

<sup>1</sup>Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, Schweiz;  
<sup>2</sup>Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica

## Zur Erfassung von Flächenfragmentierung und struktureller Diversität Measuring Fragmentation and Structural Diversity

Von B. TRAUB<sup>1</sup>, CH. KLEINN<sup>2</sup>

### Zusammenfassung

Strukturelle Diversität, ein wichtiger Aspekt bei der Bewertung von Lebensräumen, dient als Eingangsgröße in ökologischen Modellen und als Grundlage von Kartierungen. Sie ist jedoch nicht direkt meßbar, sondern wird charakterisiert über Indizes, die wiederum auf meßbaren Größen aufbauen, wie Anzahl, Größe, Form und Randlinienlänge von Einzelflächen und dem Abstand zwischen Einzelflächen.

Die vorliegende Studie analysiert anhand eines Kartenbeispiels, in welchem die beiden Flächenklassen Wald und Nichtwald unterschieden werden, vier grundsätzliche Eigenschaften ausgewählter Indizes: Differenzierungseigenschaften, ihre gegenseitige statistische Unabhängigkeit, Skaleninvarianz und Erfäßbarkeit über Stichprobenerhebungen.

Der Flächenanteil der größten Einzelfläche (*LPI*), der Landschaftsformindex (*LSI*) und der mittlere Formindex (*MSI*), der Randlinienlänge und Anzahl Einzelflächen kombiniert, sind in den untersuchten Beispielen gut zur Strukturanalyse geeignet. Die fraktalen Indizes *MPFD* und *DLFD* sind zwar prinzipiell zur Strukturcharakterisierung geeignet, für das vorhandene Datenmaterial zeigten diese Indizes jedoch nur unbefriedigende differenzierende Eigenschaften.

Tendenzfreie Schätzungen aus Stichproben sind nur für solche Indizes möglich, die aus tendenzfrei schätzbaren Komponenten bestehen (Fläche, Randlinienlänge). Auch die fraktale Flächen/Umfang Dimension (*DLFD*) lieferte diesbezüglich befriedigende Ergebnisse.

**Schlüsselwörter:** Landschaftsstrukturindizes, Stichprobenverfahren, Strukturänderung, Skalierung

### Summary

Structural diversity is an important and difficult to measure landscape characteristic. It cannot be measured directly but is described by indices, that base upon measurable attributes such as number, size, shape and edge-length of individual areas and distance between areas.

On the basis of a sample map the study analyses four principal properties of indices: Their ability to differentiate between obviously different structures, their mutual statistical independence, their scale invariance and the possibility to estimate them from samples.

The indices *LPI*, *LSI* and *MSI* proved to be suitable for an analysis of spatial structure. The fractal indices *MPFD* and *DLFD* showed less ability to differentiate between different structures.

Unbiased sample-based estimates (using square windows of the entire map) are feasible only for indices which are composed of components which can be estimated without bias themselves (absolute area, length of edge). Also the fractal area/perimeter dimension gave good estimates in the sampling study.

**Key words:** Landscape indices, sampling, change of landscape structure, index properties, scale

### Einleitung und Zielsetzung

Fragmentierung und strukturelle Diversität beschreiben Form und Anordnung von Flächen. Im vorliegenden Beitrag wird dies am Beispiel von Waldflächen diskutiert. Mit abnehmender Waldfläche nimmt deren Zergliederung bzw. Fragmentierung meist zu. In vielerlei Hinsicht ändern sich damit auch die Waldwirkungen, so daß für eine bestimmte Region nicht nur die Waldfläche insgesamt und deren Veränderung von Interesse ist, sondern auch

ihre räumliche Anordnung. Klassische großräumige Waldinventuren haben sich, was die Waldfläche betrifft, meist damit begnügt, die Gesamtgröße zu schätzen und eine thematische Unterteilung der Waldtypen vorzunehmen. Heute ist der Fokus erweitert in Richtung umfassender Erhebung von Naturressourcen. In der Variablenliste befinden sich Merkmale, welche direkt oder indirekt die strukturelle Diversität betreffen. Beispiele sind das Forest Resource Assessment Projekt der FAO (KOROTKOV, 1995; PERSSON und JANZ, 1997) und verschiedene Studien, die sich auf nationaler und internationaler Ebene mit Nomenklaturfragen und der Erstellung von Richtlinien für Inventuren natürlicher Ressourcen beschäftigen (DALE et al., 1995; KÖHL und PÄIVINEN, 1996; LUND, 1998). Insbesondere die Satellitenfernerkundung kann durch Bereitstellung flächendeckender Waldverteilungskarten Grundlagen für entsprechende Untersuchungen schaffen.

