

Automatische Klassifikation durch Textur- und Formmerkmale in Multispektraldaten für die Fernerkundung

B. Bargel

FIM, Breslauer Straße 48, 7500 Karlsruhe

1.0 Einleitung

Für die Fernerkundung liefern die Sensoren analoge bzw. digitalisierte Bilddaten aus dem sichtbaren, infraroten und thermischen Spektralbereich bzw. aus dem Bereich der Mikrowellen. Der Wunsch nach einer möglichst umfassenden effektiven Auswertung dieser Daten erfordert den Einsatz von teil- oder vollautomatischen Datenverarbeitungsverfahren. Ziel derartiger software- oder hardwaremäßig realisierter Verfahren ist, neben der geometrischen und radiometrischen Korrektur der Fernerkundungsdaten, die automatische Gebietsermittlung und die Klassifikation von Bildbereichen. Hierzu ist der Einsatz von Verfahren erforderlich, die aus der als Intensitätswerte (Grauwerte) vorliegenden Spektralinformation objekttypische, für einen Klassifikator geeignete Merkmale gewinnen. Hierzu wurden bisher hauptsächlich Verfahren der bildpunktbezogenen Multispektralanalyse angewendet. Für die meisten geowissenschaftlichen Aufgabenstellungen (z.B. in Forstwirtschaft, Siedlungswesen) ist es jedoch notwendig, flächenbezogene Verfahren einzubeziehen. Es ist daher das Ziel der hier erläuterten Arbeiten /1/, verschiedene Verfahren der Textur- und Formanalyse anhand multispektralen Datenmaterials zu bewerten.

2.0 Textur- und Formmerkmale

Die bei der Texturanalyse gewonnenen Merkmale basieren auf statistischen Beschreibungen bestimmter lokaler Zusammenhänge zwischen den Grauwerten einzelner Bildpunkte in einem Spektralbereich. Diese statistischen Berechnungen werden innerhalb begrenzter Bildausschnitte (Rasterelemente) durchgeführt, deren Bildpunkte durch die gewonnenen Merkmale einheitlich beschrieben werden (Rastervergrößerung im Klassifikationsergebnis). Die einzelnen Rasterelemente können systematisch in Form eines Netzes (quadratische Raster mit oder ohne Überlappung) den gesamten Bildbereich überdecken oder objektbezogen (nach einer Vorsegmentierung) größere Bildbereiche beliebiger Form erfassen.

Zur statistischen Auswertung können die Grauwerte des betrachteten Spektralbereichs direkt herangezogen (Verlaufslängen-Statistik, Grauwert Abhängigkeit-Statistik) oder einer Vorverarbeitung unterzogen werden (Fourieranalyse, Gradienten-Statistik, Linienanalyse).

Verlaufslängen-Statistik

Bei der Verlaufslängenstatistik wird das auszuwertende Rasterelement durch Linienscharen unter verschiedenen Richtungen überdeckt, wobei die einzelnen Linien der gleichen Schar zu ihren Nachbarn konstante Abstände besitzen. Verschiedene Texturen werden durch unterschiedliche Periodizität und Verlaufslängen von Grauwertplateaus und Grauwertübergängen längs der einzelnen Linien beschrieben (Abb. 1) /3/. Teilt man den gesamten Grau-

wertbereich in einzelne Abschnitte ein, so lassen sich die Grauwertschwankungen längs der Linienscharen statistisch durch die Häufigkeiten erfassen, mit denen Grauwertplateaus bestimmter Länge in bestimmte Grauwertabschnitte fallen /4/. Durch Auswertung dieser Häufigkeitsverteilungen können weitere Texturmerkmale /5/ definiert werden.

Probleme, welche die Effektivität dieser Merkmale aus der Verlaufslängen-Statistik stark beeinträchtigen, liegen vor allem in der Bestimmung der für alle Klassen geeigneten Schwellenwerte und Abschnittseinteilungen.

