad \underline{y} = \underline{A} \cdot \underline{x}$$

wobei \underline{A} eine Drehmatrix darstellt. Sind die \underline{x} -Werte korreliert, so können die \underline{y} -Werte unkorreliert gemacht werden, wenn nur \underline{A} geeignet gebildet wird: hierzu ist \underline{A} aus den Eigenvektoren der Kovarianzmatrix \underline{C} der Vektorkomponenten aufzubauen. Eine Diskussion findet sich bei Leberl u.a. (1983).

Aus den Ergebnisbildern mit Merkmalsvektoren \underline{y} ist es nun einfach, die signifikanten Komponenten (mit hoher Varianz) auszuwählen und die Bilder mit geringer Information (geringe Varianz) zu vernachlässigen. Diese sogenannten Hauptkomponentenbilder sind die typischen Ergebnisse der Datenkomprimierung und Redundanzkontrolle.

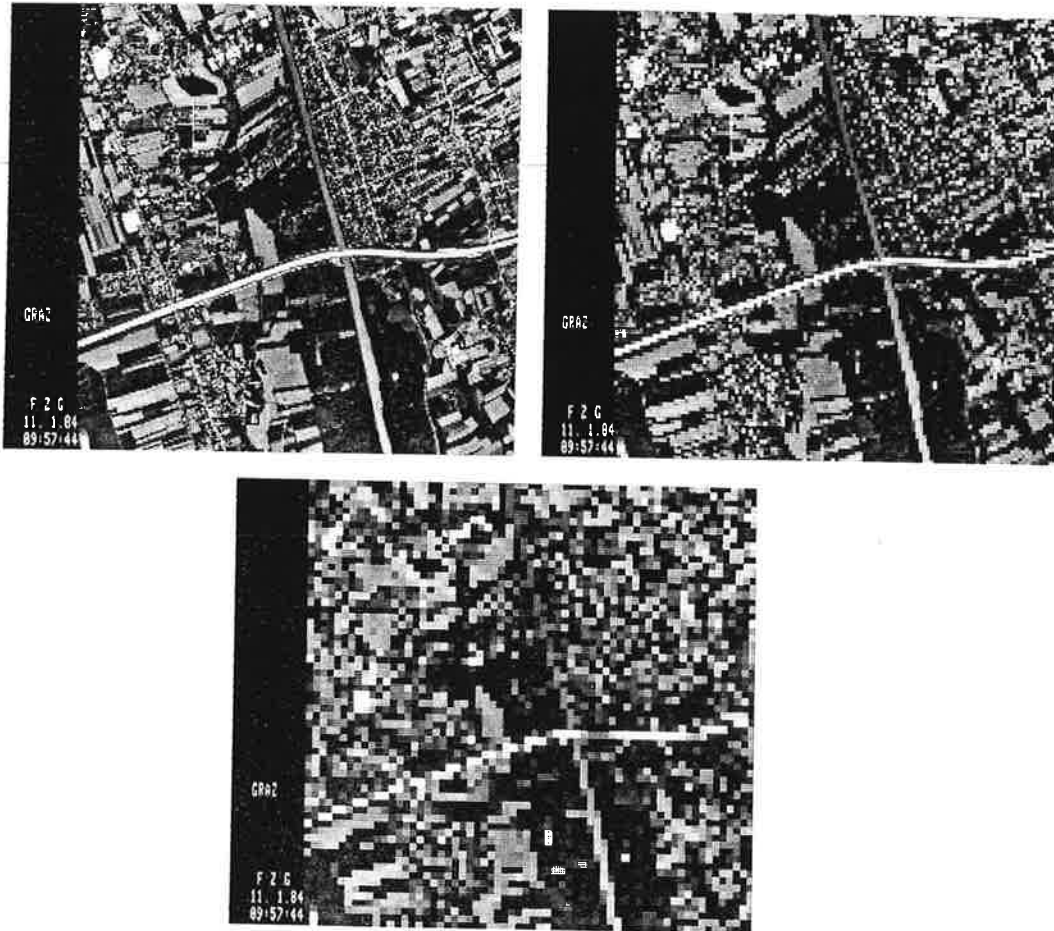


Abbildung 20: Beispiel einer Bildpyramide (Pessl, 1983).
 (a) 256 x 256 (b) 128 x 128 (c) 64 x 64 Pixel
 Es wird jeweils der linke obere von 2 x 2 Bildpunkten in die nächste Pyramidenstufe übernommen.