Diversität beschreibt im statistischen Sinne die Variabilität nominal skalierten Variablen biologischer und ökologischer Systeme. In ihrem Informationsgehalt entspricht sie dem der Standardabweichung für metrische Variablen und gibt an, wie ähnlich sich die Elemente einer Population im Mittel sind. Diversität ist nicht direkt und eindeutig meßbar; Diversitätsmaße werden daher über *Verteilungen* beschrieben, entweder über die Häufigkeiten der Merkmalsausprägungen selbst (z. B. Arten) oder aber über Verteilungen spezifisch interessierender Eigenschaften der Objekte. Auf diese Weise ergeben sich *Indizes* als Diversitätsmaße, welche unterschiedliche Kenngrößen in Beziehung zueinander setzen.

Während die Beschreibung der Artenvielfalt im wesentlichen durch die Kombination *zweier* Größen erfolgt, der Artenzahl und der relativen Abundanz (MAGURRAN, 1988), besitzt strukturelle Diversität deutlich mehr Aspekte: Nicht nur Art (z. B. Vegetationsform) und Häufigkeit (z. B. Anzahl der Einzelflächen eines Landschaftstyps) charakterisieren strukturelle Diversität, sondern auch weitere Merkmale wie Form und räumliche Anordnung der Einzelflächen. Je mehr Merkmale von Bedeutung sind, desto mehr Indizes lassen sich bilden und desto spezifischer wird jeweils die Information, die ein Index enthält. Eindeutigkeit und Vergleichbarkeit der Indizes nehmen allerdings ab.

In der Literatur, insbesondere in dem relativ jungen Wissenschaftszweig der quantitativen Landschaftsökologie findet sich eine Vielzahl von Indizes und zahlreiche Anwendungsbeispiele (O'NEILL et al., 1988; TURNER, 1989; RIPPLE et al., 1991; GUSTAFSON und PARKER, 1992; RIJTERS et al., 1995; MCGARIGAL und MARKS, 1995). In einem früheren Beitrag (TRAUB und KLEINN, 1997) haben sich die Autoren mit Indizes zur Beschreibung der Form von Einzelflächen befaßt. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf Aspekte der räumlichen *Verteilung* von Einzelflächen.

Welcher Nutzen läßt sich von einer quantitativen, d. h. objektivierten Beschreibung der strukturellen Diversität erwarten? Sie ermöglicht Studien, welche beliebige andere Größen in Beziehung zu Aspekten struktureller Diversität setzen. Als Beispiele mögen Untersuchungen über Habitatansprüche von Tieren dienen, oder aber Fragen, ob zunehmende Fragmentierung von Waldflächen mit einem Verlust an genetischer Diversität einhergeht, oder ob Artenvielfalt auf dem Umweg über die Struktur des Kronendaches (Löcher im Kronendach) erfaßt werden kann (KOOP et al., 1995). Weitere Möglichkeiten, strukturelle Diversität als Eingangsgröße in Modellen zu verwenden, nennt TURNER (1989). Eine Quantifizierung struktureller Diversität erlaubt weiterhin die Einteilung einer Region in Straten ähnlicher Struktur, was für ökologische Kartierungen von Interesse ist, aber auch für die Optimierung der Flächenschätzungen von Waldinventuren (KLEINN et al., 1995; TRAUB et al., 1995). Vor allem im Bereich der automatisierten Auswertung von Satellitenbildern bieten sich eine Reihe direkter Anwendungsmöglichkeiten.