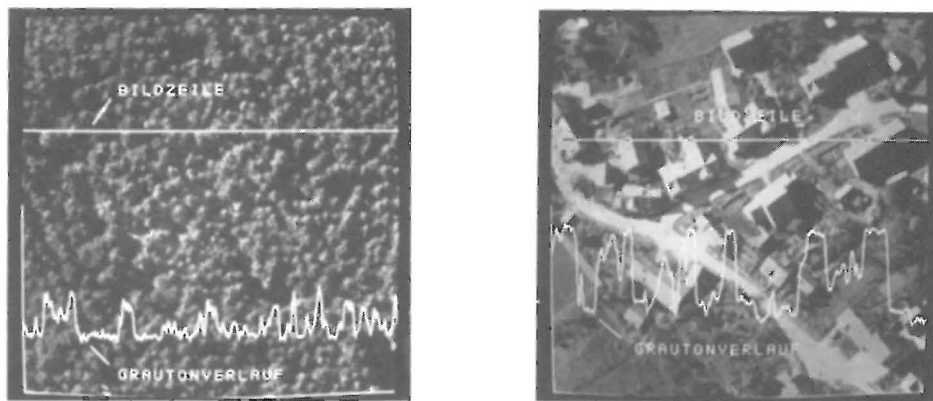


Abb. 1 Grauwertverlauf längs einer Linie (hier Bildzeile) für die unterschiedlichen Texturen eines Wald- und eines Siedlungsgebietes

Grauwert-Abhängigkeits-Statistik

Bei der Grauwert-Abhängigkeits-Statistik werden Texturen in Rasterelementen durch die relativen Häufigkeiten beschrieben, mit denen bestimmte lokale Grauwertkombinationen auftreten. Für Auswertungen größerer Datenserien empfiehlt sich die Bewertung von bilateralen Grauwertabhängigkeiten /6/, da die gleichzeitige Betrachtung mehrerer Bildpunkte aufgrund der vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten ihrer Grauwerte zu unrealistisch hohem Bedarf an Rechenzeit und Speicherplatz führt.

Bei der bilateralen Grauwert-Abhängigkeits-Statistik werden die Häufigkeiten $h(i,j)$ erfaßt, mit denen die Grauwertkombinationen i und j bei allen möglichen Punktepaaren innerhalb des Rasterelementes auftreten. Die möglichen Punktepaare sind hierbei durch geometrische Beziehungen festgelegt, ausgedrückt durch den Abstand zwischen den Punkten eines Paares und die Richtung der verbindenden Geraden (Abb. 2). Die Definition der Texturmerkmale bezieht sich auf rein mathematisch statistische Auswertungen der Grauwert-Abhängigkeits-Matrizen.

Die Merkmale aus der Grauwert-Abhängigkeits-Statistik zeigen eine wesentlich bessere Eignung zur Klassifikation unterschiedlicher Texturen als die Merkmale aus der Grauwertverlaufs-Statistik. Insbesondere ist die relative Stabilität einzelner Merkmale hinsichtlich einer Verringerung der Rasterelementgröße hervorzuheben, die es erlaubt, als Rasterelemente Bereiche von 16×16 Bildpunkten (in Sonderfällen bis 8×8 Bildpunkte) festzulegen.

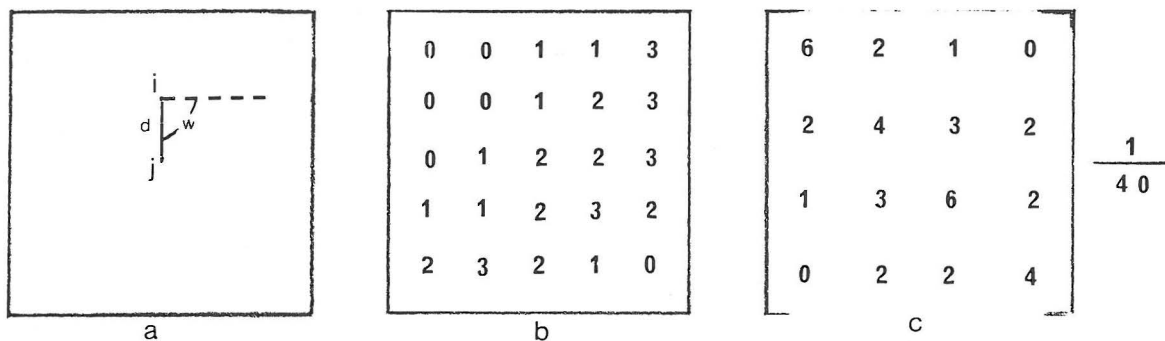


Abb. 2 Verfahren der bilateralen Grauwert-Abhängigkeits-Statistik.
a) geometrische Zuordnung der Punktepaare, b) Bildausschnitt mit Grauwerten (0-3), c) Abhängigkeitsmatrix ($d=1$, $w=90^\circ$)

Für einen seriellen Rechner mit begrenzter Arbeitsspeicherkapazität ist die Ermittlung der Abhängigkeitsmatrix sehr aufwendig. Bei Merkmalen, die eine lineare Verknüpfung der Häufigkeiten $h(i, j)$ enthalten, kann der Beitrag des einzelnen Punktepaars sofort ermittelt werden und die Zwischenberechnung der Abhängigkeitsmatrix entfallen. Bei einer alleinigen Auswertung der Grauwert-Abhängigkeit zeigt sich jedoch ein Klassifikationsverlust, wenn die nicht direkt bestimmbareren Merkmale weggelassen werden.