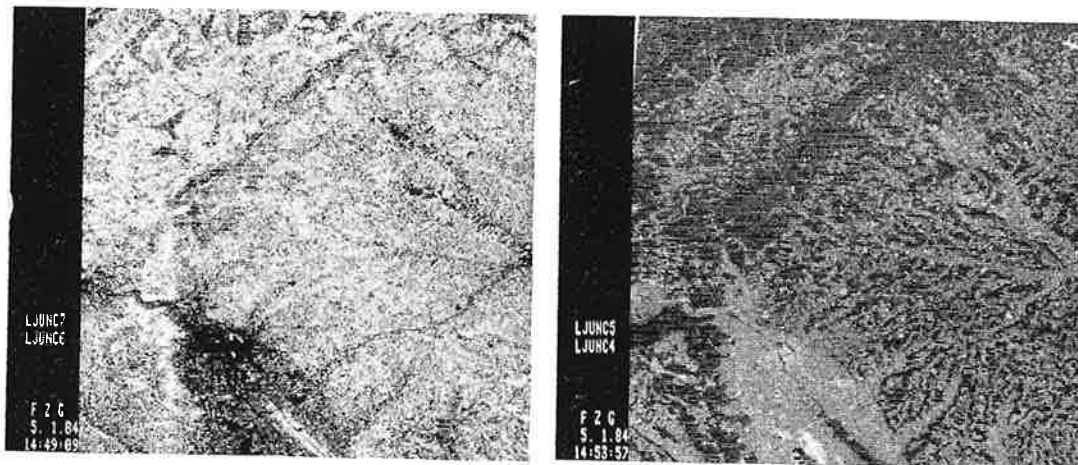


Abbildung 21: Beispiele für Ratiobilder (Landsat MSS, 14.6.81, Graz, vgl. Abb. 19(b)).
 (a) Kanal 7/Kanal 6 (b) Kanal 5/Kanal 4.
 Der Einfluß der Beleuchtung auf die Bildwerte ist deutlich verringert

Im Falle von Rasterbildern graphischer Vorlagen sind die Umwandlung von 8-Bit auf binäre Bilder als auch die Raster-zu-Vektor-Umwandlung Methoden der Datenkomprimierung. Eine weitere Reihe bestehender Komprimierungsverfahren liegt in speziellen Datenstrukturen auch für Einfachbilder : Quad-trees (Samet, 1981), k-d-Bäume, Lauflängenkodierung (Huang, 1972), Chain-Code (Freeman, 1970) usw..

Für spezielle Anwendungen mag es sinnvoll sein, vorgegebene Daten redundant zu organisieren, sodaß Verfahren der Mustererkennung zeitsparend eingesetzt werden können. Ein Beispiel geben die Pyramidenstrukturen in Abb. 20 (Antonisse, 1981; Pessl, 1983), in denen die hierarchische Objektsuche vom gering auflösenden bis zum voll-auflösenden Bild durchgeführt wird.

4.10 Bildverknüpfungen

In den Geowissenschaften hat bisher die Analyse von aus mehrdimensionalen Daten abgeleiteten Bildern eine gewisse Bedeutung erlangt. Hierzu zählen Ratio-, Vektorlängen- und Richtungskosinusbilder. Gerade Ratiobilder sind für visuelle geologische Materialinterpretationen von Wert (Goetz u.a., 1975): Das Ergebnisbild besteht aus Grauwerten, die Verhältniszahlen aus den Grauwerten in den Ursprungsbildern darstellen (Abb.21).

4.11 Bestehendes Wissen und neue Bilder: Bild-Karte-Entsprechung

(a) Karten

In den Geowissenschaften wird bestehendes Wissen in Form von Karten gespeichert. Die Bildanalyse kann dieses Wissen nutzen, wenn es gelingt, Bild und Karte in geeigneter Form einander zu überlagern. Im Sinne von "Expertensystemen" ist das Wissen des erfahrenen Geowissenschaftlers in einer Wissensdatenbank bereitzustellen (McKeown, 1983). Ein erster Schritt ist die Erstellung einer objektorientierten Kartendatenbank, wie dies von Tenenbaum u.a. (1978), Kropatsch und Leberl (1981) und anderen gezeigt wurde.

WALD (Auszug OEK 25V : Blatt 191 , Kirchbach i. Stmk.)