## Material und Methoden

### 1. Daten

Die in der vorliegenden Studie verwendeten empirischen Kartendaten (Abbildung 1) geben die Waldfläche von 1992 in einer etwa 6000 km<sup>2</sup> großen Region im Norden Costa Ricas wieder (COSEFORMA, 1995).

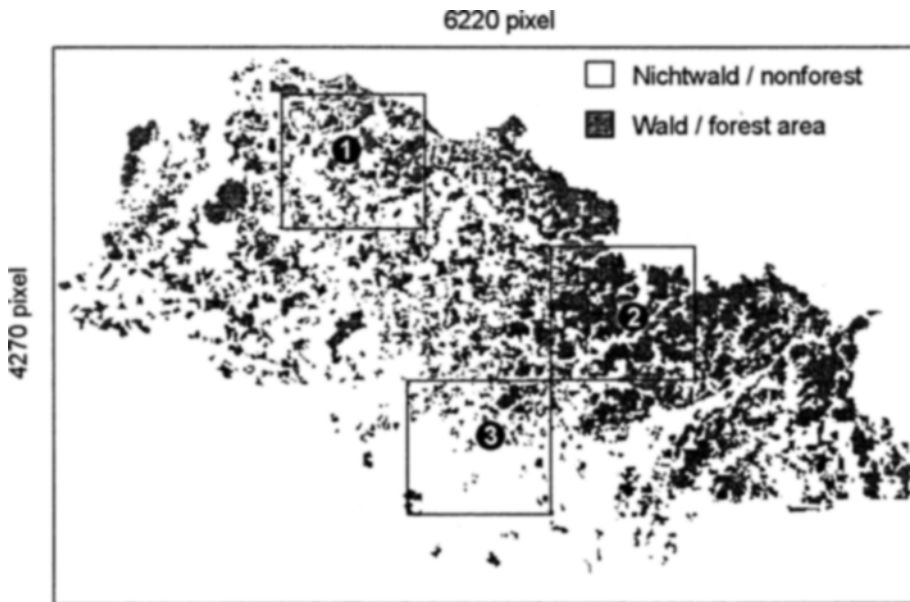


Abb. 1. Zona Norte, Costa Rica: Waldkarte 1992<sup>1</sup>

Fig. 1. Zona Norte, Costa Rica: Forest cover map 1992

<sup>1</sup> Diese Karte wurde im Rahmen eines Inventurprojekts der Zona Norte, Costa Rica, freundlicherweise vom COSEFORMA Projekt zur Verfügung gestellt (COSEFORMA, 1995)

Es handelt sich um eine Rasterkarte mit einer Pixelauflösung von ca.  $20 \times 20$  m. Drei Ausschnitte mit einer offensichtlich unterschiedlichen Flächenstruktur wurden ausgewählt, um exemplarisch Indizeigenschaften zu untersuchen (Abbildung 1). Ausschnitt 1 zeigt eine starke und relativ gleichmäßige Fragmentierungsstruktur, Ausschnitt 2 weist große zusammenhängende Waldflächen auf. Ausschnitt 3 ist sehr heterogen, zur Hälfte fast waldfrei, zur Hälfte von unterschiedlich großen Waldstücken besetzt.

## 2. Methoden der Indexuntersuchung

Es sind fünf zentrale Fragen von Interesse, möchte man Indizes auf Ihre Eignung zur Beschreibung struktureller Diversität hin untersuchen:

1. *Sensitivität* bezüglich typischer Formen und Strukturen bzw. deren Veränderungen. Anhand der drei Kartenausschnitte wird untersucht, ob sich die visuell erkennbaren strukturellen Unterschiede entsprechend in den Indexwerten wiederfinden.
2. *Lineare Korrelationen zwischen den Indizes* zur Klärung, welche Indizes unabhängige Informationen liefern. Diese Methode geht auf RIITERS et al. (1995) zurück. Gemessen wurden lineare Korrelationskoeffizienten, auf der Basis von 100 zufällig ausgewählten Bildausschnitten gleicher Größe.
3. *Skaleninvarianz*: Zu klären ist, inwieweit Indexwerte identischer *Strukturen* von der räumlichen Auflösung des verwendeten Kartenmaterials abhängen. Hierzu wurden Kartenausschnitte so expandiert, daß die Dimension der Karte um die Faktorenstufen  $s$  ( $s = 2, 5, 10, 20$ ) vergrößert wurden. Aus jedem pixel entstehen so  $s^2$  Pixel, die Größe (Anzahl Pixel  $n_e$ ) der neu entstandenen Karte ist dann  $n_e = n \cdot s^2$ .
4. *Abhängigkeit vom Waldanteil*: Bei mittleren Waldanteilen besteht die größte Bandbreite möglicher Flächenverteilungen. Es interessiert damit die Frage, wie Indexwerte generell

