

## FERNERKUNDUNG UND LANDSCHAFTSMAßE – UNTERSUCHUNGEN ZUR RAUMSTRUKTURELLEN ANALYSE URBANER REGIONEN\*)

Mit 8 Abbildungen und 1 Tabelle

MARTIN HEROLD und GUNTER MENZ

*Summary:* Remote Sensing and Landscape Metrics – Investigations of spatial structural analysis of urban regions

The analysis and monitoring of land use for decision support in planning and management of urban regions is a major application of remote sensing technology. The ability to derive land use data with high geometric and thematic accuracy is generally limited by the availability of adequate remote sensing data and digital image analysis techniques. This study introduces a new approach to using image data spatial structure information (in the form of landscape metrics) derived from digitally classified remote sensing data to describe structures and changes in urban land use. The results show a useful separation between urban and non-urban land cover categories as well as between three inner urban land use types: commercial development, high-density residential and low-density residential. Several important structural land cover features were identified for this study. These were: the dominant general land cover (built-up or vegetation), the housing density, the mean structure and plot size, as well as the spatial aggregation of the built-up areas. Furthermore it is shown that changes in urban environment (urban growth), or as the case may be their effects on the spatial land use structure, can be described and characterized using the landscape metric information. In order to produce more accurate discriminations between the three land cover types of interest, the landscape metrics were further refined into what are termed "Landscape Metric Signatures" (LMS) for the land use categories.

*Zusammenfassung:* Die Analyse und Überwachung der urbanen Landnutzung als Entscheidungshilfe für die Planung und zum Management von Stadtregionen, ist eine immer bedeutsamere Anwendung der Fernerkundung. Die Möglichkeit geometrisch hochaufgelöste und thematisch präzise Landnutzungsdaten zu erhalten, wird maßgeblich von der Verfügbarkeit geeigneter Fernerkundungsdaten und digitaler Bildanalysemethoden bestimmt. Diese Studie stellt einen neuen methodischen Ansatz zur Nutzung der räumlichen Bildstrukturinformationen in Luft- und Satellitenbildern vor. Mit sogenannten Landschaftsmaßen werden dabei Strukturen und Veränderungen in der urbanen Landnutzung beschrieben. Die Ergebnisse zeigen eine gute Trennung sowohl zwischen urbanen und nicht-urbanen Landbedeckungsklassen als auch innerhalb dreier urbaner Klassen: gewerblich genutzte Flächen, dicht und locker bebaute Wohngebiete. Als besonders wichtige strukturelle Landbedeckungsmerkmale werden identifiziert: die dominante Landbedeckung (Bebauung oder Vegetation), die Bebauungsdichte, die Parzellengröße sowie die räumliche Aggregation der bebauten Gebiete. Des weiteren wird gezeigt, dass Änderungen in Stadtregionen (urbanes Wachstum), beziehungsweise ihre Auswirkungen auf die räumliche Landnutzungsstruktur mittels Landschaftsmaße beschrieben und charakterisiert werden kann.

Um eine detailliertere Untersuchung der innerurbanen Landnutzungsstrukturen durchzuführen, werden die sogenannten "Landscape-Metric" Signaturen (LMS) für die Landnutzungskategorien eingeführt.

### 1 Fernerkundung urbaner Räume

In den entwickelten Ländern der Erde leben gegenwärtig 70% der Bevölkerung in urbanen Regionen, die Zentren politischer, ökonomischer und kultureller Entwicklung sind (HENDERSON a. XIA 1997). Derzeitige Trends wie anhaltendes Bevölkerungswachstum, Migrationsbewegungen in städtische Regionen und wachsende ökologische Probleme erfordern zunehmend den Einfluss von Stadtplanern, Ökonomen, Umweltwissenschaftlern und Ressourcenmanagern für eine nachhaltige Entwicklung dieser sich schnell verändernden Gebiete. Notwendige Entscheidungen und Eingriffe bedürfen eines umfangreichen Wissens über die Ursachen, den Verlauf und die Auswirkungen der genannten Prozesse (BARNEKOV a. RICH 1995; XIA a. HENDERSON 1997). Die Fernerkundung bietet die

Möglichkeit, flächenhafte Informationen auf verschiedenen räumlichen Skalen mit einer hohen zeitlichen Frequenz aufzuzeichnen. Neben der Erkennung von Siedlungen mittels Fernerkundung haben sich folgende Anwendungsbereiche entwickelt:

– Stadtklimatische Untersuchungen mittels thermaler- und Mikrowellenfernerkundung (KIM 1992; QUATTROCHI a. RIDD 1994; NICHOL 1996; BASLY et al. 1997; ABBATE 1997; PARLOW 1998);

– Erarbeitung von 3-D Stadtmodellen mittels photogrammetrischer Auswertungen (FÖRSTNER 1999; KIM a. MULLER 1996; SINNING-MEISTER et al. 1996; ZAVOIANU a. NITU 1998);

\*) Die Autoren widmen den Aufsatz dem allzu früh verstorbenen Professor JACK ESTES (Department of Geography, University of California at Santa Barbara).

– Monitoring von urbaner Landnutzung und urbanem Wachstum aus optischen Satellitendaten und Luftbildern (COLWELL 1985; MEAILLE a. WALD 1990; GALEMA a. GALEMA 1991; CHANGDA et al. 1994);

– Kartierung urbaner Infrastruktur aus optischen Satellitendaten und Luftbildern (WANG 1992; JENSEN et al. 1994);

– Einsatz von Fernerkundungsdaten in der lokalen und regionalen Planung (EHLERS et al. 1990; MEINEL et al. 1998; LAUSCH 2000);

– Ableitung von Bevölkerungszahlen (IMHOFF et al. 1997; HENDERSON a. XIA 1997; JENSON a. COWEN 1999).

Das Problem bei der Fernerkundung urbaner Regionen liegt in den räumlich heterogenen Oberflächenbedeckungen bestehend aus anthropogenen Strukturen (z. B. Gebäuden, Transportwegen), verschiedenen Vegetationstypen (z. B. Parks, Gärten, landwirtschaftliche Nutzflächen), vegetationsfreien Gebieten und Wasserflächen (BARNESLEY et al. 1993). Kennzeichnend für sie sind ihre Größe, Form, Dichte und ihre räumliche Anordnung, die auch als "urban morphology" (MESEV et al. 1995, 759) bezeichnet wird. Dieses "... complex spatial assemblage of disparate sets of land cover types ..." (BARNESLEY et al. 1993, 149) stellt besondere Ansprüche an die räumliche Auflösung der Fernerkundungssensoren und an die Auswertalgorithmen.

Die thematische Genauigkeit bei der Erfassung urbaner Landnutzung hängt von der Anwendung ab, die sich in der Regel auf eine räumliche Skala bezieht. Globale und regionale Studien beschränken sich oft auf eine Trennung in bebaute und nicht bebaute Gebiete. Dies entspricht im Land Use/Cover Klassifikationsschema des USGS nach ANDERSON et al. (1976) dem Level I. Das Level II unterscheidet bereits sieben Landnutzungskategorien für bebaute Gebiete (JENSEN et al. 1983, 1597): residential, commercial and services, industrial, transportation, communications and utilities, industrial and commercial complexes, mixed urban or built-up land and other urban or built-up land. Diese Trennung ist vor allem für lokale und regionale Studien von Bedeutung.

Um die räumlich heterogen angeordneten urbanen Landnutzungen zu trennen, reichen die Informationen aus den Fernerkundungsdaten und die "per pixel"-Klassifikatoren (z. B. Maximum Likelihood) in der Regel nicht aus, d. h. bebaute Gebiete können verschiedene Nutzungen haben ("residential", "commercial"), die sich aus der multispektralen Reflexion nicht ableiten lassen (BARNESLEY et al. 1993). Deshalb wurden verschiedene Verfahren angewendet, um neben der "per pixel"-Klassifikation noch zusätzliche Informatio-

nen zu verwenden und so die Beschreibung urbaner Landnutzung und deren Strukturen zu verbessern. GONG a. HOWARTH (1990), FOSTER (1993) und STEINNOCHER (1996) versuchten mittels räumlichen Struktur- und Texturinformationen die Klassifikationsgenauigkeit zu erhöhen. Weiterhin wurden digitale Zusatzinformationen wie Bevölkerungsdaten (SADLER et al. 1991; MESEV 1998) oder "residential-density"-Daten (SADLER et al. 1991) sowie Verfahren spektraler Entmischung (RIDD 1995) verwendet. Die Ergebnisse zeigen in den meisten Fällen nur eine geringe Verbesserung der Klassifikation (SADLER et al. 1991). Es besteht demnach ein Bedarf an neuen Methoden, um zusätzliche Informationen aus räumlich verteilten Daten urbaner Gebiete abzuleiten.

Bezüglich des letztgenannten weisen BATTY a. XIE (1996) auf die Fernerkundung als wichtige und bisher wenig angewandte Methode hin. In einer ersten Studie verwendeten MESEV et al. (1995) SPOT- und Landsat-TM-Daten und untersuchten verschiedene urbane Nutzungen und deren Veränderung mit fraktalen Methoden (MANDELBROT 1983). Mit Hilfe der fraktalen Dimension konnten die Bereiche verschiedener urbaner Morphologien unterschieden und raumzeitliche Veränderungen erfasst werden (BATTY a. LONGLEY 1994; BATTY a. XIE 1996).

Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich diese Studie mit der Nutzung von Landschaftsmaßen zur Beschreibung räumlicher Strukturen von verschiedenen Landschaftstypen bzw. von urbanen Landnutzungskategorien. Die Untersuchungen sollen das Potential dieser Methode zur detaillierten quantitativen Erfassung von urbanen Raumstrukturen als notwendige Informationsgrundlage für zahlreiche lokale und regionale Anwendung aufzeigen. Es erfolgt zunächst eine Einleitung und methodische Aufarbeitung der Problematik (Kapitel 2 und 3). Anhand von Fallbeispielen aus Kalifornien wird der Ansatz näher erläutert und die Ergebnisse diskutiert (Kapitel 4) und abschließend auf den zukünftigen Forschungsbedarf verwiesen (Kapitel 5).