Fourieranalyse

Bei der Fourieranalyse wird ausgenutzt, daß die Fouriertransformation - wie alle Integraltransformationen - Struktureigenschaften in Bildbereichen lageunabhängig bestimmen und Häufigkeiten von Grauwertübergängen erfassen kann. Eine Auswertung des Leistungsspektrums einer zweidimensionalen Fouriertransformation (Abb. 3) durch Mittelwertbildung der Koeffizienten innerhalb einzelner Kreisringe und Sektoren bzw. deren Schnitte (Kreisring-Sektor-Elemente) erlaubt damit Trennungen zwischen gröberen und feineren Texturen sowie Aussagen über die Ausrichtung der Textur in dem Raster-element.

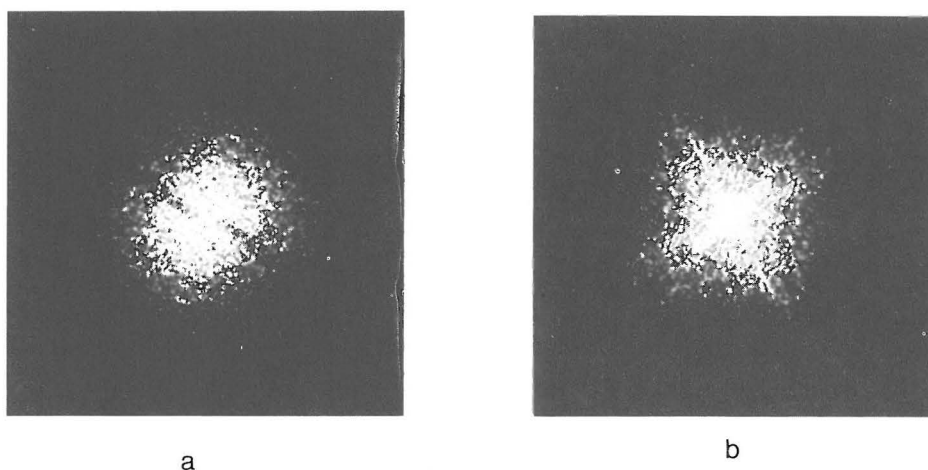
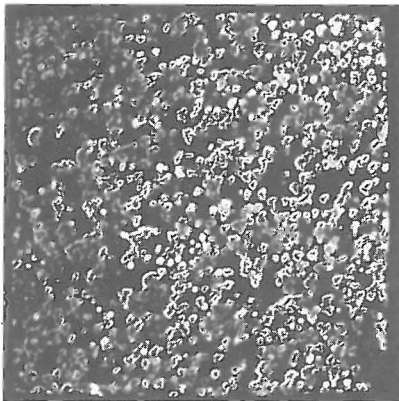


Abb. 3 Darstellung der Fourierspektren für a) das Waldgebiet, b) das Siedlungsgebiet nach Abb. 1

Bei einer Reduzierung der Rasterelement-Größe (z.B. auf $32 * 32$ Bildpunkte), sowie die Berücksichtigung ähnlicher Texturen in zu unterscheidenden Klassen verlieren die durch eine Fourieranalyse gewonnenen Texturmerkmale deutlich an Aussagekraft. Die Fourieranalyse erweist sich daher als geeignetes Mittel zur Bewertung von Rasterelementen im Rahmen einer Grobklassifizierung (z.B. Trennung von Wald- und Siedlungsgebieten), bei der für die Klassen relativ großflächige Rasterelemente verwendet werden können.