M 1 : 50000

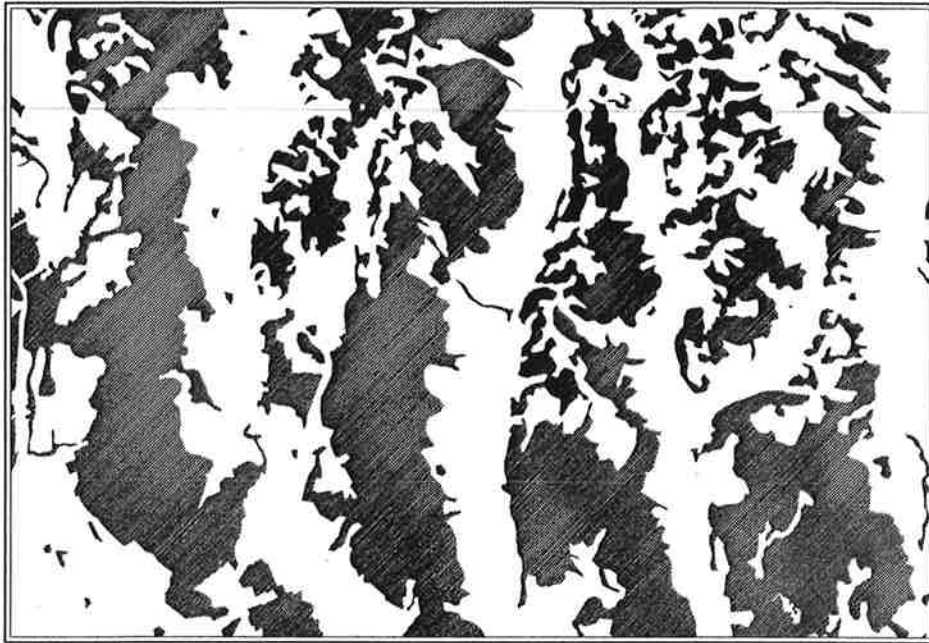


Abbildung 22: Waldbestand im Bezirk Radkersburg, entnommen aus der Karte 1:50 000.

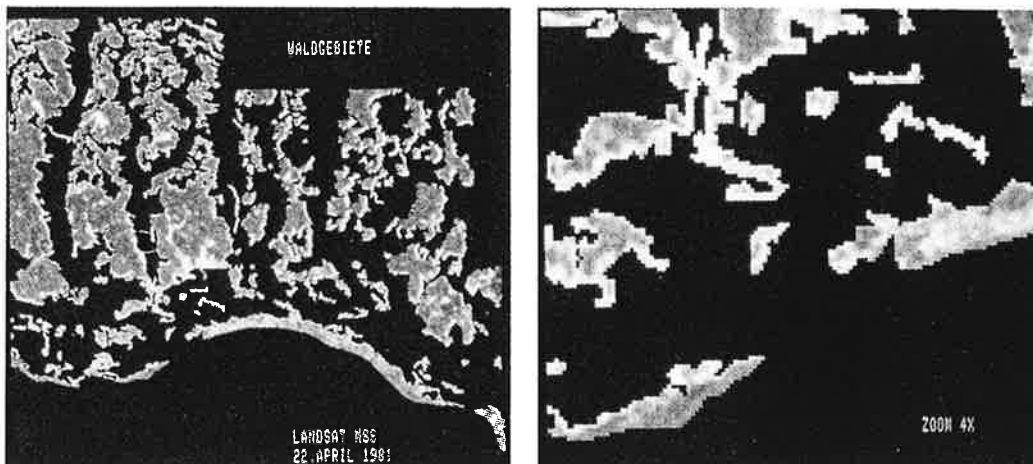


Abbildung 23: Überlagerung des neuen Landsat-Bildes mit der Karteninformation. (a) Gesamtschau; (b) Detail.

(b) Bild-Karte-Überlagerung

Nun besteht die Aufgabe, ein neues Bild in automatischer Weise mit diesen Kartendaten geometrisch zur Deckung zu bringen, sodaß ein Vergleich zwischen Bild und Karte möglich ist.

Die Bild-Karte-Überlagerung ist damit der Ausgangspunkt für die kartengestützte Bildanalyse und die bildgestützte Prüfung des Inhaltes der Kartendatenbank. Beide Aufgabenstellungen werden bisher nur in bescheidenen Ansätzen bearbeitet. Dies liegt vor allem daran, daß digitale Karteninformation kaum in nennenswertem Umfang besteht, daher auch die beschriebene Bild-Karten-Aufgabe derzeit noch keine hohe Dringlichkeit hat. Ohne Zweifel hat die Bild-Karte-Problematik eine bedeutende Rolle für die Zukunft.

(c) Anwendungsbeispiel

Als Beispiel sei auf die Notwendigkeit hingewiesen, den kontinuierlichen Datenfluß aus Satelliten laufend zu verwerten. Zur Lösung des Problems stellt sich die Aufgabe, eine Ausgangssituation so zu schaffen, daß eine vollständige Zustandsbeschreibung eines geowissenschaftlichen Sachverhalts in der digitalen Form eines Geoinformationssystems vorliegt. Abb.22 ist das Beispiel der Kartierung des Waldbestandes im typischen Maßstab 1:50 000.

Neue Bilder werden nun automatisch auf ihre Inhalte geprüft. Solange kein Widerspruch zum Datenbestand feststellbar ist, sind die neuen Daten redundant. Eine nähere Prüfung ist erst erforderlich, wenn signifikante Unterschiede zwischen Bild- und Karteninformation festgestellt werden. In Abb. 23(a) wurden Satellitenbild und bekannter Waldbestand überlagert; aus der Vergrößerung in Abb. 23(b) ist ein Widerspruch ersichtlich, der aus einer fehlerhaften Karte, fehlerhafter Bild-Karte-Überlagerung oder aber aus einer Veränderung des tatsächlichen Waldbestandes erklärt werden muß.