## 2 Quantifizierung von Raumstrukturen und -mustern mit Landschaftsmaßen

In Anlehnung an O'NEILL et al. (1988), GUSTAFSON a. PARKER (1992) und MCGARICAL a. MARKS (1994) können Raumstrukturen und -muster mittels Landschaftsmaßen quantifiziert werden. Sinngemäß geben diese Autoren folgende Definition: „Landschaftsmaße sind quantitative Indizes zur Beschreibung von räumlichen Strukturen und Mustern einer Landschaft.“

Eine Landschaft beschreibt einen diskreten dreidimensionalen Ausschnitt der Erdoberfläche, der aus einem Mosaik von Landschaftselementen oder Patches besteht, die jeweils interagierenden (Öko-)Systemen zuzuordnen sind (MCGARICAL a. MARKS 1994). Patches mit gleichen Eigenschaften, Funktionen und Beziehungen werden bei der thematischen Abbildung von Landschaften zu Klassen zusammengefasst, deren räumliche Anordnung bestimmte Strukturen und Muster aufweist. Die Verwendung von zwei Begriffen in der Definition (Strukturen und Muster) ergibt sich zum einen aus dem Begriff "Landscape Pattern", der z. T. in der englischsprachigen Literatur verwendet wird (z. B. O'NEILL et al. 1988; TURNER et al. 1989; GUSTAFSON a. PARKER 1992), zum anderen benutzen MCGARICAL a. MARKS (1994) auch die Begriffe "Landscape Structures" und "Landscape Configuration" als Eigenschaften einer Landschaft, die mit Hilfe der Landschaftsmaße beschrieben werden können. In der oben genannten Definition beziehen sich räumliche Strukturen auf Größe, Form, räumliche Anordnungen und Beziehungen der Patches und Klassen einer Landschaft. Muster beschreiben komplexere räumliche Strukturen wie z. B. Fragmentierung der Landschaft oder andere Größen, die aus der Kombination mehrerer Struktureigenschaften abgeleitet werden.

Die Entwicklung von Landschaftsmaßen basierte auf den Ansätzen zu "information theoretic measures" (O'NEILL et al. 1988, 154) und der fraktalen Geometrie bzw. deren Anwendung zur Beschreibung von natürlichen und geographischen Phänomenen in ihrer räumlichen Form und Anordnung (vgl. SHANNON a. WEAVER 1964; MANDELROT 1983; GOODCHILD a. MARK 1987; DE COLA a. LAM 1993; XIA a. CLARKE 1997). Auf dieser Grundlage entwickelten O'NEILL et al. (1988) erstmals Indizes zur Beschreibung von Landschaftsmustern, die in den folgenden Jahren vor allem in der angewandten Landschaftsökologie erweitert wurden (vgl. GUSTAFSON a. PARKER 1992; LI a. REYNOLDS 1993; HUNSAKER et al. 1994; FROHN 1995). Die wichtigsten Anwendungen beziehen sich auf

- die Erfassung von Landschaftsmustern und Habitatfragmentierung (GARDNER et al. 1993; KEITT et al. 1997; LAUSCH 2000),
- das Beschreiben von Veränderungen der Landschaft (DUNN et al. 1991; FROHN et al. 1996) und
- die Untersuchung von Landschaftsstrukturen auf verschiedenen räumlichen Skalen (TURNER et al. 1989; QI a. WU 1996; O'NEILL et al. 1996).

Zur Berechnung der Landschaftsmaße in dieser Studie kamen zwei Programme zur Anwendung. Das Programm "FRAGSTATS (Version 2.0)" ist ein Public Domain Programm und wurde ursprünglich für land-

schaftsökologische Fragestellungen entwickelt (MCGARICAL a. MARKS 1994). Das Programm "METRICS (Version 1.0)" entstand im Rahmen eines Forschungsprojektes der Universitäten Bonn, Jena und Santa Barbara (RAMI 1997; GASPER 1997; MENZ 1998). Beide Programme berechnen verschiedene Maße, die auf den gleichen theoretischen und algorithmischen Grundlagen beruhen (Tab. 1).

Die meisten der Landschaftsmaße gehen auf die Arbeiten von O'NEILL et al. (1988) zurück. Ein wichtiges Maß ist die fraktale Dimension (FD, SHC), die aus dem Verhältnis von Umfang zu Fläche berechnet wird und die räumliche Komplexität und Fragmentierung von Patches beschreibt. Rechteckige und quadratische Patches haben niedrige Werte in ihrer fraktalen Dimension, während geometrisch unregelmäßige, stark fragmentierte Patches hohe Werte aufweisen (FROHN 1995; MENZ 1998). Aus dem Programm FRAGSTATS wurde die fraktale Dimension als flächengewichtete mittlere fraktale Dimension aller Patches einer Klasse in der Landschaft verwendet. Damit sollten, neben der Mittelung der Werte aller Patches einer Klasse, vor allem größere Patches stärkere Berücksichtigung finden. Die fraktale Dimension kleinerer Patches wird eher von der Pixelgröße (triviale quadratische Form) und nicht von den Realwelteigenschaften bestimmt (KRUMMEL 1987; MILNE 1991).

Ein anderes Maß, der "Contagion Index", berechnet sich aus der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Nachbarpixel eines Pixel zur selben Klasse gehört. Daraus lassen sich Aussagen über die Aggregation einer Landschaft ableiten. Große Werte ergeben sich bei Landschaften, die von wenigen großen Patches geprägt sind. Herrschen viele kleine oder sehr fragmentierte Patches vor, ergeben sich niedrige Contagion-Werte (LI a. REYNOLDS 1993; RAMI 1997). Andere, recht einfache Maße geben beispielsweise Auskunft über den prozentualen Flächenanteil der verschiedenen Klassen, der Summe der Kantenlängen oder über die Anzahl und Größe der Patches.

### 3 Probleme bei der kombinierten Anwendung von Fernerkundung und Landschaftsmaßen

Die Grundlage einer raumstrukturellen Analyse mittels Landschaftsmaßen bilden digitale thematische Karten. Die Vorteile der Fernerkundung bei der Ableitung dieser thematischen Layer, z. B. die Fähigkeit flächenhafte Daten in hoher geometrischer Auflösung zur Verfügung zu stellen, sind hinreichend bekannt. Allerdings sind bei ihrer Anwendung einige methodenspezifische Probleme zu beachten.

Tabelle 1: Eigenschaften ausgewählter Landschaftsmaße in den Programmen FRAGSTATS (a) und METRICS (b)

Features of selected landscape metrics calculated with the programs FRAGSTATS (a) and METRICS (b)

## a) Landschaftsmaße in FRAGSTATS (Version 2.0)

Kürzel	Name	Berechnungsschema	Typ	Einheit	Bereich
FRACT	Fraktale Dimension (FD)	$2 * \ln(\text{Patchumfang}) / \ln(\text{Patchfläche})$	Patch	Keine	$1 <= X <= 2$
%LAND	Prozentualer Flächenanteil	Gesamtfläche der Klasse / Gesamtfläche der Landschaft	Klasse	Prozent	0 – 100%
PD	Patchdichte	Anzahl der Patches / Gesamtfläche der Landschaft	Klasse	Keine	$>= 1$ , kein Limit
PSSD	Patchgrößenstandardabweichung	RMS Fehler (Abweichung vom Mittel) der Patchgröße	Klasse	Hektar	$>= 0$ , kein Limit
ED	Kantendichte	Summen der Kantenlängen / Gesamtfläche der Landschaft	Klasse	Meter pro Hektar	$>= 0$ , kein Limit
AWMPFD	Flächengewichtete mittlere fraktale Dimension	Summe von (FRACT aller Patches * Patchfläche / Gesamtfläche der Landschaft)	Klasse	Keine	$1 <= X <= 2$
CONTAG	Contagion Index	Summe der Wahrscheinlichkeiten über die Patches aller Klassen, das ein Pixel der Klasse i benachbart zu einem Pixel der Klasse j ist	Landschaft	Prozent	0 – 100%

## b) Landschaftsmaße in METRICS (Version 1.0)

Kürzel	Name	Berechnungsschema	Typ	Einheit	Bereich
SHC	Shape Complexity Index	Steigung der Regressionsgeraden zwischen $\ln(\text{Patchumfang})$ und $\ln(\text{Patchfläche})$	Patch	Keine	$1 <= X <= 2$
PPU	Patches per Unit	Anzahl der Patches pro Flächeneinheit ( $\text{km}^2$ )	Klasse	Keine	$>= 1$ , kein Limit
Edges	Kantendichte	Summen der Kantenlängen	Klasse	Abhängig von Pixelgröße	$>= 0$ , kein Limit

Das erste Problem bezieht sich auf die thematische Genauigkeit der aus den Fernerkundungsdaten abgeleiteten Informationen, d. h. ob die nötigen Patchtypenklassen durch die spektrale Auflösung der Fernerkundungsdaten hinreichend genau zu trennen sind. Dabei bezieht sich thematische Genauigkeit der Patchklassen- definition vor allem auf deren Äquivalenz mit anwendungsspezifischen Raumbezugseinheiten, wie z. B. das Habitat oder das Biotop bei landschaftsökologischen Fragestellungen (BARUTH 1998). Bei zu geringer thematischer Auflösung könnte die Landschaft zu homogen wiedergegeben werden. Ist die Klassendefinition zu detailliert besteht die Gefahr von Fehlklassifikationen, die in zusätzliche kleine Patches resultieren können und somit eine heterogenere Landschaft erzeugen. In dieser Untersuchung war aufgrund der testgebietsbezogenen Auswertung eine relativ grobe Unterscheidung von lediglich 2 thematischen Klassen (z. B. be-

baut/nicht bebaut bei urbanen Räumen) aus den Fernerkundungsdaten nötig.