Gradienten-Statistik

Gegenüber der Fourieranalyse ist bei der Gradienten-Statistik der Aufwand für die Bildvorverarbeitung wesentlich geringer. Hier werden Verfahren eingesetzt, die anhand der Grauwertinformation seiner lokalen Umgebung jedem Bildpunkt einen Gradienten zuordnen (z.B. nach einem Verfahren der Phasendiskriminierung /7/, Abb. 4). Merkmale aus der Gradienteninformation können hinsichtlich der Beträge der Gradienten und der Richtungsinformation definiert werden. Bei der Betragsanalyse wird im allgemeinen eine Bewertung des Mittelwertes und der Zentralmomente höherer Ordnung der Häufigkeitsverteilungen durchgeführt (Mittelwert, Varianz und Schiefe in den Betragshistogrammen). Bei der Richtungsanalyse erfolgt eine Auswertung nach Vorzugsrichtungen und gleichzeitigem Auftreten bestimmter Richtungskombinationen.



a



b

Abb. 4 Darstellung der Gradientenbeträge nach einer Differenzierung der Grauwertdaten für a) das Waldgebiet, b) das Siedlungsgebiet nach Abb. 1

Die Bewertung der Merkmale aus der Gradienten-Statistik zeigt, daß für die Klassifikation von Fernerkundungsdaten die Betragsanalyse bessere Ergebnisse liefert als die Richtungsanalyse. Die Kombination der Betrags- und Richtungsanalyse verbessert die Klassifikationsrate. Dennoch liegen diese Ergebnisse unter denen, die mit Merkmalen aus der bilateralen Grauwert-Abhängigkeits-Statistik erreichbar sind. Außerdem muß die Gradienten-Statistik im allgemeinen für etwas größere Rasterelemente durchgeführt werden.

Linienanalyse

Da bei der Gradienten-Statistik nur lokale Grauwertverhältnisse bewertet werden, sind die daraus gewonnenen Merkmale für eine Beschreibung globaler Strukturen weniger geeignet. Die globalen Zusammenhänge lassen sich z.B. durch Konturverfolgungsalgorithmen erfassen, die - im allgemeinen auf der Gradienteninformation aufbauend - für den gesamten Bildbereich Linienlisten erstellen. Als Merkmale zur Bewertung einzelner Rasterelemente können beispielsweise die Anzahl und Form der das Raster schneidenden Linien herangezogen werden /8/.

Entsprechend der globalen Eigenschaften der Merkmale aus einer Linienstatistik sind diese zur Klassifikation kleinerer Rasterelemente nicht geeignet. Insbesondere die höheren Merkmale, die beispielsweise die Geradenapproximation und den Parallelitätsgrad von Linien bewerten, setzen neben größeren Auswertebereichen auch noch voraus, daß in den Bilddaten charakteristische längere Strukturen in statistisch erfaßbarer Anzahl auftreten und durch die Vorverarbeitungsschritte erfaßt werden, was jedoch aufgrund der Unvollkommenheiten der bekannten Konturverfolgungsalgorithmen nicht vorausgesetzt werden kann.

Formanalyse

Bei Bilddaten für den Bereich des Siedlungswesens sind Grauwertübergänge nicht unbedingt charakteristisch und damit die Texturmerkmale zur Klassifikation verschiedener Siedlungstypen weniger geeignet. Typisch dagegen sind bestimmte Einzelobjekte, die sich in den Bilddaten durch ein einheitliches Grauwertniveau repräsentieren und von ihrer Form her bestimmte Charakteristika aufweisen (Abb. 5). Derartige Einzelobjekte können somit zur Klassifikation von Bildbereichen herangezogen werden.

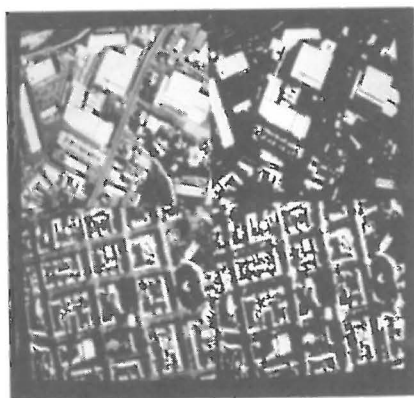


Abb. 5 Grauwertdaten von Bildbereichen und Wiedergabe der Einzelobjekte nach einer Bildbinarisierung für Industrieanlagen und Wohnblockbebauung