(d) Bild und Geländetopographie

Da gerade in Österreich die Erdoberfläche von einer algebraisch beschreibbaren Form abweicht und gebirgig ist, besteht die Aufgabe, Auswirkungen von Hangneigungen, Sonnenstand und topographischen Höhen auf Bilder zu prüfen und zu eliminieren (Justice u.a., 1981). Hierzu ist

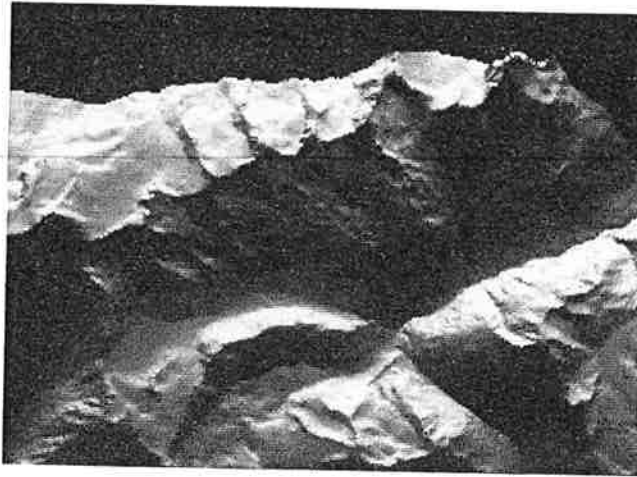


Abbildung 25: Computersimulation des Radarbildes aus Abb.26 mit Hilfe eines DHM (Ötztal, Tirol).

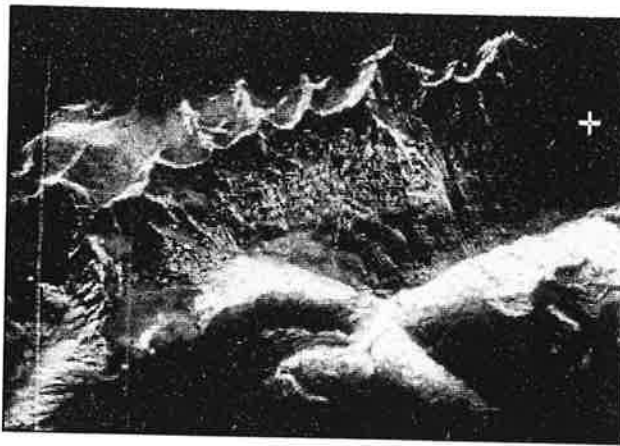


Abbildung 26: Echtes Radarbild (SAR-580) zur Gegenüberstellung mit Abb. 25.

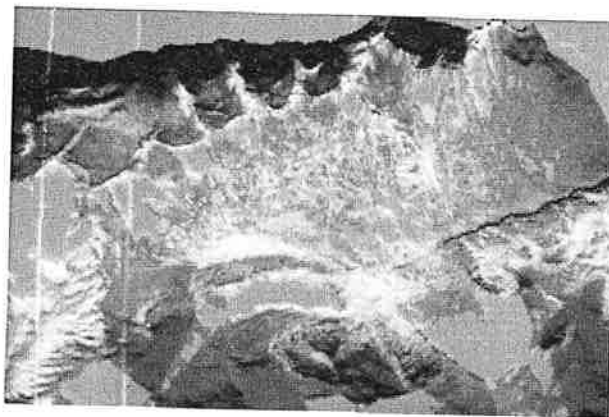


Abbildung 27: Radiometrisch korrigiertes Radarbild durch Differenzenbildung von Abb. 26 und 25. Die Differenz 0 ist als Grauwert 128 dargestellt.

ein sogenanntes digitales Höhenmodell nötig (DHM), wie es in vielen Ländern vom nationalen Territorium besteht oder erstellt wird. In Österreich bestehen Arbeiten von Kraus (1973), Leberl u.a. (im Druck) und anderen. Ein Beispiel eines DHM gibt Abb. 24.

Die Eliminierung der Effekte der Topographie auf das Bild kann durch Bildsimulation anschaulich dargestellt werden. Abb. 25 ist eine Computersimulation eines Radarbildes mittels eines DHM; Abb. 26 zum Vergleich das echte Radarbild. Durch Differenzbildung kann aus dem echten Bild ein radiometrisch korrigiertes erstellt werden (Abb. 27).

Neben der Unterstützung der Bildanalyse besteht auch die Anwendung in der Ergebnisdarstellung. Abb. 28 ist das Produkt einer Bildklassifizierung in 10 Landnutzungsklassen eines Gebietes um Graz unter Verwendung von vorgegebener Bodeninformation. Die Anschaulichkeit der Darstellung kann gewinnen, wenn die Landnutzungsdaten auf einem DHM perspektivisch wiedergegeben werden.