mit dem Waldanteil zusammenhängen. Auch diese Untersuchung basiert auf den zufällig ausgewählten Bildausschnitten.

5. *Erfassung durch Stichproben*: Strukturelle Diversität beschreibt generell eine Eigenschaft des gesamten Untersuchungsgebietes. Steht kein flächendeckendes Kartenmaterial zur Verfügung, stellt sich die Frage, wie sich Indexwerte aus Stichproben schätzen lassen. Für die hier vorliegende Untersuchung wurden die Indexkomponenten Waldanteil, Anzahl der Waldeinzelflächen und die Randlinienlänge der Waldflächen aus jeweils 100 zufällig ausgewählten quadratischen Kartenausschnitten der Seitenlängen 50, 100, 200, 500 und 750 Pixel berechnet und anschließend die entsprechenden Quotienten verschiedener Indizes gebildet.

### 3. Indizes

Die untersuchten Indizes liefern Informationen über Größe, Form, Anzahl und räumliche Anordnung von Einzelflächen. Drei Gruppen lassen sich unterscheiden (s. a. Tabelle 2):

- A. Indizes basierend auf Anzahl und Größe von Einzelflächen.
- B. Indizes basierend auf der Form der Einzelflächen.
- C. Indizes basierend auf der fraktalen Geometrie von Einzelflächen.

Basis für die Strukturbeschreibung des vorgestellten Datenmaterials sind Fläche und Umfang der Waldeinzelflächen. In Tabelle 1 sind wichtige Größen zur Charakterisierung struktureller Diversität aufgelistet. Sie bilden die Komponenten der hier untersuchten Indizes, die in Tabelle 2 aufgeführt sind. Grundlegende Eigenschaften der Indizes sind dort in der rechten Spalte gelistet. Für die Extremwerte werden zwei Fälle unterschieden: (1) Die Gesamtfläche besteht aus Pixeln nur einer Klasse ( $n = 1$  bzw. 0) und (2) die Gesamtfläche ist schachbrettartig mit Pixeln beider Klassen besetzt ( $n = TA/2$ ).

*Tabelle 1.* Eingangsgrößen zur Indexberechnung. Die laufende Nummer der  $n$  Einzelflächen ist mit  $j$  indiziert ( $j = 1, 2, \dots, n$ )

*Table 1.* Basic parameters for index calculation. The number of single patches is sequentially indexed by  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ )

$Bp^2 =$	Pixelfläche [1]
$Bp =$	Pixelbreite [1]
$e =$	Randlinienlänge zwischen Wald- und Nichtwaldflächen ohne Randlinien zum Hintergrund
$e' =$	Randlinienlänge zwischen Wald- und Nichtwaldflächen inklusive der Randlinien zum Hintergrund
$n =$	Anzahl Waldeinzelflächen
$G =$	Gesamtzahl Pixel
$BACK =$	Gesamtzahl Pixel der Klasse Hintergrund
$p_j =$	Umfang der Waldeinzelfläche $j$
$a_j =$	Flächeinhalt der Waldeinzelfläche $j$

Für die Berechnung der Indizes wurde hier die public domain Software FRAGSTATS (MCGARIGAL und MARKS, 1995, ftp.fsl.orst.edu) verwendet. Die englischen Indexbezeichnungen sind direkt oder sinngemäß übersetzt. Maßeinheiten für absolute Größen sind im folgenden mit [abs] gekennzeichnet, ein Pixel entspricht *einer* Flächeneinheit  $Bp^2$  (vgl. Tab. 1). Prozentuale Größen sind mit [%] gekennzeichnet, dimensionslose Werte mit []. Definitionen und Eigenschaften der beschriebenen Indizes sind in Tabelle 2 zu finden.