Ein zweites Problem resultiert aus der Frage der geometrischen Auflösung der Fernerkundungsdaten, die in der Regel der Pixelgröße entspricht und eng mit der Betrachtung von räumlichen Skalen verbunden ist (QUATTROCHI a. GOODCHILD 1997). Sie bestimmt maßgeblich den Grad der Generalisierung, mit der "real world" Patchstrukturen und räumliche Heterogenitäten mit Hilfe des Fernerkundungssensors wiedergegeben werden. Eine geringe räumliche Auflösung führt zum Verlust von Strukturinformation und zur räumlichen Aggregation von Patches. Die Form, die Struktur und letztendlich die Landschaftsmaße der Patches werden dann zunehmend von der Pixelform und -größe und nicht von Realwelteigenschaften bestimmt. Weiterhin können Strukturen, wie z. B. linienhafte Landschaftselemente vollständig verschwinden und eine

Landschaftshomogenität suggerieren, die der realen Zerschneidung der Landschaft nicht entspricht (LAUSCH u. MENZ 1999). HEROLD et al. (2001) wiesen in einer Studie nach, dass die bloße Detektion von Patches in Form weniger Pixel nicht ausreichend ist, um Informationen über deren Raumstrukturen mit Landschaftsmaßen abzuleiten. O'NEILL et al. (1996) schlagen deshalb eine 2–5fach höhere räumliche Auflösung als das kleinste Objekt „von Interesse“ vor. Liegen die benötigten räumlichen Auflösungen nicht vor, lassen sich Verbesserungen durch Integration digitaler Zusatzdaten erzielen (LAUSCH u. MENZ 1999).

Ein drittes Problem tritt bei Fragestellungen auf, in denen das Untersuchungsgebiet in mehrere „Landschaften“ als Entitäten der Landschaftsmaßberechnung unterschieden werden muss. Die räumliche und thematische Definition dieser „Landschaften“ orientiert sich dabei an der Fragestellung. Die Abgrenzung der Entitäten ist ein sensibler Arbeitsschritt für die Landschaftsmaßanalyse und setzt eine detaillierte Kenntnis des Untersuchungsgebietes voraus. Dies gilt beispielsweise bei der Untersuchung von Landnutzungsstrukturen innerhalb urbaner Regionen, wo der gesamte besiedelte Raum erst in verschiedene Stadtbereiche oder Flächen homogener urbaner Landnutzungsstruktur getrennt werden muss, um sie vergleichend untersuchen zu können. Die räumliche Diskretisierung der „Landschaften“ aus Fernerkundungsdaten kann durch Integration digitaler Zusatzdaten (z. B. Stadtgrenzen) oder Digitalisierung der Bereiche aus den Fernerkundungsdaten erfolgen.

#### 4 Fallstudien aus Kalifornien

Die empirischen Analysen wurden anhand von zwei Fallstudien in Kalifornien (USA) durchgeführt. In Fallbeispiel 1 wurde für einen Ausschnitt aus der Sierra Nevada mit dem westlich vorgelagerten San Joaquin Valley die prinzipielle Anwendbarkeit von Landschaftsmaßen für die raumstrukturelle Analyse von verschiedenen vegetationsbedeckten und vegetationsfreien Oberflächen untersucht. Nach dem Prinzip des „Downscaling“ werden im 2. Fallbeispiel Santa Barbara (ca. 158.000 Einwohner zusammen mit Goleta) die Möglichkeiten der quantitativen Beschreibung innerurbaner Strukturen und deren zeitlicher Veränderung aufgezeigt.

Als Datengrundlage wurden analoge und digitale Bilder aus dem optischen Spektralbereich von satelliten- und flugzeuggetragenen Systemen aus der „Map and Image Library (MIL)“ der University of California Santa Barbara (UCSB) verwendet. Als Voraussetzung für die Anwendung der beiden Programmpakete

FRAGSTATS und METRICS mussten die Daten zunächst geometrisch korrigiert und klassifiziert werden. Als Klassifikationsalgorithmus wurde ein unüberwachtes ISODATA-Clusterverfahren durchgeführt. Im Anschluss erfolgte eine Reklassifikation in binäre Bilder, die jeweils den thematischen Bildbereich der Landnutzungskategorie von den übrigen Landoberflächen im Bildausschnitt trennt. In urbanen Gebieten erfolgte z. B. eine Trennung in bebaute und nicht bebaute Gebiete. Ungenauigkeiten bei der Klassifikation ergaben sich bei den Luftbildern (Fallbeispiel 2) aus der Tatsache, dass die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte in unterschiedlichen Jahreszeiten lagen, die aufgrund der Phänologie einen Einfluss auf die Verteilung von Vegetation haben. Andere Schwierigkeiten resultierten aus der spektralen Ähnlichkeit von bebauten Gebieten und „bare soil/rock“-Flächen. Hier wurde besonders bei der Ausweisung der Testgebiete darauf geachtet, dass diese Bereiche so weit wie möglich von der Klassifikation ausgeschlossen wurden.

#### 4.1 Fallbeispiel Sierra Nevada - Raumstruktureller Vergleich verschiedener Landnutzungs-/Landbedeckungskategorien

Das Untersuchungsgebiet zeichnet sich durch extreme Höhendifferenzen zwischen den Tieflagen des Central Valleys (mittlere Höhenlage unter 100 m NN) und dem Gipfel des Mount Whitney (4418 m NN) aus. Daraus ergibt sich eine typische vertikale Vegetationszonierung mit einer vegetationsfreien Gipfelflur (ALP), einem breiten Bergwaldgürtel (FOR) und den typischen Chaparralformationen in der Bergfußzone (CHA). Innerhalb des perfekt ebenen Central Valleys wird die agrarische Nutzung der überwiegend quadratischen Parzellen hauptsächlich durch die Wasserverfügbarkeit bzw. die Bewässerungsmöglichkeiten bestimmt. Im Untersuchungsraum lassen sich drei charakteristische Agrarnutzungssysteme identifizieren:

- kleinparzellierte Strukturen mit überwiegendem Anbau von Zitrusfrüchten im Übergang von der Bergfußzone in die Ebene (AGS),
- mittelgroß parzellierte Strukturen mit Mischkulturen entlang der Siedlungsleitlinien (z. B. Bakersfield – Fresno, AGM) und
- großparzellierte Bewässerungsflächen für die agrarindustrielle Produktion (AGL).

Aufgrund der verschiedenen natürlichen Vegetationsformationen und den differenzierten anthropogenen Nutzungsmustern eignet sich der Raum besonders gut für eine regionale Sensitivitätsstudie im Bezug auf verschiedenen Landschaftsmaße.

In Abbildung 1 ist das Untersuchungsgebiet in einer sogenannten LANDSAT-TM-5 Falschfarbendarstellung

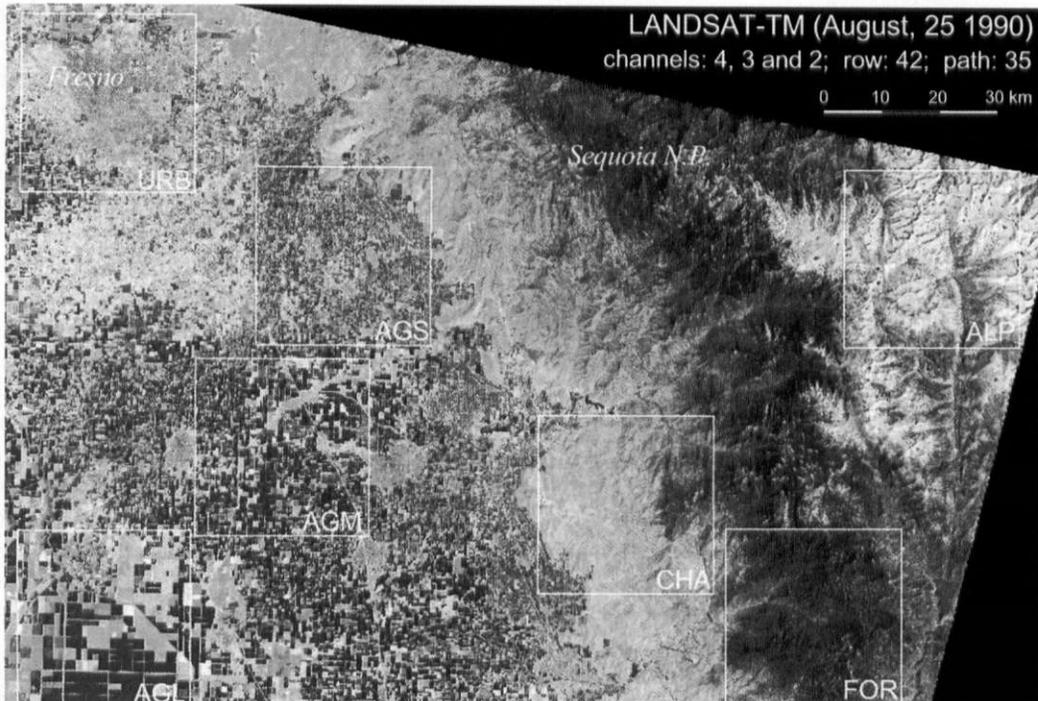


Abb. 1: LANDSAT-TM-Falschfarbenbild (Kanäle 4,3,2) von der Sierra Nevada und dem San Joaquin Valley vom 25. August 1990 – überlagert mit den Quadranten für die 7 Landbedeckungskategorien (URB-urban; AGS-small agriculture; AGM-medium agriculture; AGL-large agriculture; CHA-Chaparral; FOR-mountain forest; ALP-alpine region)

LANDSAT-TM-false colour composite (channels 4,3,2) of the Sierra Nevada and the San Joaquin Valley acquired 25<sup>th</sup> August 1990 – overlaid with the quadrants of the seven land cover categories

mit den Kanälen 4, 3 und 2 vom 25. August 1990 dargestellt. Phänologisch aktive Vegetationsbestände sind in unterschiedlichen Rottönen dargestellt. Im besonderen sind die bis zu 3 km<sup>2</sup> großen Bewässerungsflächen im Südwesten erkennbar. Das Bild wird von 7 Quadranten mit typischen Gebieten für natürliche Vegetationsformationen (ALP, FOR und CHA) sowie für Kulturlächen (AGL, AGM, AGS und URB) überlagert. Die Kantenlänge beträgt jeweils 1000 x 1000 Bildelemente, was einer Grundfläche von 900 km<sup>2</sup> für die anschließende Berechnung der Maße entspricht.