4.12 Spezielle Darstellungsfragen

Die herkömmliche Arbeit mit geowissenschaftlichen Daten beruht auf graphischen Darstellungen in Form von Karten oder Handskizzen. Die Digital-Methoden ermöglichen das interaktive Arbeiten an einem geowissenschaftlichen Computer-Arbeitsplatz. Dies ist bisher gänzlich ungebräuchlich. Nach wie vor zieht es der Geowissenschaftler vor, mit einem Kartenblatt oder Papierbild zu arbeiten, ins Feld zu gehen und händische Annotationen vorzunehmen. Damit stellt sich die Aufgabe, Bilder und Analyseergebnisse in geeigneter Form dem Benutzer zu übergeben.

Neben einer Vielzahl von Fragen des Kontrastes, der Kantenschärfe, der Störfunktionen usw. besteht auch jene der Farbdarstellung. Allgemein beruht diese Frage auf der Arbeit mit Farbton, Farbsättigung und Helligkeit, also einem drei-dimensionalen Koordinatensystem, das nicht kartesisch, sondern zylindrisch definiert wird. Die Darstellungsmedien selbst benötigen meist Rot-Grün-Blau Farbauszüge.

Ein wesentliches Element der Bilddarstellung ist daher die Umsetzung von Bilddatensätzen in Ton-/Sättigung-/Helligkeitskoordinaten und die Transformation in Rot-/Grün-/Blau-Bilder. Eine gute Übersicht hiezu liefert Mulder (1982).

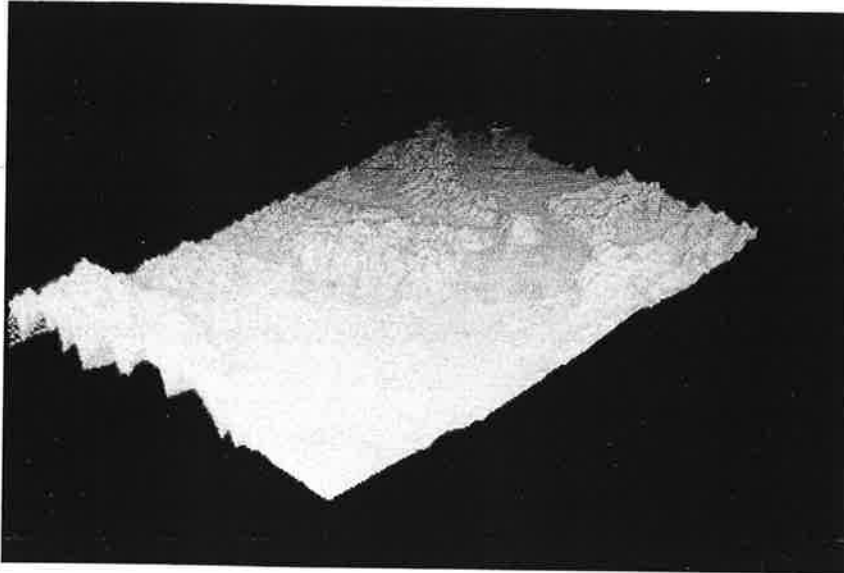


Abbildung 24: Beispiel einer perspektiven, synthetisch beleuchteten Ansicht eines digitalen Höhenmodells aus dem Gebiet des Bezirkes Leibnitz, Steiermark.

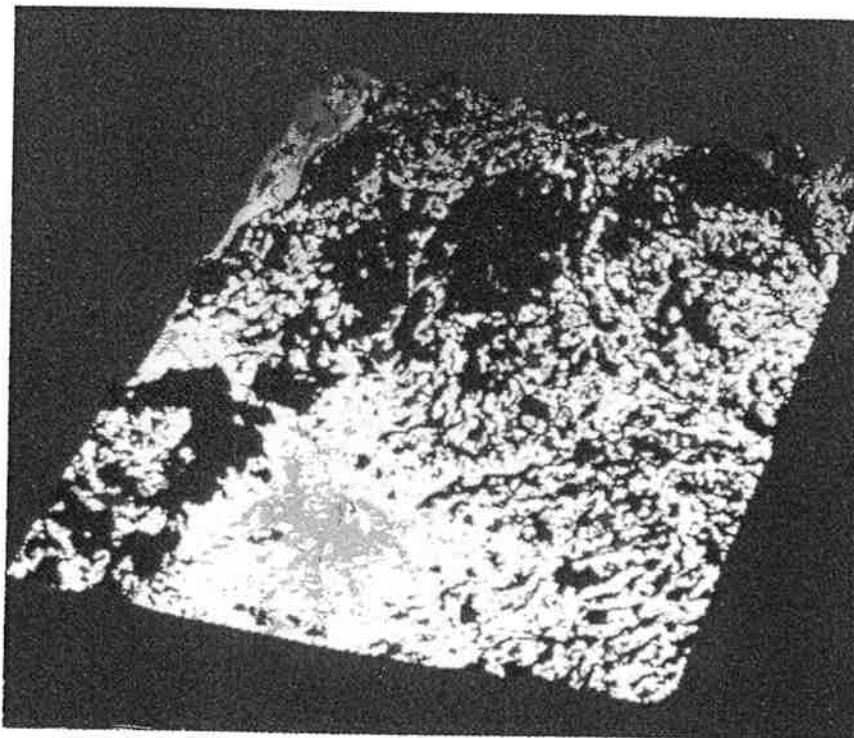


Abbildung 28: Landnutzungsklassifizierung eines Landsat-Bilddaten-Stapels, dargestellt gemeinsam mit dem DHM von Graz (vgl. Abb. 24).