Zur Ermittlung der Einzelobjektflächen werden alternativ drei Binarisierungsverfahren eingesetzt, die mit festen, lokaladaptiven oder formadaptiven Schwellenwerten arbeiten. Die nach die Binarisierung ermittelten Teilobjekte werden durch die Flächengröße, den Umfang, den maximalen und minimalen Trägheitsradius sowie durch Kombinationen aus diesen Merkmalen beschrieben. Die Trägheitsradien berechnen sich hierbei aus den Hauptträg-

heitsmomenten der Einzelobjektflächen. Für Fernerkundungsdaten entsprechend Abb. 5 und Bildbereichen mit unterschiedlichen Siedlungsklassen konnten mittels der Merkmale aus der Formanalyse die Einzelobjekte mit guter Sicherheit in acht verschiedene Klassen eingeteilt werden, die nicht identisch mit den Siedlungsklassen sind. Erst durch logische Entscheidungen über die Präsenz von Einzelobjekten bestimmter Klassen kann auf den Siedlungstyp des Bildbereichs geschlossen werden.

3.0 Rastervorklassifikation

Zur Klassifikation von Bildbereichen durch Merkmale, die eine Bewertung der lokalen Grauwertverhältnisse (z.B. Merkmale aus der Grauwert-Abhängigkeits-Statistik) durchführen, wird der Bildbereich in Rasterelemente unterteilt, die hinsichtlich ihrer Textur als Einheit bewertet werden (Abb. 6).

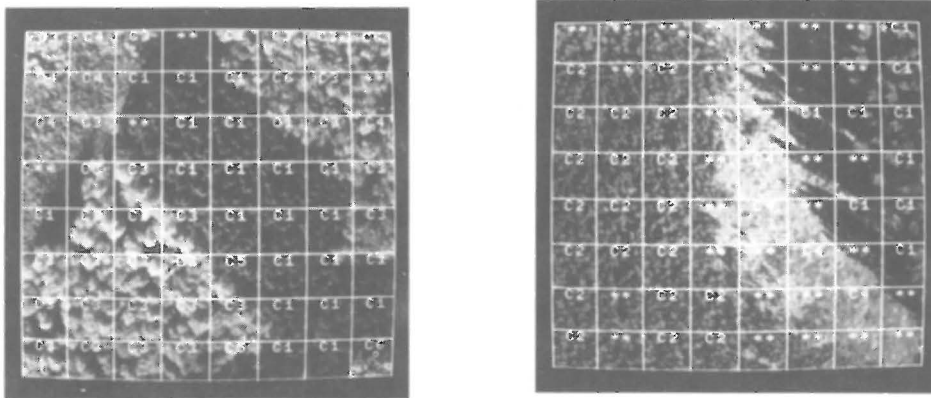


Abb. 6 Nachbarschaftsunabhängige Klassenzuweisung einzelner Rasterelemente für Nadelwald (alt = C1, jung = C2) und Laubwald (alt = C3, jung = C4) bzw. Mischklassen (alt = C5, jung = C6) und Rückweisung (**)

Hierbei erfolgt die Klassenzuweisung C_i mittels eines überwachten Klassifikators für das einzelne Rasterelement unabhängig von globaleren Zusammenhängen innerhalb des Bildbereichs, so besitzt beispielsweise die Texturinformation benachbarter Rasterelemente oder die Häufigkeitsverteilung bisheriger Klassenzuweisungen auf die Klassenentscheidung für das einzelne Rasterelement keinen Einfluß. Das bedeutet, daß in Übergangsbereichen von Klassen mit unterschiedlichen Texturen Mischklassen bewertet werden und auch innerhalb von Gebieten mit einheitlichen Texturen einzelne Rasterelemente aufgrund lokaler Abweichungen falsch klassifiziert bzw. zurückgewiesen werden.

Der Klassifikator führt in der Klassifikationsphase die Bewertung der einzelnen Rasterelemente anhand der für sie ermittelten Merkmale durch. Die Zahlenwerte der Merkmale werden hierbei durch klassentypische Gewichtungen zu einer Entscheidungsfunktion für die einzelnen Klassen verknüpft (Berechnung von Klassenwahrscheinlichkeiten). Die klassentypischen Gewichtungsvektoren werden innerhalb der Trainingsphase bestimmt. Hierzu wird für die

Stichproben, die für jede Klasse zur Verfügung stehen, eine lineare Regressionsanalyse /9/ durchgeführt. Den als Stichproben interaktiv ausgewählten Rasterelementen kommt somit hinsichtlich der später erzielbaren Klassifikationsergebnisse eine entscheidende Bedeutung zu. Falsche oder atypische Stichproben können beim Training des Klassifikators zur Berechnung ungenauer Gewichtsvektoren führen. Bei der Auswahl der Rasterelemente ist darauf zu achten, daß die Klasseneigenschaften durch die Stichproben möglichst eindeutig repräsentiert werden. Beispielsweise ist beim Training eines Klassifikators für Forstbestände zu beachten, daß durch die Stichproben unterschiedliche Aufnahmebedingungen, Baumgrößen, Bestandsdichten usw. anteilmäßig möglichst gleichhäufig erfaßt werden (Abb. 7).