Um die Leistungsfähigkeit der Landschaftsmaße in Bezug auf die Erfassung und Differenzierung der unterschiedlichen Landbedeckungskategorien zu verdeutlichen, werden in Abbildung 2 die Ergebnisse der Berechnungen für den Shape Complexity Index (SHC), den Patches per Unit Area-Index (PPU) und den Number of Edges-Index (EDG) erläutert.

Der Shape Complexity Index (SHC) als ein Maß für die Formkomplexität der Patches, verdeutlicht die „typischen“ Werte für die verschiedenen Landbedeckungs-

bzw. Landnutzungskategorien. Der niedrigste Wert (SHC = 1,15) repräsentiert erwartungsgemäß die „großparzellerte“ Landwirtschaft (AGM), das höchste Maß das Siedlungsgebiet von Fresno (URB) mit SHC = 1,58. Insgesamt decken die hier untersuchten Raummuster über 40% des theoretischen Wertebereichs ab. Zusammenfassend ist damit der Nachweis erbracht, dass sich die folgenden Landbedeckungskategorien klar in voneinander differenzierbare Gruppen zusammenfassen lassen:

- Kulturlächen, unterteilt in klein-, mittel- und großparzellerte Landwirtschaft (AGS, AGM und AGL) zeigen aufgrund ihrer hohen geometrischen Regelmäßigkeit die niedrigste Komplexitätsstufe (1,18 < SHC < 1,21);

- Natürliche und naturnahe Oberflächen, wie Wälder (FOR), Gras- und Buschlandgebiete (CHA) und vegetationsfreie Flächen (ALP) besitzen mittlere SHC-Werte zwischen 1,39 und 1,41;

- Siedlungsgebiete zeichnen sich durch eine besonders hohe fraktale Komplexität aus. Der SHC-Wert von

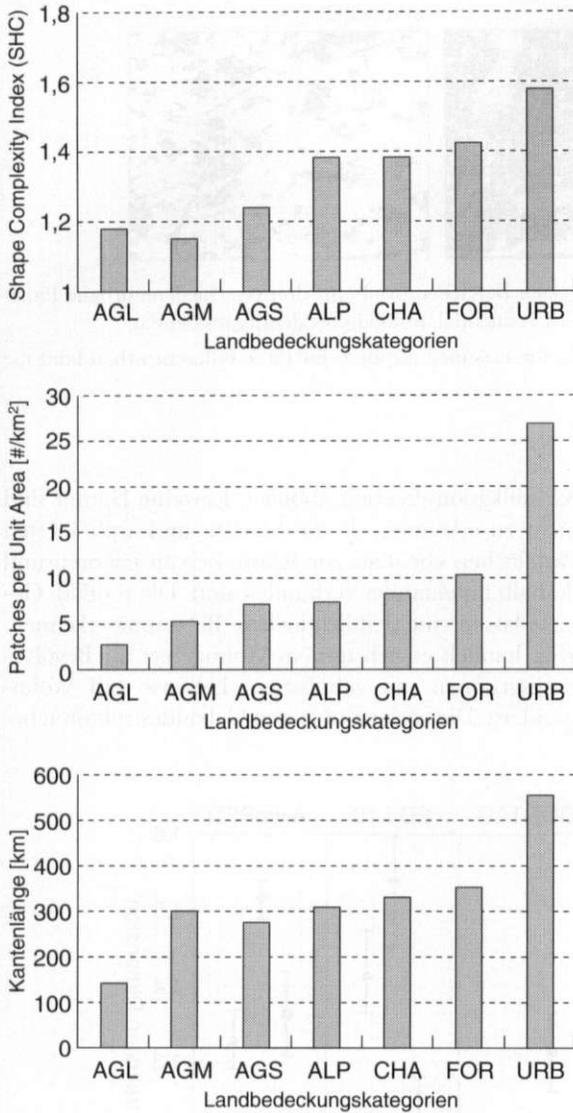


Abb. 2: Vergleich der drei ausgewählten Landschaftsmaße "Shape Complexity Index", "Patches per Unit Area" und "Perimeter" für sieben Landbedeckungskategorien  
 Comparison of three selected landscape metrics calculated for seven landcover categories

1,58 spiegelt dabei die räumliche Fragmentierung, beispielsweise in Form der Blockmusterbebauung nord-amerikanischer Städte wieder.

Die Ergebnisse der Indizes PPU und EDG untermauern die deutlich höhere räumliche Heterogenität der urbanen Gebiete im Vergleich zu den anderen untersuchten Oberflächenkategorien. Diese Erkenntnisse decken sich mit Ergebnissen vergleichbarer Studien von DE COLA (1989) und LAM (1990). Welche weitergehenden Differenzierungen in urbanen Räu-

men mit geometrisch hochaufgelösten Fernerkundungsdaten möglich sind, ist Gegenstand des folgenden Abschnitts.

#### 4.2 Fallbeispiel Santa Barbara - Beschreibung von Landnutzungsstrukturen innerhalb urbaner Regionen

Die raumstrukturellen Untersuchungen verschiedener Landnutzungen und deren Veränderung innerhalb urbaner Regionen erfolgten für das Stadtgebiet von Santa Barbara an der kalifornischen Pazifikküste 150 km nordwestlich von Los Angeles. Diese Stadtregion unterlag seit den dreißiger Jahren des 20ten Jahrhunderts, bedingt durch einen erheblichen Bevölkerungszuwachs, einem intensiven Urbanisierungsprozess und stellt heute ein bedeutendes Subzentrum der Metropole Los Angeles dar (BLUME 1988; THIEME u. LAUX 1996). Während bis Ende der siebziger Jahre die Ausbreitung des urbanen Raumes vor allem durch eine flächenhafte Ausdehnung ins Umland geprägt war, begann in den achtziger Jahren eine zunehmende Verdichtung des urbanen Raumes. Die Landnutzungsstrukturen und deren Veränderungen im Urbanisierungsprozess sollten durch Auswertung von multitemporalen Luftbildern des NAPP (National Aerial Photography Program) in Bildmaßstäben von 1:130.000 und 1:67.500 erfolgen. Nach dem Digitalisierungsprozess (Scannen) ergab sich eine räumliche Auflösung von 3 m, die sich bei verschiedenen Autoren als günstige Auflösung für lokale urbane Studien erwiesen hat (WELCH 1982; HEROLD et al. 2001). Zur Verfügung standen drei Aufnahmetermine (14. 2. 1978; 4. 11. 1988 und 30. 5. 1998). Als Landschaftsausschnitte wurden verschiedene Testgebiete definiert. Sie repräsentieren jeweils einen, hinsichtlich der Landnutzung möglichst homogenen Teil des urbanen Raumes.

##### 4.2.1 Trennung von urbanen Landnutzungsstrukturen

Die Beschreibung urbaner Landnutzungsmuster wurde für drei Beispiele urbaner Strukturen durchgeführt, die je durch zwei Testgebiete vertreten werden. Dies sind die Bereiche: a) commerc - Testgebiete ("commercial" Goleta West + East), b) resid(high density - hd) - Testgebiete ("residential" Goleta East + North), c) resid(low density - ld) - Testgebiete ("residential" Hope Ranch North + South). Abbildung 3 verdeutlicht die aus den Fernerkundungsdaten ermittelte unterschiedliche urbane Struktur.

Die sichtbar unterschiedliche Verteilung von urbanen und Vegetationsflächen ist ein Abbild der verschiedenen vorherrschenden Nutzungsarten. In den Testgebieten commerc ("commercial"), d. h. gewerblich oder

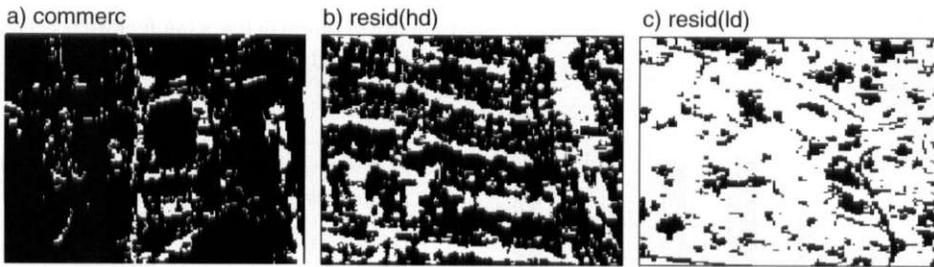


Abb. 3: Verteilung von bebauten (schwarz)- und vegetationsbedeckten Bereichen (weiß) für drei verschiedene urbane Landnutzungsstrukturen (commerc-commercial; resid(hd)-high density residential, resid(ld)-low density residential)

Distribution of built-up areas (black) and vegetation (white) in the classified airphoto for three different urban land use structures

industriell genutzte Bereiche, zeigt sich eine dichte Bebauung mit großen Gebäuden und kaum Vegetation. Ganz anders präsentieren sich die Wohngebiete. Hier zeigen sich deutlich kleinere Bebauungsstrukturen. In den resid(hd) Gebieten erkennt man die typische nordamerikanische Blockseitenbebauung von Einfamilienhäusern entlang von Straßen, die sich durch die Vegetation der hinter jedem Haus befindlichen Gärten im

Klassifikationsergebnis abbildet. Einzelne Häuser sind nicht zu erkennen, da die Straßen und asphaltierten Parkflächen ebenfalls zur Klasse bebaut gehören und deshalb miteinander verbunden sind. Die resid(ld) Gebiete lassen eine deutlich lockere Bebauung erkennen. Hier handelt es sich um ein Wohngebiet für Bevölkerungsgruppen mit gehobenem Lebens- und Wohnstandard. Die vorherrschenden Gebäudestrukturen be-