#### A. Indizes, welche Anzahl und Größe der Einzelflächen beschreiben

Die Kenngrößen Gesamtfläche  $TA$  [abs] und Waldflächenanteil  $LAND$  [%] dienen als Bezugsgröße vieler Indizes.  $LPI$  [%] berechnet den Anteil der größten Waldeinzelfläche an der Gesamtwaldfläche (GARDNER et al., 1987; RIPPLE et al., 1991; GARDNER et al., 1992;

Table 2. Indizes zur Beschreibung von Flächenstruktur (zu den Typen A, B, C siehe Text). (1) Die Gesamtfläche ist vollständig mit Wald bedeckt (LAND = 100%), (2) Die Waldflächen sind schachbrettartig angeordnet (LAND = 50%)

Table 2. Landscape pattern indices (for details on types A, B, C see text). (1) The total area is completely covered by forest (LAND = 100%), (2) The forest area is arranged in a chessboard structure (LAND = 50%)

Typ	Kenngröße	Eigenschaften
		<b>Gesamtfläche (total area)</b>
A	$TA = (G - BACK) \cdot B_p^2$	TA min: 0 TA max: $\rightarrow \infty$
A	$LAND = \frac{\sum_{j=1}^n a_j}{TA} (100)$	<b>Prozentualer Flächenanteil der Waldfläche an der Gesamtfläche</b> LAND min: 0% LAND max: 100%
A	$LPI = \frac{\max(a_j)}{TA} (100)$	<b>Anteil der größten Waldeinzelfläche (largest patch index)</b> LPI min: 0% LPI max: LAND
A	$PD = \frac{n \cdot 10^6}{TA}$	<b>Einzelflächendichte (patch density)</b> PD min: 1 bzw. 0 (1.) PD max: $10^6/2$ (2.)
A	$MPS = \frac{\sum_{j=1}^n a_j}{n}$	<b>Mittlere Größe der Einzelflächen (mean patch size)</b> MPS min: $B_p^2$ (2.) MPS max: TA (1.)
B	$ED = \frac{e}{TA}$	<b>Dichte der Randlinienlänge (edge density)</b> ED min: 0 (Grenze zum Hintergrund zählt nicht) (1.) ED max: $= 2 B_p$ (2.)
B	$LSI = \frac{e'}{4\sqrt{TA}}$	<b>Allgemeiner Formindex (landscape shape index)</b> LSI min: 1 (Grenze zum Hintergrund zählt) (1.) LSI max: $= \frac{1}{2} \sqrt{TA} \cdot B_p$ (2.)
A/B	$MSI = \frac{\sum_{j=1}^n \left( \frac{p_j}{4\sqrt{a_j}} \right)}{n}$	<b>Mittlerer Formindex (mean shape index)</b> MSI min: 1 (1.) MSI max: abhängig von $n_i$ und der Komplexität der Einzelflächen
C	$\ln(A) = c + a \ln(U)$ $DLFD = 2/a$	<b>Flächen (A)/Umfang (U)-Dimension (double logarithmic fractal dimension)</b> berechnet über die Steigung (a) der Regression von $\ln A$ (Ordinate) und $\ln U$ (Abszisse) DLFD min: 1 (1.) DLFD max $\rightarrow 2$
C	$MPFD = \frac{\sum_{j=1}^n \left( \frac{2 \ln(1 + p_j)}{\ln a_j} \right)}{n}$	<b>Mittlere Flächen/Umfang-Dimension (mean patch fractal dimension)</b> berechnet aus der Summe der Quotienten aus $\ln(U)$ und $\ln(A)$ MPFD min = 1 (1.) MPFD max $\rightarrow 2$

O'NEILL et al., 1992). Große Werte deuten auf starke Aggregation, niedrige Werte auf eine Verteilung der Klassenfläche auf viele Einzelinseln. Die relative Anzahl von Einzelflächen werden durch den Index *PD* [abs] auf eine Fläche von  $1000 \times 1000$  Pixel bezogen. Ähnlich wie bei *LPI* deuten kleine Werte auf große zusammenhängende Flächen und große zusammenhängende Flächen und große Werte auf eine vielfältige kleinflächige Struktur (RIPPLE et al., 1991). Die mittlere Größe der Einzelflächen ist durch den Index *MPS* [abs] beschrieben.