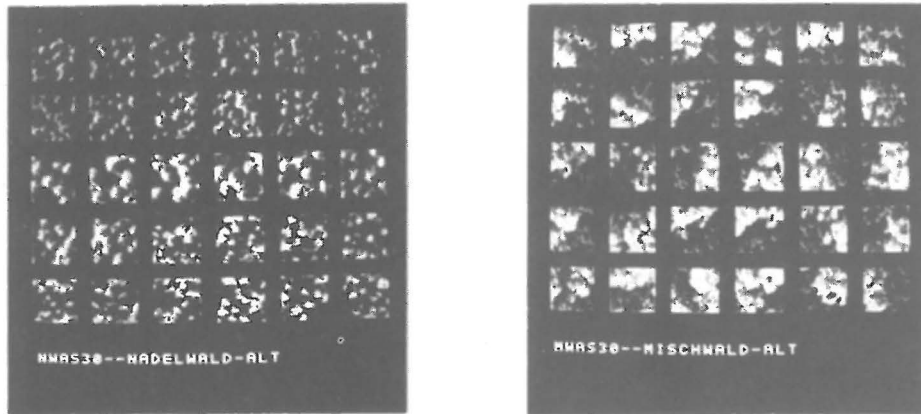


Abb. 7 Interaktiv ausgewählte Stichproben für zwei Objektklassen (Nadelwald alt, Nadel-Laub-Mischwald alt) aus der Forstwirtschaft

Bei der Berücksichtigung von Nadel-Laubwald-Mischbeständen kommt zu den altersmäßig und vom Schlußgrad herrührenden Unterschieden noch das Mischungsverhältnis zwischen den Baumtypen, das von nahezu reinem Nadelwald bis zu reinem Laubwaldbestand variieren kann. Um innerhalb der Stichproben die Klassenzuordnung zu optimieren, werden die bei rekursiv angewandten Eigenklassifikationsläufen fehlklassifizierten oder zurückgewiesenen Stichproben visuell bewertet. Atypische Stichproben werden eliminiert, während eindeutig der Klasse zugehörnde aber bisher zurückgewiesene Stichproben durch Rasterelemente mit ähnlicher Textur ergänzt werden.

4.0 Gebietsklassifikation

Die anhand der Texturmerkmale vorklassifizierten Rasterelemente können die Basis für die Klassifikation größerer zusammenhängender Gebiete bilden. Einfache Verfahren hierzu liefern Bildgättungsmethoden, die aufgrund der Zusammenhänge und Klassifikationsergebnisse benachbarter Rasterelemente die Klassifikationsentscheidung für das Einzelelement überprüfen und modifizieren. Diese Modifikation ist jedoch sehr stark abhängig von der jeweiligen geowissenschaftlichen Fragestellung. Sie ist beispielsweise für eine Erfassung von Einzelphänomenen in der Regel nicht geeignet. Abb. 8 zeigt das Ergebnis einer Glättungsoperation, bei der folgende Kriterien berücksichtigt wurden:

das Klassifikationsergebnis eines Rasterelementes kann modifiziert werden, wenn es neben der größten Wahrscheinlichkeit für eine Klassenzugehörigkeit auch gewisse Wahrscheinlichkeiten für andere Klassen besitzt (hohe Reststreuung) und diese Wahrscheinlichkeitsverteilung nicht im Widerspruch zu der mittleren Wahrscheinlichkeitsverteilung der unmittelbaren Nachbarschaft steht

die Rückweisung eines Rasterelementes kann aufgehoben werden, wenn die Überschreitung der Rückweisungsschwellen (keine zu große Reststreuung) nicht zu extrem ist und es in der Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Klassen mit der mittleren Wahrscheinlichkeitsverteilung seiner Nachbarschaft in Einklang zu bringen ist