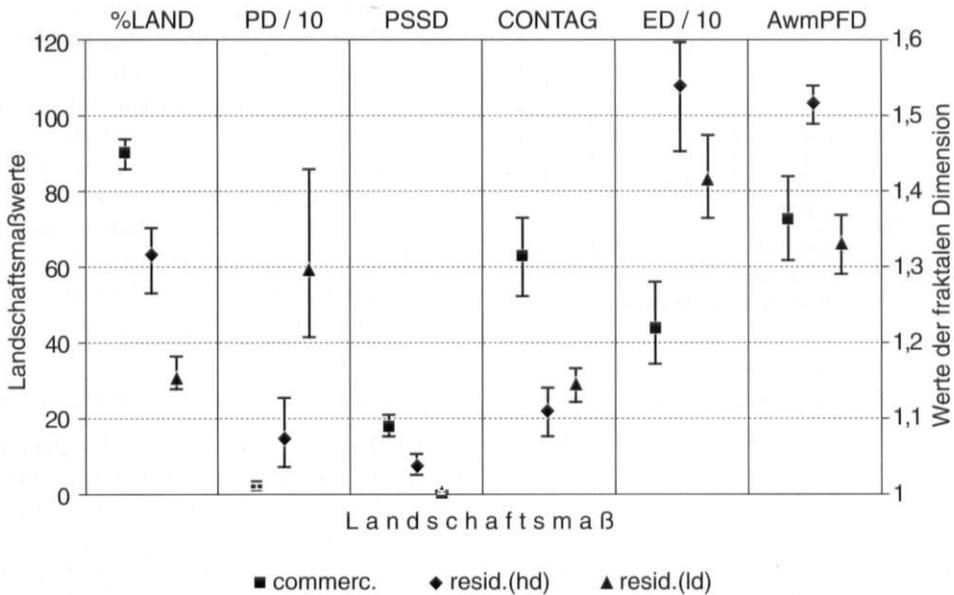


Abb. 4: Mittel-, Minimum- und Maximumwerte der Landschaftsmaße berechnet aus dem Klassifikationsergebnis der Luftbilder 1988 und 1998 für drei unterschiedliche urbane Strukturen und je zwei Testgebiete. Hinweis: Alle Maße aus der Contagion Index beziehen sich auf die Klasse „bebauet“. Die sekundäre y-Skala „Werte der fraktalen Dimension“ bezieht sich nur auf das Maß AwmPFD (Area weighted mean Patch Fractal Dimension). Die Maße PD (Patch Density) und ED (Edge Density) wurden aus Darstellungsgründen durch 10 dividiert

Mean, maximum and minimum values for three urban land use structures derived from the classified airphotos 1988 and 1998. Note: all metrics, except the contagion index, are referred to the class “built-up”. The secondary y-axis (fractal dimension value) is only related to the “area weighted mean patch fractal dimension” (AwmPFD). The patch density (PD) and the edge density (ED) were divided by ten to adjust them to the first y-scale (landscape metric value)

stehend aus Villen mit einigen Nebenhäusern. Sie finden sich als einzeln abtrennbare Bereiche in der Klassifikation wieder. Eine Verbindung der einzelnen Gebäudegruppen besteht nicht, da die Straßen durch Bäume teilweise so überdeckt werden, dass sie im Luftbild und im Klassifikationsbild nur teilweise zu erkennen sind. Weiterhin sind die Grundstücke verhältnismäßig groß und abgesehen von den wenigen bebauten Bereichen von Vegetation geprägt. Betrachtet man die Landschaftsmaße dieser Bereiche aus zwei Luftbildern für je zwei Testgebiete pro urbaner Landnutzungsstruktur zeigt sich folgende Verteilung (Abb. 4).

Das erste Maß in Abbildung 4, der Anteil der urbanen Bereiche in den Testgebieten (%LAND), gibt Auskunft über die Bebauungsdichte und zeigt bereits mit ca. 30% (resid(ld)), ca. 60% (resid(hd)) und ca. 90% (commerc) eine deutliche Trennung zwischen den unterschiedlichen urbanen Strukturen an. Die Patch Size Standard Deviation (PSSD) informiert über die Streuung der Patchgröße der Klasse „bebaut“ und ist im Zusammenhang mit dem Maß der Patch Density (PD) zu sehen. Beide zeigen für die commerc-Gebiete eine geringe Patchdichte bei großer Streuung der Patchgröße. Grund ist der geringe Vegetationsanteil an der Fläche, der zur Aggregation der bebauten Bereiche zu wenigen, unterschiedlich großen Patches führt. Auch die bebauten Bereiche der resid(hd) Gebiete sind über Straßen oder „bare soil“-Gebiete zu größeren Patches aggregiert. Allerdings ist gegenüber den commerc-Bereichen durch einen größeren Vegetationsflächenanteil und die kleineren Grundstücks- und Hausgrößen eine höhere Patchdichte und eine geringe Streuung der Patchgröße erkennbar. In den resid(ld)-Testgebieten ist die Patchdichte bedeutend höher. Hier wird deutlich, dass fast jedes Grundstück mit Bebauung als eigenes Patch erfasst wird, entsprechend niedrig ist die Streuung der Patchgröße.

Der „Contagion Index“ (CONTAG) beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass die Nachbarpixel eines Pixels zur selben Klasse gehören. Wie aus Abbildung 4 ersichtlich, heben sich commerc Bereiche mit einem höheren „Contagion Index“ ab, d. h. die Wahrscheinlichkeit, dass zwei benachbarte Pixel zur selben Klasse gehören ist hoch. Aus der Verteilung in Abbildung 3 geht diese Tatsache deutlich hervor. Alle „residential“-Testgebiete haben eine geringere Contagion, wobei die resid(ld) einen geringfügig höheren Wert zeigen. Sie sind weniger von einer Klasse dominiert und zeigen eine höhere Fragmentierung der Landschaft hinsichtlich der Verteilung von bebauten- und Vegetationsgebieten. Eine ähnliche Information lässt Edge Density (ED) ableiten. Hier haben alle „residential“-Gebiete eine höhere Kanten- oder Grenzdichte als die com-

merc Gebiete, was auf die höhere Fragmentierung und die geringere Dominanz der Klasse „bebaut“ zurückzuführen ist.

Das Maß AWMPFD gibt Auskunft über die Fragmentierung der Bebauungen. Die resid(hd) Gebiete zeigen hierbei eine höhere Fragmentierung ihrer Patches an. Grund sind relativ geringe Grundstücks- und Gebäudegrößen, die in Verbindung mit oft kleinen Vegetationsflächen (z. B. Gärten) zu dieser hohen Fragmentierung der Patches führen. Die Patches der commerc und resid(ld) Flächen haben aufgrund ihrer größeren Grundstücks-, Gebäude- und Vegetationsflächen eine geringere Fragmentierung.

Insgesamt erkennt man eine deutliche Trennung zwischen den verschiedenen Landnutzungsstrukturen, was durch die mit Linien verbundenen Testgebiete und die unterschiedliche Varianz ersichtlich ist. Als problematisch stellt sich heraus, dass manche Maße keine eindeutige Trennung bzw. signifikante Charakterisierung zwischen zwei der drei Landnutzungskategorien ermöglichen. Beispielhaft zu nennen sind der „Contagion Index“ für resid(ld) und resid(hd) und die fraktale Dimension (AWMPFD) für resid(ld) und commerc. Deshalb sollten zur Trennung dieser Gebiete immer mehrere Maße (Landschafts-Maß-Signaturen-„LMS“) verwendet werden. Weiterhin ist die teilweise große Streuung der Landschaftsmaße einer Landnutzungskategorie als problematisch anzusehen. Gründe hierfür sind möglicherweise räumliche Strukturunterschiede zwischen den verschiedenen Testgebieten und Ungenauigkeiten in der Klassifikation.

#### 4.2.2 Beschreibung von Veränderungen urbaner Landnutzung

Die Erfassung von Veränderungen in der urbanen Landnutzung ist mittels multitemporaler Fernerkundungsdaten möglich. Nachfolgend wird die Ausbreitung von bebauten Bereichen im Zeitraum 1978 bis 1988 für zwei Testgebiete (La Cumbre und Isla Vista) mit unterschiedlicher Auswirkung auf die räumliche Landnutzungsstruktur vorgestellt.

##### 4.2.2.1 Urbanes Wachstum im Testgebiet La Cumbre

Im Testgebiet La Cumbre, zwischen den Stadtteilen Goleta und Santa Barbara gelegen, fand zwischen 1978 und 1988 mit der Bevölkerungszunahme ein Neubau von Wohngebieten statt, die in den Luftbildern entsprechend erfasst wurden (Abb. 5). Besonders in den klassifizierten Bildern zeigt sich die Umwandlung von Vegetationsflächen in bebaute Bereiche. Die urbane Landnutzungsstruktur ändert sich von einem Wohngebiet mit dünner Bebauung zu einem Wohngebiet mit

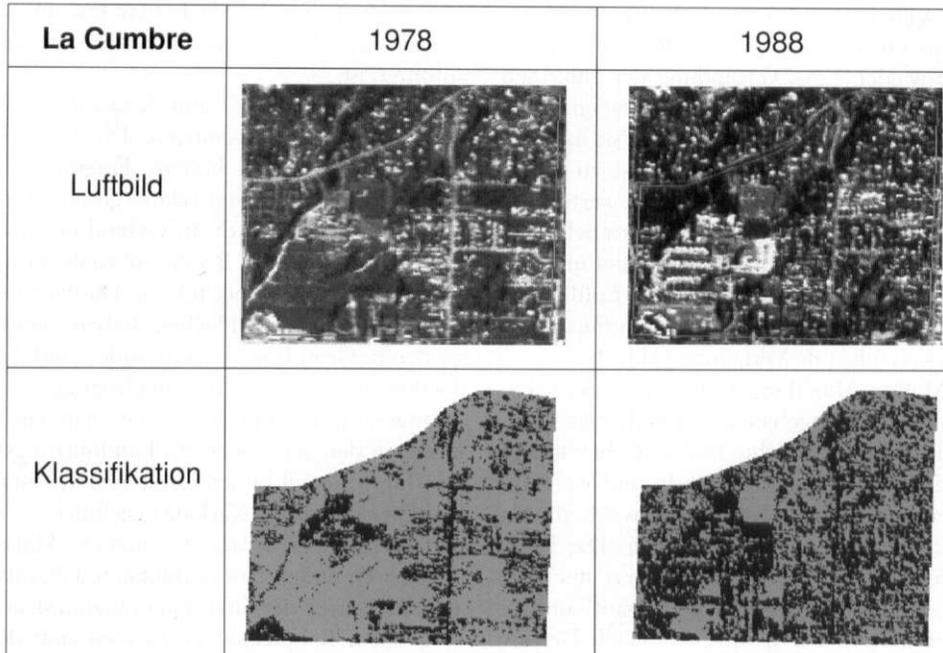


Abb. 5: Urbanes Wachstum im Testgebiet La Cumbre zwischen 1978 und 1988, dargestellt im CIR-Luftbild und als Klassifikationsergebnis mit zwei Klassen (Anmerkung: Klasse bebaut-rot; Klasse Vegetation-grün)

Changes in urban land use structure of the La Cumbre region between 1978 and 1988 represented in the airphotos and the classified distribution of vegetation (green) and built-up areas (red)

dichterer Bebauung. Die Veränderungen in der räumlichen Struktur der Landnutzung lassen sich mit Hilfe der Landschaftsmaße beschreiben (Abb. 6).