## B. Indizes zur Beschreibung der Form der Einzelflächen

Die Randliniendichte  $ED$  [abs] und der allgemeine Formindex  $LSI$  [] bilden Quotienten aus der Länge der Randlinien zwischen zwei Klassen und der Gesamtfläche ( $ED$ ) bzw. dem Umfang eines Quadrates der Fläche  $TA$  ( $LSI$ ). Als Maß zur Beurteilung der Komplexität der Einzelflächen und der Länge ihrer Grenzen zu anderen Klassen wird  $ED$  von nahezu allen Autoren verwendet, die sich mit der Beschreibung von Flächenverteilungsmustern befassen. Der mittlere Formindex  $MSI$  [] ist das arithmetische Mittel aller Quotienten aus dem Umfang der Einzelflächen und dem Umfang eines flächengleichen Quadrates.

## C. Indizes zur Beschreibung der fraktalen Dimension

Auch über die Theorie der fraktalen Dimension lassen sich Indizes bestimmen: Die Steigung der Ausgleichsgeraden des  $\log(\text{Fläche } A)/\log(\text{Umfang } U)$ -Plots entspricht der doppelt logarithmischen fraktalen Dimension ( $DLFD$ ) []:  $\ln(A) = c + a \ln(U)$  und  $DLFD = a/2$ . Es muß beachtet werden, daß vor allem die *Änderung* der fraktalen Dimension in bestimmten Skalenbereichen und weniger ihre absolute Größe interessant ist (KRUMMEL et al., 1987; TURNER und RUSCHER, 1988; RIPPLE et al., 1991; BURROUGH, 1986). Die Flächen/Umfang-Dimension  $MPFD$  [] ist der mittlere Quotient aus  $2\ln(U/4)$  und  $\ln(A)$ . Dieser Index hat starke Parallelen zum Index  $MSI$ , der das mittlere Umfang/Flächen-Verhältnis in linearer Form beschreibt (MILNE, 1991; RIPPLE et al., 1991). Von Bedeutung ist der Index  $MPFD$  vor allem dann, wenn für die Berechnung von  $DLFD$  zuwenig Datenpaare vorhanden sind.

## Ergebnisse

### 1. Differenzierungs- und Korrelationseigenschaften der untersuchten Indizes

Zur Charakterisierung der mittleren Anzahl und Größe der Einzelflächen eignen sich die Indizes  $LPI$  und  $MPS$ . Beide Indizes spiegeln in Ihren Werten die – im Gegensatz zu den Ausschnitten 1 und 3 – deutlich zusammenhängenden Waldflächen des Ausschnittes 2 wieder. Auf die Durchtrennung einzelner Flächen zwischen den beiden Inventurzeitpunkten reagieren die Indizes mit abnehmenden Werten. Allerdings ist die Information der Indizes gleichgerichtet ( $r = 0,75$  mit  $p |r| = 0,0001$ ). Während die Werte der beiden Indizes  $LPI$  und  $MPS$  stark von wenigen großen Einzelflächen bestimmt werden, reagiert der Index  $PD$  deutlich auf vorhandene Korridore und Einzelinseln.

Diese Sensibilität ist gerade in ökologischer Hinsicht von großer Bedeutung, weil fragmentierte Waldflächen heterogene Umweltbedingungen bieten. Einerseits erschweren Korridore die Ausbreitung bestimmter Arten, gleichzeitig bilden sich aber auch Ökotope, die eine Besiedelung durch bestimmte andere Arten überhaupt erst ermöglichen.