das Klassifikationsergebnis bzw. die Rückweisung kann modifiziert werden, falls das Rasterelement isoliert ist, d.h. keine weiteren (vorgebar 1 bis 4) Elemente der unmittelbaren Nachbarschaft die gleichen Klassifikationsergebnisse aufweisen

die als modifizierbar vorgemerkten Rasterelemente erhalten die mittlere Wahrscheinlichkeitsverteilung der unmittelbaren Nachbarschaft, falls für diese ein einheitliches Klassifikationsergebnis besteht

die Wahrscheinlichkeitsverteilung der vorgemerkten Rasterelemente wird, falls in der unmittelbaren Nachbarschaft Klassen bevorzugt auftreten, klassenweise mit den Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Rasterelemente der bevorzugten Klassen verglichen und das vorgemerkte Rasterelement der Klasse zugewiesen, für die sich die geringste Abweichung ergibt.

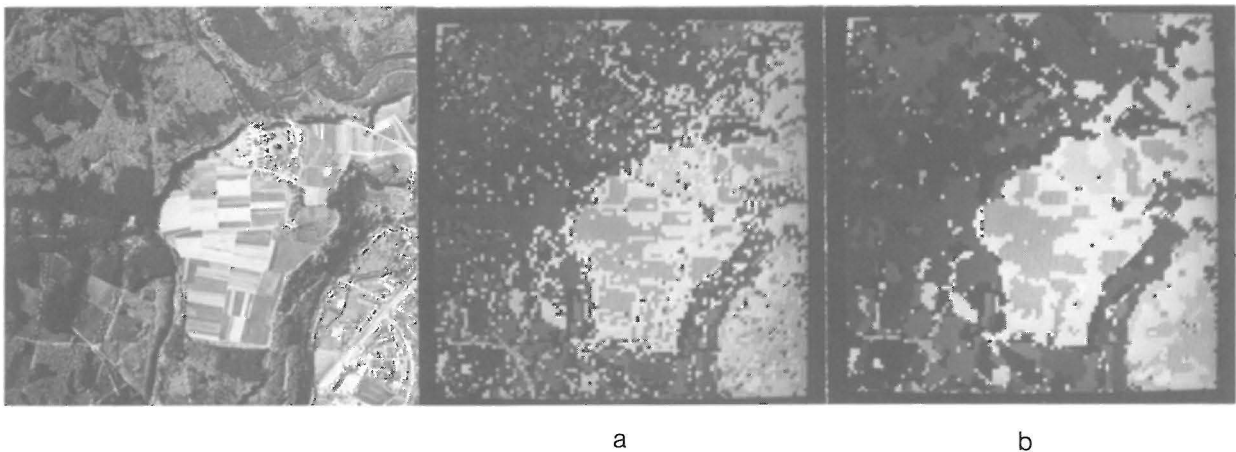


Abb. 8 Ausgangsdaten und Klassifikationsergebnisse a) nach der Raster-
vorklassifikation, b) nach der Bildglättung

Als weitere Methode der Gebietsklassifikation bietet sich die schrittweise Verknüpfung von Rasterelementen an. Diese Verknüpfung führt zu Grobrastern, deren Texturmerkmale erneut berechnet und mit denen der Ausgangsraster verglichen werden. Der Vergleich kann hierbei über die Bewertung von Mahanalobis-Abständen /10/ oder Klassifikationsergebnissen nach der Regressionsanalyse durchgeführt werden, wird keine Übereinstimmung festgestellt, so bleibt in dem entsprechenden Bildbereich die feinere Rasterung erhalten, während in den verbleibenden Bereichen nach dem gleichen Verfahren eine weitere Vergrößerung versucht wird.

Weitere Möglichkeiten für eine Gebietsklassifikation liefern die Berücksichtigung von bedingten Klassenwahrscheinlichkeiten wie z.B. für Mischwald an den Grenzen unterschiedlicher Bestandsklassen oder Laubwald innerhalb von Siedlungsgebieten (Grünanlagen) sowie hierarchische Klassifikationen unter Verwendung der im Folgenden skizzierten Verfahrenskombinationen.

5.0 Verfahrenskombinationen

Die gleichzeitige Berücksichtigung von Spektral- und Texturinformation kann auf zwei Wegen erfolgen. Einmal läßt sich durch eine Multispektralanalyse eine grobe Vorsegmentierung in einzelnen Bildbereichen durchführen, wobei zwischen Bereichen unterschieden wird:

in denen eine eindeutige Zuordnung der Bildpunkte eines größeren Gebietes zur gleichen im allgemeinen unbekanntem Klasse besteht

in denen mehrere kleinere Teilobjekte auftreten, die zu verschiedenen Spektralklassen gehören, in sich aber homogen sind

in denen keine einheitliche Bewertung mehrerer benachbarter Bildpunkte möglich ist.