Das erste Maß (%LAND) zeigt die Zunahme des prozentualen Flächenanteils der Klasse bebaut von ca. 25% auf über 50% zwischen 1978 und 1988. Die Patchdichte (PD) der Klasse „bebaut“ nimmt hingegen ab, d. h. die bebauten Gebiete grenzen zunehmend aneinander und bilden weniger, aber unterschiedlich große, Patches. Die Streuung der Patchgröße (PSSD) steigt entsprechend. Der „Contagion Index“ (CONTAG) nimmt mit dem urbanen Wachstum ab, d. h. die Landschaft wird „kompakter“, was aus den Klassifikationsergebnissen (Abb. 5) deutlich hervorgeht. Die Kanten- oder Grenzendichte (ED) und die fraktale Dimension (AWMPFD) nehmen zu und zeigen eine zunehmende Fragmentierung der Patches der Klasse „bebaut“ an. Dies ist zum einen auf die Zunahme des Flächenanteils der Klasse „bebaut“ und zum anderen auf die zunehmende räumliche Aggregation der einzelnen Bebauungen zu größeren, fragmentierteren Patches zurückzuführen. Abbildung 6 stellt weiterhin die Landschaftsmaßsignaturen im Vergleich zu den Veränderungen im Testgebiet La Cumbre dar. Im Jahre 1978 gleicht die LMS den Gebieten resid(ld), im

Jahre 1988 wird hingegen eine Übereinstimmung mit den Gebieten resid(hd) sichtbar. Der Übergang in der räumlichen Landnutzungsstruktur von resid(ld) nach resid(hd) zeichnet sich damit deutlich ab.

#### 4.2.2.2 Urbanes Wachstum im Testgebiet Isla Vista

Im Testgebiet Isla Vista, einem direkt nördlich der Campusuniversität gelegenen und vornehmlich von Studenten bewohnten Stadtteil, war zwischen 1978 und 1988 ebenfalls eine Veränderung in der urbanen Landnutzungsstruktur feststellbar (Abb. 7). Im Luftbild und im entsprechenden Klassifikationsergebnis ist deutlich zu erkennen, wie einige vegetationsgeprägte Bereiche oder urbane Freiflächen zwischen 1978 und 1988 bebaut wurden. Im Gegensatz zum urbanen Wachstum im Bereich La Cumbre findet die Ausdehnung der Bebauung nicht in vorher völlig unbebaute Gebiete statt, vielmehr zeigte sich eine Verdichtung des urbanen Raumes durch Freiraum- oder Lückenbebauung.

Im Jahr 1978 zeigt Isla Vista die typische Signatur eines dicht bebauten „residential“ Gebiets (resid(hd), Abb. 8). Durch die zunehmende Bebauung bis zum Jahre 1988 verändert sich die Signatur in Richtung der

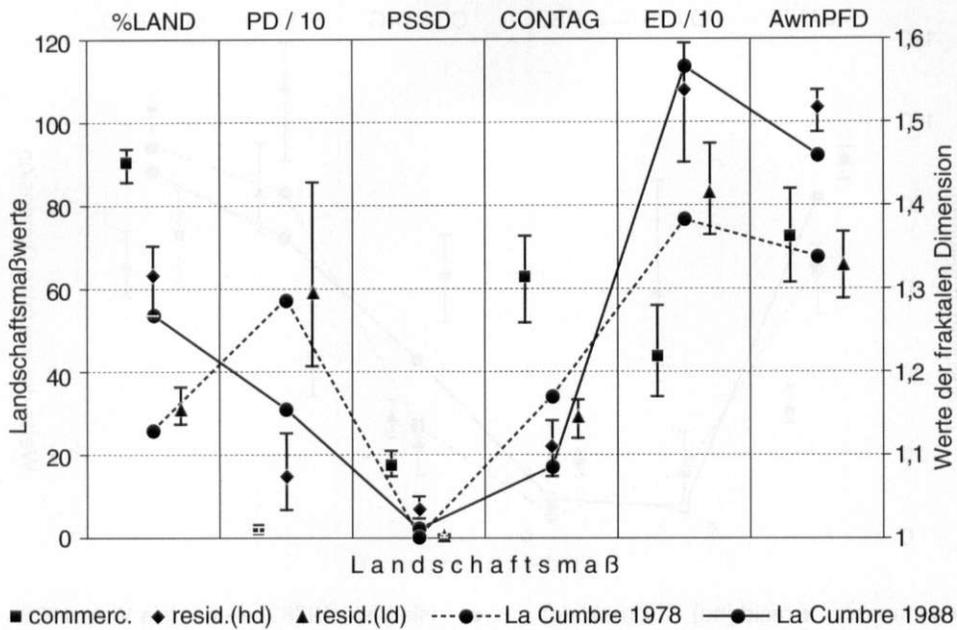


Abb. 6: Landscape-Metric Signatures (LMS) dreier unterschiedlicher urbaner Strukturen im Vergleich zu den Veränderungen im Testgebiet La Cumbre zwischen 1978 und 1988

Landscape metrics signatures (LMS) of three urban structures in comparison with changes in La Cumbre area between 1978 and 1988

Isla Vista	1978	1988
Luftbild		
Klassifikation		

Abb. 7: Urbanes Wachstum im Testgebiet Isla Vista zwischen 1978 und 1988, dargestellt im CIR-Luftbild und als Klassifikationsergebnis mit zwei Klassen (Anmerkung: Klasse bebaut-rot; Klasse Vegetation-grün)

Changes in urban environment in the Isla Vista region between 1978 and 1988 represented in the airphotos and the classified distribution of vegetation (green) and built-up areas (red)

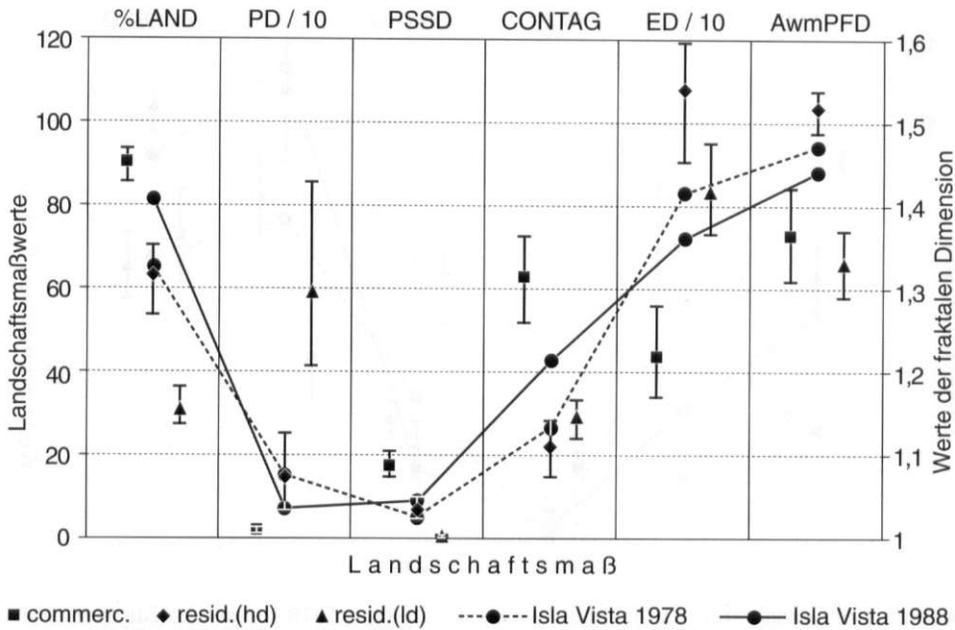


Abb. 8: Landscape-Metric Signaturen (LMS) dreier unterschiedlicher urbaner Strukturen im Vergleich mit den Veränderungen im Testgebiet Isla Vista zwischen 1978 und 1988

Landscape metrics signatures (LMS) of three urban structures in comparison with changes in Isla Vista area between 1978 and 1988

“commercial” Bereiche. Es zeigt sich eine geringere Fragmentierung bei gleichzeitiger Zunahme des Flächenanteils bebauter Gebiete. Darin unterscheidet sich die Landschaftsstruktur im Vergleich zum Testgebiet La Cumbre. Dort führte das urbane Wachstum zu einer höheren Landschaftsfragmentierung, während im Testgebiet Isla Vista die Verdichtung des urbanen Raumes in einer geringeren räumlichen Heterogenität resultiert.

Aus dem Flächenanteil der bebauten Bereiche lässt sich eher auf eine “commercial”-Bebauungsstruktur schließen. Allerdings zeigen vor allem die Fragmentierungsmaße (CONTAG, ED, AWMFPD) an, dass es sich hierbei nach wie vor um ein “residential”-Gebiet handelt. Grund sind die kleineren Grundstücks- und Bebauungsgrößen, die trotz ähnlichem prozentualen Flächenanteil (%LAND) eine höhere Fragmentierung des Raumes bedingen. Damit wird nochmals deutlich, dass erst die Kombination mehrerer Landschaftsmaße eine zuverlässige Trennung unterschiedlicher Landnutzungskategorien ermöglicht.