Form und Komplexität der Strukturen differenzieren die Indizes  $LSI$  und  $MSI$  gut. Der Index  $ED$  ist mit  $LSI$  hochsignifikant korreliert ( $r = 0,62$  mit  $p |r| = 0,0001$ ). Im Falle des Index  $MSI$  werden Informationen über die Randlinienkomplexität mit der Anzahl von Einzelflächen verknüpft. Dadurch kann die Zunahme von Einzelflächen eine Abnahme von  $MSI$  bewirken obwohl die Randliniendichte zunimmt. Somit ist in Verbindung mit den Indizes  $LSI$  bzw.  $ED$  eine differenziertere Beurteilung oder Bewertung der Flächenstruktur möglich. Eine signifikante ( $\alpha = 0,05$ ) Korrelation zwischen den Indizes lag nicht vor.

Die Indizes basierend auf der fraktalen Geometrie,  $DLFD$  und  $MPFD$ , sind wegen des hier beschränkten Skalierungsbereiches, schwierig zu interpretieren. Der Wertebereich von  $DLFD$  liegt zwischen 1,2 und 1,3. Die beiden Indizes sind signifikant korreliert, die Ergebnisse für  $MPFD$  also mit denen von  $DLFD$  vergleichbar.

### 2. Skaleninvarianz

Ein skaleninvarianter Index beschreibt eine Struktur so, daß er sich bei Expansion der Un-

tersuchungsregion nicht ändert. Andernfalls kann er zwar interpretiert werden, jedoch ist bei Vergleichen darauf zu achten, daß das verwendete Kartenmaterial die gleiche Skalierung aufweist.

Die Zusammenhänge von Skalierung und Landschaftsstruktur werden unter anderem bei GARDNER et al., 1987, MEENTEMEYER und BOX, 1987, TURNER et al., 1989 und BENSON und MCKENZIE, 1995, behandelt. Für einen bestimmten Landschaftstyp gilt generell, daß mit zunehmender Auflösung des Datenmaterials zusätzliche Strukturen erkennbar werden und mit abnehmender Auflösung Generalisierung eintritt. Kleine Landschaftselemente verschwinden und zwar verstreute Elemente schneller als geklumpfte. Die Anzahl Einzelflächen verändert sich, lediglich die Gesamtfläche *TA* bleibt unverändert. Ob und wie sich die Anzahl Einzelflächen ändert, hängt also vom Skalenbereich ab, über den die Änderung der Auflösung erfolgt. Liegen Feinstrukturen unterhalb einer gegebenen Auflösung vor, so vergrößert sich bei einer Erhöhung der Auflösung auch die Randlinienlänge da weitere Strukturen sichtbar werden und neue Einzelflächen hinzukommen. Durch die hier angewandte Simulation der Skalierungsänderung ist anzunehmen, daß die Auswirkungen der genannten Differenzierungs- bzw. Generalisierungseffekte auf das tatsächliche Verhalten der Indizes von den hier gefundenen Ergebnissen abweichen kann. Unter diesem Aspekt tritt die Bedeutung der „fraktalen“ Indizes *DLFD* und *MPFD* in den Vordergrund, die das Verhältnis der Komponenten Randlinienlänge und Flächenanzahl in Abhängigkeit von der Skalierungsänderung beschreiben (KRUMMEL et al., 1987; MILNE, 1991).

Als eindeutig skalierungsabhängig haben sich die Indizes *PD*, *MPS* und *ED* erwiesen. Bei der Expansion nach der hier vorgestellten Methode, welche die Flächenform nicht verändert, bleibt die Anzahl Einzelflächen konstant, der Randlinienanteil wächst linear und die Waldfläche quadratisch. Es sind daher solche Indizes skalierungsinvariant, welche Quotienten aus Faktoren des gleichen Typs (linear bzw. quadratisch) bilden. Dies sind hier *LAND*, *LPI*, *LSI* und *MSI*. Das Verhalten der Indizes *DLFD* und *MPFD* ist uneindeutig.

### 3. Abhängigkeit der Indexwerte vom Waldanteil

Der Zusammenhang zwischen Indizes und Waldfläche läßt sich in drei Kategorien (Tabelle 3) beschreiben. Der prozentuale Waldflächenanteil (Index *LAND*) ist in Verbindung mit der quantitativen Beschreibung von Waldflächenstrukturen eine zentrale Größe, da die strukturelle Diversität der Waldflächenverteilung wesentlich vom Gesamtwaldanteil abhängt. Die Korrelationskoeffizienten zwischen den Indizes geben deutliche Hinweise auf eine lineare Abhängigkeit zum Waldflächenanteil. Eindeutig linear unkorreliert mit der Waldfläche sind die Indizes *PD*, *MSI*, *DFLD* und *MPFD*.