5. AUSBLICK

Bildverarbeitung und Mustererkennung sind heute zu einer gewissen methodischen Reife entwickelt, der die echte Anwendung in verschiedenen Fachgebieten in verschieden großem Ausmaß nachhinkt. In den Geowissenschaften finden Fernerkundung und Verwendung (automatisch) digitalisierter Karten breite Anwendungsgebiete. In beiden Fällen liegt die theoretische Entwicklung von Konzepten um wesentliche Schritte vor der täglichen Praxis der Ausübung.

Somit ist zunächst feststellbar, daß es notwendig sein wird, die Möglichkeiten der Bildverarbeitung und Mustererkennung in geeigneter Anwendungen zu prüfen und zu nutzen. Die Akzeptanz der Technologie ist bisher beschränkt. Würde man einen Akzeptanzzyklus für diese Technologie von etwa 20 Jahren anrechnen, so käme der eigentliche Durchbruch erst in den 90er-Jahren, da der Beginn der geowissenschaftlichen Bildverarbeitung und Mustererkennung in die Periode nach dem Start der ersten Satelliten für digitale Fernerkundungsbilder fällt (Landsat-1, 1972).

Im vorliegenden Bericht wurde wiederholt die Bedeutung der Daten im Gegensatz zu den Analysemethoden betont. Anstöße zur methodischen Weiterentwicklung müssen vom in Aussicht stehenden Datenfluß kommen. Es zeichnet sich ab, daß die temporale Datendichte gegenüber der spektralen Vielfalt überwiegen wird. Damit sind insbesondere die Fragen der temporalen Redundanzprüfung von großem Gewicht.

Selbstverständlich sind nicht alle Bereiche der Mustererkennung und Bildverarbeitung für die Geoinformatik ebenso wesentlich wie für z.B. medizinische Anwendungen. Die derzeit besonders untersuchten Methoden wurden in der Arbeit übersichtsweise illustriert und kommentiert. Von besonderer Bedeutung sind jene Verfahren, die es gestatten, bestehende Daten und gegebenes Expertenwissen in die Bildanalyse einzubringen und damit ein geeignetes Gesamtkonzept zur sinnvollen Nutzung kontinuierlicher Bilddatenströme zu bilden.

Die allgemeine Entwicklung der Bildverarbeitung und Mustererkennung geht von der Software zum System mit besonderer Rechnerarchitektur. Erste Ansätze sind in den für die Laborarbeit benutzten Industriesystemen mit Bildwiederholtspeichern und Pipelineprozessoren

anzutreffen. Diese sind jedoch nur für kleinere Datenmengen im 100 MByte-Bereich gedacht.

Operationelle geowissenschaftliche Bilddatenverarbeitung ist bisher nahezu ausschließlich eine Domäne weniger Stellen, z.B. der U.S. Raumfahrtbehörde NASA oder der europäischen Zentren wie der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt. Technologisch ist es ohne weitere Durchbrüche denkbar, für Massendaten von täglich einigen GByte geeignete Verarbeitungssysteme zur Verfügung zu stellen. Der Bedarf hierfür besteht derzeit jedoch noch nicht. Die geowissenschaftlichen Anwendungen haben nahezu ausschließlich den Charakter von Fall- und Pilotstudien, für welche bisher die vorgefertigten Kleinsysteme ausreichen. Die Entwicklung nationaler digitaler Geodatenbestände und Fernerkundungsdatenströme ist für die auslaufenden 80er-Jahre absehbar; daher sind auch die Arbeiten an Systemlösungen der Bildverarbeitung und Mustererkennung sinnvoll und zeitgemäß.

D a n k

Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit stellt Resultate eines Projektes dar, das vom Österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) unterstützt wurde (Projektnummer 4315). Hierfür sind die Autoren zu herzlichem Dank verpflichtet.

Darüber hinaus gilt der Dank allen Kolleginnen und Kollegen des Institutes, die sich in den Fachgebieten Bildverarbeitung und Geoinformatik um eine übergreifende Zusammenarbeit bemühen.