##### 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Bereitstellung von Informationen über die Strukturen und Veränderungen der Landnutzung urbaner Regionen zur Unterstützung von Entschei-

dungen für Stadt- und Regionalplaner stellt eine neue Herausforderung für die angewandte Fernerkundung dar. Aufgrund der inhomogenen Oberflächenstrukturen von Siedlungen und der derzeit noch unzureichenden spektralen Differenzierung urbaner Landnutzungskategorien werden hohe Ansprüche an die Satelliten- bzw. Luftbilddaten und an die Auswertemethoden gestellt. Eine Schlüsselposition nehmen dabei die Landschaftsmaße ein. Im Unterschied zu den pixelbasierten Klassifikationsansätzen liefern sie eine quantitative Beschreibung von räumlichen Strukturen und Mustern. Im Rahmen dieser Studie wurden sie erstmals gezielt zur Erfassung, Abgrenzung und Differenzierung von urbaner Landnutzungsinformation eingesetzt.

Die Ergebnisse der Auswertung einer LANDSAT-5-TM Szene aus dem San Joaquin Valley mit der Sierra Nevada zeigen, dass sich urbane Gebiete durch ihre extrem hohe Fragmentierung von allen anderen Landoberflächenkategorien deutlich abheben. Der Shape Complexity-Index (SHC) liegt mit einem Wert von 1,58 signifikant über den Werten aller anderen Landbedeckungskategorien. Die Detailuntersuchungen der innerurbanen Landnutzungsstrukturen in klassifizierten Luftbildern zeigte in den graphisch kombinierten Landschaftsmaßen, den sogenannten “Landscape-Metric” Signaturen (LMS), unterschiedliche LMS für gewerblich genutzte Bereiche (commerc) sowie für locker und dicht bebaut Wohngebiete (resid(ld) bzw.

resid(hd)). Als wichtigste Einflüsse auf die LMS wurden die Bebauungsdichte, die mittlere Bebauungs- und Grundstücksgröße und die räumliche Verbindung der bebauten Bereiche erkannt. Für die Erforschung von Siedlungsprozessen erfolgte weiterhin eine Untersuchung zur Suburbanisierung und zur Verdichtung durch Lückenbebauungen zwischen 1978 und 1988. Beide Prozesse konnten mittels der verschiedenen Landschaftsmaßen bzw. den LMS durch ihre unterschiedlichen Auswirkungen auf die Raumstruktur beschrieben und charakterisiert werden.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Landschaftsmaße neben der spektralen Information eine wichtige Informationsquelle zur detaillierten Beschreibung von Strukturen und zur Erfassung von Veränderungen urbaner Landnutzung aus Fernerkundungsdaten darstellen. Sie tragen damit zur detaillierten quantitativen Kartierung und Abbildung landnutzungsspezifischer und sozioökonomischer Strukturen bzw. deren Veränderungen in urbanen Regionen bei. Auf der Grundlage der hier präsentierten Ergebnisse ergibt sich ein Bedarf an einer weiteren Fortentwicklung und Evaluierung dieses Ansatzes. Die Untersuchungen sollten mehrere Schwerpunkte berücksichtigen:

1. Ausdehnung der Analysen auf gesamte Stadtregionen in verschiedenen kulturellen Zonen der Erde;
2. Vertiefende Untersuchungen zu Raumstrukturmaßen bzw. deren Kombination in Form von Signaturen oder Indizes zur quantitativen Kartierung von urbanen Raumstruktureigenschaften;
3. Einbindung von Daten aus räumlich und spektral hochaufgelösten Fernerkundungssystemen (z. B. IKONOS, EOS-1) zur Verbesserung der urbanen Landbedeckungsklassifikation.

Die vertiefenden Untersuchungen sollten vor allem anwendungsspezifische Aspekte berücksichtigen. Besonderes Potential besteht hier u.a. in der kombinierten Anwendung von Fernerkundungsmethoden und entscheidungsunterstützenden urbanen Landnutzungsveränderungsmodellen (LONGLEY a. MESEV 2000; HEROLD et al. 2001). Des weiteren ist durch die Auflage neuer interdisziplinärer Forschungsprogramme zu Global Change (z. B. GLOWA-Projekt des BMBF) oder der Vernetzung von naturwissenschaftlicher mit sozioökonomischer Forschung (z. B. im Kontext des internationalen LUCC-Projektes – Land Use and Cover Change) zu erwarten, dass die Bedeutung von raumstrukturellen Analysen zukünftig deutlich zunehmen wird.

#### *Danksagung*

Die Untersuchungen wurden durch mehrmonatige Forschungsaufenthalte der beiden Autoren an der Uni-

versity of California at Santa Barbara (UCSB) durch die Max-Kade Foundation (New York) und die NASA (Washington) gefördert. Für die freundschaftliche Integration und inhaltliche Diskussionen sei namentlich den Kollegen JACK ESTES und JOE SCEPAN von der Remote Sensing Research Unit (RSRU) herzlich gedankt. Die Auswertungen wären nicht ohne die großzügige Unterstützung mit Daten durch die Map and Imagery Library (MIL) an der UCSB möglich gewesen.

#### *Literatur*

- ANDERSON, J. R.; HARDY, E. E.; ROACH, J. T. a. WITMER, R. E. (1976): A land Use and Land Cover Classification Scheme for Use with Remote Sensor Data. U.S. Geological Survey Professional Paper 964.
- BARNEKOV, T. K. a. RICH, D. (1995): Introduction to cities and urbanism. In: CAVES, R. W.: Exploring urban America. Thousand Oaks, CA, 3–12.
- BARNESLEY, M. J.; BARR, S. L.; HAMID, A.; MULLER, P. A. L.; SADLER, G. J. a. SHEPHERD, J. W. (1993): Analytical Tools to Monitor urban areas. In: MATHER, P. M. (ed.): Geographical Information Handling-Research and Applications, 147–184.
- BARUTH, B. (1998): Satellitendaten für den Natur- und Artenschutz. In: Geographische Rundschau 50, 84–88.
- BATTY, M. a. LONGLEY, P. A. (1994): Fractal cities: A geometry of form and function. London.
- BATTY, M. a. XIE, Y. (1996): Preliminary Evidence for a theory of the fractal city. In: Environment and Planning A 28, 1745–1763.
- BLUME, H. (1988): USA: Eine geographische Landeskunde. Band 2, Regionen der USA. Darmstadt.
- CHANGDA, D.; LINLI, T. a. GANG, C. (1994): Monitoring of Urban Expansion and Environmental Change Based on TM Data. In: Proc. ISPRS Commission VII Symp., Sept. 26–30 Rio de Janeiro, Brazil 30, Part 7b, 281–286.
- DE COLA, L. (1989): Fractal analysis of a classified Landsat-scene. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 55, 601–610.
- DE COLA, L. a. LAM, N. N.-S. (1993): Introduction to fractals in Geography. In: LAM, N. N.-S. a. DE COLA, L.: Fractals in Geography. Englewood Cliffs, New Jersey, 3–22.
- DONNAY, J. P.; BARNESLEY, M. J. a. LONGLEY, P. A. (2001): Remote sensing and urban analysis. In: DONNAY, J. P.; BARNESLEY, M. J. a. LONGLEY, P. A. (eds.): Remote sensing and urban analysis. London, New York, 3–18.
- DUNN, C. P.; SHARPE, D. M.; GUNTENSBERGEN, G. R.; STEARNS, F. a. YANG, Z. (1991): Methods for analyzing temporal changes in landscape pattern. In: TURNER, M. G. a. GARDNER, R. H. (eds.): Quantitative methods in landscape ecology: The analysis and interpretation of landscape heterogeneity. New York, 173–198.
- EHLERS, M.; JADKOWSKI, M. A.; HOWARS, R. R. a. BROSTUEN, D. E. (1994): Application of SPOT Data for Regional Growth Analysis and Local Planning. In: MACLEAN, A.L.