Die über die Multispektralanalyse ermittelten Bereiche können anschließend durch Texturmerkmale bewertet werden. Die Ergebnisse der Texturanalyse dienen hierbei zur Bestimmung der Klassenzugehörigkeit der Bereiche, sie können aber auch zu einer Neueinteilung der anhand der Multispektralanalyse durchgeführten Vorsegmentierung führen.

Der zweite Weg einer gleichzeitigen Berücksichtigung der Spektral- und Texturinformation bildet die getrennte Anwendung der Rastervorklassifikation durch Texturmerkmale auf die Bilddaten aus unterschiedlichen Spektralbereichen. Die Bewertung der MSS-Daten aus dem FMP /2/ ergab beispielsweise, daß Klassifikationsergebnisse durch Verknüpfungen der Texturaussagen einzelner Spektralbereiche verbessert werden können. Hierbei zeigte es sich, daß von den elf Spektralbereichen die Bewertung des thermischen, eines infraroten und eines sichtbaren Spektralbereichs genügt, da zwischen den Kanälen innerhalb des sichtbaren bzw. innerhalb des infraroten Spektralbereichs kaum Änderungen der Texturmerkmale auftreten.

Durch Einbeziehung von mehr- oder einkanalig durchgeführten Konturverfolgungsalgorithmen kann ebenfalls eine Vorsegmentierung in einzelne Bildbereiche erfolgen. Geeigneter erscheinen jedoch Segmentierungsverfahren über die Detektion bestimmter Objekte (z.B. Extraktion von Straßen und Flußläufen /11/ bzw. über ein Flächenwachstum /12/. Für die Klassifikation der abgegrenzten Bildsegmente läßt sich eine kombinierte oder alternative Bewertung von Spektral-, Textur- und Formmerkmalen durchführen. Auch hier ist eine Rückkopplung zur Verbesserung der Ergebnisse der Vorsegmentierung möglich.

6.0 Literatur

- /1/ B. Bargel: Rechnergestützte Ermittlung und Bewertung von Texturparametern für die Objektklassifizierung in der Fernerkundung. Abschlußbericht DFG Ka 414/3, 1980.
- /2/ J. Albertz, M. Schroeder: Berichte zum Symposium Flugzeugmeßprogramm. BMFT-FBW 78-04, 1978.
- /3/ A. Masumy: Analyse von Texturparametern in Luftbildern und Scanneraufzeichnungen verschiedener Maßstäbe zur Identifizierung von Waldtypen. Dissertation, Universität Freiburg, 1978.
- /4/ M.M. Galloway: Texture Classification Using Grey Level Runs Length. Computer Graphics and Image Processing, Vol. 4, 1975.
- /5/ H. Kazmierczak: Erfassung und maschinelle Verarbeitung von Bilddaten (Grundlagen und Anwendungen), Springer-Verlag, 1980.
- /6/ R.M. Haralick, K. Shanmugam, I. Dinstein: Textural Features for Image Classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics SMC-3, No. 6, 1973.
- /7/ R. Schärf: Erzeugung linienhafter Bildmuster aus Grautonbildern mit Hilfe der Kontrastgradienten. BMVg-FBWT 73-10, 1973.
- /8/ B. Bargel: Maschinelle Extraktion objektbeschreibender Texturmerkmale für die Luftbildinterpretation. DFG Sachbeihilfe Ka 414/1, FIM/FGAN Bericht Nr. 48, 1977.
- /9/ G. Meyer-Brötz, J. Schürmann: Methoden der automatischen Zeichenerkennung. Akademie Verlag Berlin, 1970.
- /10/ H.H. Bock: Automatische Klassifikation. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1974.
- /11/ U. Bausch, W.-D. Groch, W. Kestner, M. Sties: Teilautomatische Objektextraktion aus Luftbildern und Landkarten. Naka Verm Sonderheft, 1980.
- /12/ R. Schärf: Untersuchungen zur mehrkanaligen Bildverarbeitung und Objektseparierung. Informatik Fachbericht Band 8, Springer-Verlag, 1977.