L i t e r a t u r

- Andrews H. (1972): Introduction to Mathematical Techniques in Pattern Recognition. J. Wiley, New York.
- Anuta P. (1970): Spatial Registration of Multispectral and Multitemporal Digital Imagery Using Fast Fourier Transform Techniques. IEEE Trans on Geoscience Electronics, Vol. GE-8, pp.353-368.
- Antonisse H.J. (1981): Image Segmentation in Pyramids. Techn. Report TR-1045, Computer Science, Univ. of Maryland.
- Avery T.E. (1962): Interpretation of Aerial Photography. Burgess Publ. Co., Minneapolis.
- Bajcsy R., M. Tavakoli (1976): Computer Recognition of Roads from Satellite Pictures. IEEE Trans. Syst. Man Cybern., SMC-6, pp.623-637.
- Ballard D.H., C.M. Brown (1982): Computer Vision. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.Y. (USA).
- Bargel B. (1980): Classification of Remote Sensing Data by Texture and Shape Features in Different Spectral Channels. 5th ICPR, Miami. Zu beziehen von IEEE.
- Barnea D., H. Silverman (1972): A Class of Algorithms for Fast Image Registration. IEEE Trans. Computer, Vol.- C-21, Nr. 2, S.179-186.
- Batchelor B.G. Hrsg. (1978): Pattern Recognition - Ideas in Practice. Plenum Press, New York, 485 Seiten.
- Beer M. (1981): Teilautomatische Aufbereitung von Kartenvorlagen in computergerechte Datenformate. Vortragsreihe bei der Carl-Crantz-Gesellschaft, München-Oberpfaffenhofen, zu beziehen von: SysScan-Unterhaching, Bayern.
- Bois P. (1983): Some Applications of Pattern Recognition to Oil and Gas Exploration. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-21, Nr. 4.
- Brady M., (1982): Computational Approaches to Image Understanding. ACM Computing Surveys, Vol.14, Nr.1.
- Case J. (1982): The Digital Stereo Comparator/Compiler DSCC. Proceedings, Comm.II Symposium der Int. Ges. f. Photogrammetrie u. Fernerkundung. Canadian Inst. of Surveying, Box 5378, Station F. Ottawa. S.23-29.
- Dehn M. (1981): Multispektrale Texturanalyse. Bildmessung und Luftbildwesen. Bd.49, S.101-110.
- Ducher G. (1980): The SPOT-Mission. The Photogrammetric Record. Vol.38, S.27-45.
- Duda R.O., P.E. Hart (1973): Pattern Classification and Scene Analysis. J. Wiley, New York.
- Eichhorn G., Hrsg. (1979): Landinformationssysteme. Sammelband zum Symposium der Federation Internationale des Geometres, 16-21 Oktober 1978 an der TH Darmstadt. Schriftenreihe Wissenschaft und Technik.
- Faux I.D., M.J. Pratt (1979): Computational Geometry for Design and Manufacture. Ellis Horwood, Chichester, England.
- Freeman H. (1970): Boundary Encoding and Processing. In Picture Processing and Psychopictories, B.S. Lipkin and A. Rosenfeld, Academic Press, New York.
- Fu K.S. (1982): Syntactic Pattern Recognition and Applications. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

- Gelsema E.S., L.N. Kanal (1980): Pattern Recognition in Practice. Proceedings, 21.-23. Mai 1980. North-Holland Publishing Co., Amsterdam, 552 Seiten.
- Glenn W.V. u.a. (1975): Image Generation and Display Techniques for CT Scan Data. Investigative Radiology. S. 403-416.
- Gonzalez R.C., P. Wintz (1977): Digital Image Processing. Addison-Wesley, London.
- Goetz A.F.H. u.a. (1975): Application of ERTS Images and Image Processing to Regional Geological Problems and Geological Mapping in Northern Arizona. Technical Report 32-1597, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Kalifornien.
- Groch W.D. (1982): Automatisierung bei der Digitalisierung großmaßstäblicher Karten. ~~Wiederholungen aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe I, Band 89, Institut für Angew. Geodäsie, Frankfurt a.M., S.41-48.~~
- Haralick R., K. Shanmugam, I. Dinstein (1973): Textural Features for Image Classification. IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-3, S.610-621.
- Helava U., W. Chapelle (1972): Epi-Polar Scan Correlation. Bendix Technical Journal, Spring 1972.
- Hoffer R.M. (1967): Interpretation of Remote Multispectral Imagery of Agricultural Crops. Research Bull. Nr. 1, Laboratory for Agricultural Remote Sensing, Purdue Univ., W. Lafayette, Indiana.
- Hofmann O. (1982): Digitale Aufnahmetechnik. Bildmessung und Luftbildwesen. Bd.50, S.16-32.
- Huang T.S. (1972): Run-Length Coding and its Extensions in Picture Bandwidth Compression, T.S. Huang u. O.J. Tretiak, Hrsg., Gordon and Breach, New York.
- Image Understanding Workshops (seit etwa 1977): Sammelbände der jährlichen IU-Tagungen, Defense Advanced Research Projects Agency, Washington, USA.
- Justice C., S.W. Wharton, B.N. Holben (1981): Application of Digital Terrain Data to Quantify and Reduce the Topographic Effect on Landsat Data. Int. J. of Remote Sensing. Vol. 2, Nr.3.
- Kazmierczak H., Hrsg. (1980): Erfassung und maschinelle Verarbeitung von Bilddaten. Springer-Verlag. Wien-New York. 399 Seiten.
- Kazmierczak H., Hrsg. (1983): Mustererkennung 1983. Tagungsband. VDE-Fachberichte 35, VDE-Verlag GmbH., Bismarckstr. 33, D-1000 Berlin 12, 409 Seiten.
- Kraus K. (1973): Ein allgemeines digitales Geländemodell. Numerische Photogrammetrie, Sammlung Wichmann-Verlag, Neue Folge, Band 5, S 225 - 253.
- Kropatsch W., F. Leberl (1980): Die Erkennung von Kanten und Linien in digitalen Bildern. Mittlg. d. geod. Inst. der TU Graz, Band 33, S.107-132.
- Kropatsch W., F. Leberl (1981): Organisation kartographischer Daten zur kenntnisgestützten Bildanalyse. Informatik Fachberichte, Band 49, Hrsg. B. Radig, Springer, S 167 - 173.
- Leberl F., J. Raggam, H. Ranzinger (1983): Zur Nutzung multispektraler Satellitendaten. Ost. Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, Jg.71, Nr.1, S.22-39.
- Leberl F., S. Glänzer, M. Beer (im Druck): Herstellung sehr dichter Höhenraster aus digitalisierten Schichtenlinien. Zeitschrift für Vermessungswesen.