- (ed.): Remote Sensing and Geographic Information Systems. ASPRS Bethesda, MA, 204–209.
- FÖRSTNER, W. (1999): 3D City models: Automatic and semi-automatic acquisition methods. In: FRITSCH, D. a. SPILLER, R. (eds.): Photogrammetric week'99. Heidelberg, 291–304.
- FOSTER, B. C. (1993): Coefficient of variation as a measure of urban spatial attributes using Spot HRV and Landsat TM. In: International Journal of Remote Sensing 14, 2403–2409.
- FROHN, R. C.; MCGWIRE, K. C.; DALES, V. H. a. ESTES, J. E. (1996): Using satellite remote sensing analysis to evaluate a socio-economic and ecological model of deforestation in Rondonia, Brazil. In: International Journal of Remote Sensing 17, 16, 3233–3255.
- GALEMA, M. a. GALEMA, M. (1991): Monitoring urban growth using SPOT images and aerial photographs. In: ITC Journal 2, 63–69.
- GASPER, P. (1997): Landschaftsmaße zur Bestimmung der räumlichen Strukturen in klassifizierten Satellitenbildern – Auswertung von CORINE-Bodenbedeckungsdaten für die neuen Bundesländer. Diplomarbeit am Institut für Geographie der Universität Bonn.
- GONG, P. a. HOWARTH, P. J. (1990): The use of structural information for improving land-cover classification accuracies at the rural-urban fringe. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 56, 67–73.
- GOODCHILD, M. F. a. MARK, D. M. (1987): The fractal nature of geographic phenomena. In: Annals of the Association of American Geographers 77, 2, 265–278.
- GUSTAFSON, E. J. a. PARKER, G. R. (1992): Relationships between landcover proportion and indices of landscape spatial pattern. In: Landscape Ecology 7, 101–110.
- HENDERSON, F. M. a. XIA, Z.-G. (1997): SAR Applications in Human Settlement Detection, Population Estimation and Urban Land Use Pattern Analysis: A Status Report. In: IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing 35, 79–85.
- HEROLD, M.; MENZ, G. a. CLARKE, K. C. (2001): Remote Sensing and Urban Growth Models – Demands and Perspectives. In: Regensburger Geographische Schriften 35, 33–34.
- IMHOFF, M. L.; LAWRENCE, W. T.; STUTZER, D. C. a. ELVIDGE, C. D. (1997): A Technique for Using Composite DMSO/OLS "City Lights" Satellite Data to Map Urban Area. In: Remote Sensing of Environment 61, 361–370.
- JENSEN, J. R.; BRYAN, M. L.; FRIEDMAN, S. Z.; HENDERSON, F. M.; HOLZ, R. K.; LINDGREN, D.; TOLL, D. L.; WELCH, R. A. a. WRAY, J. R. (1983): Urban /Suburban Land Use Analysis. In: COLWELL, R. N. (ed.): Manual of Remote Sensing Vol. II, Chapter 30, 1571–1661.
- JENSEN, J. R.; COWEN, D. J.; HALLS, J.; NARUMALANI, S.; SCHMIDT, N. J.; DAVIS, B. A., a. BURGESS, B. (1994): Improved Urban Infrastructure Mapping and Forecasting for BellSouth Using Remote Sensing and GIS Technology. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 60, 3, 339–346.
- JENSEN, J. R. a. COWEN, D. C. (1999). Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 65, 5, 611–622.
- KEITT, T. H.; URBAN, D. L. a. MILNE, B. T. (1997): Detecting critical scales in fragmented landscapes. In: Conservation Ecology 1. <http://www.consecol.org/vol1/iss1/art4> (Access: April 2001).
- KIM, H. H. (1992): Urban heat island. In: International Journal of Remote Sensing 13, 2319–2336.
- KIM, T. a. MULLER, J.-P. (1995): Automated building height estimation and object extraction from multi-resolution imagery. In: Proceedings of SPIE Conference on "Integrating Photogrammetric Techniques with Scene Analysis and Machine Vision II". Orlando, Florida, 19–21 April, 2486, 267–276.
- LAM, N. S. N. (1990): Description and measurements of Landsat TM images using fractals. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 56, 2, 18–195.
- LAUSCH, A. (2000): Raum-zeitliches Monitoring von Landschaftsstrukturen in der Tagebauregion Südraum Leipzig mit Methoden der Fernerkundung und Geoinformation. UFZ(Umweltforschungszentrum Halle Leipzig GmbH)-Bericht 12. Leipzig.
- LAUSCH, A. u. MENZ, G. (1999): Bedeutung der Integration linearer Elemente in Fernerkundungsdaten zur Berechnung von Landschaftsstrukturmaßen. In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation 3, 185–194.
- LI, H. a. REYNOLDS, J. F. (1993): A new contagion index to quantify spatial patterns of landscapes. In: Landscape Ecology 8, 155–162.
- LONGLEY, P. A. a. MESEV, V. (2000). On the measurement and generalization of urban form. In: Environment and Planning A 32, 473–488.
- MANDELBROT, B. B. (1983): The fractal geometry of nature. New York.
- MCGARICAL, L. a. MARKS, B. J. (1994): FRAGSTATS Manual spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. URL: <ftp://ftp.fsl.orst.edu/pub/fragstats.2.0> (Access June 2000).
- MEAILLE, R. a. WALD, L. (1994): Using Geographical Information System and Satellite Imagery within a Numerical Simulation of Regional Urban Growth. In: MACLEAN, A. L. (ed.): Remote Sensing and Geographic Information Systems. ASPRS Bethesda, MA, 210–221.
- MEINEL, G.; LIPPOLD, R. a. NETZBAND, M. (1998): The potential use of high resolution satellite data for urban and regional planning. In: Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXII, Part 7. Budapest, 250–257.
- MENZ, G. (1998): Landschaftsmaße und Fernerkundung neue Instrumente für die Umweltforschung. In: Geographische Rundschau 50, 2, 106–112.
- MESEV, V. (1998): The use of Census data in urban image classification. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 64, 5, 431–438.
- MESEV, T. V.; BATTY, M.; LONGLEY, P. A. a. XIE, Y. (1995): Morphology from imagery: detecting and measuring the density of urban landuse. In: Environment and Planning A 27, 759–780.

- MILNE, B. T. (1991): Lessons from applying fractal models to landscape patterns. In: TURNER, M. G. a. GARDNER, R. H. (eds.): *Quantitative methods in landscape ecology: the analysis and interpretation of landscape heterogeneity*. New York, 199–235.
- O'NEILL, R. V.; KRUMMEL, J. R.; GARDNER, R. H.; SUGIHARA, G.; JACKSON, B.; DEANGELIS, D. L.; MILNE, B. T.; TURNER, M. G.; ZYGMUNT, B.; CHRISTENSEN, S. W.; DALE, V. H. a. GRAHAM, R. L. (1988): Indices of landscape pattern. In: *Landscape Ecology* 1, 153–162.
- O'NEILL, R. V.; HUNSAKER, C. T.; TIMMINS, S. P.; JACKSON, K. B.; RUITERS, K. H. a. WICKHAM, J. D. (1996): Scale problems in reporting landscape pattern at regional scale. *Landscape Ecology* 11, 3, 169–180.
- PARLOW, E. (1998): Analyse von Stadtklima mit Methoden der Fernerkundung. In *Geographische Rundschau* 50, 89–93.
- QUATTROCHI, D. A. a. RIDD, M. K. (1994): Measurement and analysis of thermal energy responses from discrete urban surfaces using remote sensing data. In: *International Journal of Remote Sensing* 15, 991–1022.
- RAMI, M. (1997): *Landschaftsmaße und Satellitenfernerkundung*. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Universität Bonn.
- RIDD, M. K. (1995): Exploring a VIS (vegetation-impervious-surface-soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. In: *International Journal of Remote Sensing* 16, 2165–2185.
- SADLER, G. J.; BARNSLEY, M. J. a. BARR, S. L. (1991): Information extraction from remotely-sensed images for urban land analysis. In: *Proceeding of the 2nd European Conference on Geographical Information Systems (EGIS'91)*. Brussels, Belgium, Utrecht, 955–964.
- STEINNOCHER, K. (1996). Integration of spectral and spatial classification methods for building a land use model of Austria. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXI*, Part B4, 841–846.
- THIEME, G. u. LAUX, H. D. (1996): Los Angeles – Prototyp einer Weltstadt an der Schwelle zum 21. Jahrhundert. In: *Geographische Rundschau* 48, 82–88.
- TURNER, M. G.; O'NEILL, R. V.; GARDNER, R. H. a. MILNE, B. T. (1989): Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. In: *Landscape Ecology* 3, 153–162.
- WANG, J. (1992): Road network detection from SPOT Imagery for updating Geographical Information Systems in the rural-urban fringe. In: *International Journal of Geographical Information Systems* 6, 2, 141–157.
- WELCH, R. (1982): Spatial resolution requirements for urban studies. In: *International Journal of Remote Sensing* 3, 2, 139–146.
- XIA, Z.-G. a. HENDERSON, F. M. (1997): Understanding the Relationships Between Radar Response Patterns and the Bio- and Geophysical Parameters of Urban Areas. In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 35, 93–101.
- ZAVOIANU, F. a. NITU, C. (1998): Remote sensing and digital photogrammetric data integration into a GIS 3-D for monitoring and analysis urban area under natural stress. In: *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXII*, Part 7. Budapest, 762–765.

## BUCHBESPRECHUNGEN

SECKELMANN, ASTRID: *Siedlungsentwicklung im unabhängigen Namibia. Transformationsprozesse in Klein- und Mittelzentren der Farmzone*. X und 239 S., 17 Abb. und 7 Tab. *Hamburger Beiträge zur Afrika-Kunde* 60. Institut für Afrika-Kunde, Hamburg 2000, DM 30,-

Bei der Arbeit von SECKELMANN handelt es sich um eine Dissertation, die im Rahmen eines Graduiertenkollegs über Afrika an der Universität Würzburg entstanden ist. Die Studie greift in ihrer Untersuchung von Klein- und Mittelzentren eine Thematik auf, die im Spannungsfeld zwischen Stadtgeographie, Regionalentwicklung und Entwicklungsländerforschung angesiedelt ist. Nach zehn Jahren Unabhängigkeit Namibias stellt SECKELMANN die Frage, ob jenseits der Metropole Windhoek auch die ländliche Peripherie vom gesellschaftlichen Umbau profitiert hat. Die Diskussion wird anhand von drei Siedlungen im nördlichen Namibia – Kalkfeld, Omaruru und Otjiwarongo – vorgenommen. Den Aussagen liegen insbesondere qualitative Methoden zugrunde, um über die Perception von Ortsbewohnern und Entscheidungsträgern Faktoren und Prozesse der Siedlungsentwicklung sowie die zugrundeliegenden Steuerungsmechanismen zu erschließen. Weil es das Ziel der Arbeit ist, Hypothesen

eher zu entwickeln als zu überprüfen, existiert kein bis ins Detail geplanter Forschungsplan. Das Vorgehen im Sinne offener Interviews, teilnehmender Beobachtung, mental mapping und Aufzeichnung von Handlungsabläufen wird unter Berücksichtigung bereits gewonnener Ergebnisse dem Untersuchungsgegenstand immer wieder neu angepasst. Die Untersuchungsteilnehmer werden „durch zielgerichtete Selektion“ (S. 16) ausgewählt. Dem methodischen Kapitel folgen allgemeinere Abschnitte zur Urbanisierung in Afrika und Namibia sowie der Bedeutung intermediärer Orte in diesem Prozess. Aus der Charakterisierung der drei Fallbeispiele werden Entwicklungsstrategien für intermediäre Orte auf unterschiedlichen Raumebenen abgeleitet, die vor allem auf wirtschaftliche Diversifizierung (z. B. Tourismus) und verbesserte Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Interessengruppen zielen.

Die Vorgehensweise ist ungewöhnlich. Zuweilen bleibt unklar, welche Relevanz gewisse Aussagen haben und ob Gesprächspartner, die die eigene Theorie nicht voranbringen, bewusst unberücksichtigt geblieben sind (S. 16). Beinahe systematisch werden quantitative Aussagen selbst aus Sekundärquellen gemieden. Die bearbeitete Literatur ist für eine