- Lichtner W. (1981): Anwendungsmöglichkeiten der Rasterdatenverarbeitung in der Kartographie. Wiss. Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Univ. Hannover, Band 105.
- McKeown D., J.L. Denlinger (1982): Graphical Tools for Interactive Image Interpretation. Computer Graphics, Vol.16, Nr.3, pp.189-198.
- McKeown D. (im Druck): Towards Automated Photo-Interpretation. Photogrammetria.
- Marimont D.H. (1982): Segmentation in ACRONYM. Proceedings, Image Understanding Workshop at Stanford Univ., Defense Advanced Research Projects Agency, Washington (USA).
- Meisel W.S. (1972): Computer Oriented Approaches to Pattern Recognition. Academic Press, New York.
- Moik J. (1980): Digital Processing of Remotely Sensed Images. NASA Special Report SP-431, Washington (USA).
- Montoto L. (1977): Digital Detection of Linear Features in Satellite Imagery. Proceedings, Image Processing, Graz, 3.-5. Oktober, Mittl. der geod. Inst. der TU Graz, Folge 29, S.151-158.
- Moyer D. D. (1978): Land Information Systems. An Annotated Bibliography. Zu beziehen von MOLDS, c/o American Congress of Surveying and Mapping, 210 Little Falls Street, Falls Church, VA 22046. USA, 195 Seiten.
- Mulder N. (1982): Methodology of Color Coding MSS and other Data. Proceedings, Comm. III Symposium, Intl. Ges. für Photogrammetrie und Fernerkundung, Techn. Univ. Helsinki.
- Nathan R. (1966): Digital Video Data Handling Report. Technical Report 32.877, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Kalifornien.
- Newman W.M., R.F. Sproull (1973): Principles of Interactive Computer Graphics. McGraw-Hill, New York.
- Niemann H. (1983): Klassifikation von Mustern. Springer Verlag.
- Optronics (undatiert): Optronics Journal - Kundenneuigkeiten, Produktinformation, Chelmsford, Massachusetts.
- Pavlidis T. (1978): Structured Pattern Recognition. Springer Verlag, New York.
- Pessl P. (1983): Kenntnisgestützte Liniensuche in digitalen Bildern. Diplomarbeit an der T.U. Graz, zugleich DIBAG-Bericht Nr. 7, Forschungszentrum Graz.
- Pratt W. (1978): Digital Image Processing. Wiley - Interscience, New York.
- Reboh R. (1981): Knowledge Engineering Techniques and Tools in the Prospector Environment. Technical Note 243, Stanford Research Institute, Menlo Park, Kalifornien, 149 Seiten.
- Rosenfeld A. (1969): Picture Processing by Computer. Academic Press, New York. 196 Seiten.
- Rosenfeld A. (1970): Connectivity in Digital Pictures. J. of the ACM, Vol.17, Nr.1, S.146-160.
- Samet H. (1981): An Algorithm for Converting Rasters to Quadrees. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. PAMI-3, Nr. 1.
- Tennenbaum M., M. Fischler, H. Wolf (1978): A Scene Analysis Approach to Remote Sensing. Technical Note 173, Artificial Intelligence Center, Stanford Research Institute, Menlo Park, Kalifornien.
- Woetzel G. (1978): Extraktion von Linienmustern aus Binärbildern. Gesellschaft für Math. und Datenverarbeitung, Band 44, St. Augustin.