Tabelle 3. Abhängigkeit der Strukturindizes vom Waldanteil

Table 3. Relationship between indices and forest cover percent

Typ	Indizes
1 <i>Linear</i> : Die Indexwerte und deren obere oder untere Grenzen zeigen einen stetigen Trend und sind positiv oder negativ mit dem Waldanteil korreliert. Durch Ausgleichskurven können Indexwert sowie Minima und Maxima der Indexwerte in Abhängigkeit vom Waldanteil geschätzt werden. Deutlich sind die Grenzen für die Maximalwerte in Abbildung 2 sichtbar. Die Werte von <i>LPI</i> können jene des Index <i>LAND</i> bzw. des Waldanteils nicht überschreiten.	<i>MPS</i> , <i>LPI</i>
2 <i>Nicht-linear</i> : Die Indexwerte und deren obere oder untere Grenze sind wie bei Typ 1 vom Waldanteil abhängig, zeigen aber keinen linearen Verlauf. Die Spannweite des potentiellen Wertebereiches kann aber ebenfalls in Abhängigkeit des Waldanteils geschätzt werden.	<i>ED</i> , <i>LSI</i>
3 <i>Unabhängig</i> : Die Indexwerte sind unabhängig vom Waldanteil und zeigen keinen typischen Trend. Unter Umständen können untere oder obere Grenzwerte der Indizes durch geeignete Funktionen geschätzt werden.	<i>MSI</i> , <i>PD</i> <i>DLFD</i> , <i>MPFD</i>

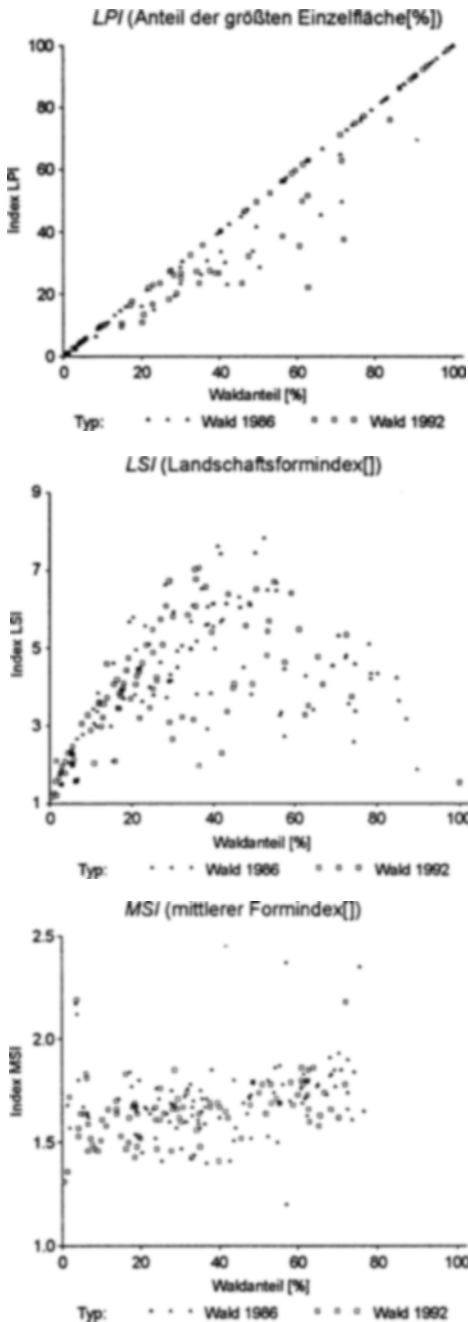


Abb. 2. Verschiedene Typen des Zusammenhangs zwischen Indexwerten und Waldanteil (vgl. Tabelle 3)

Fig. 2. Different types of relationship between indices and the forest cover percent (see also Table 3)

In Abbildung 2 sind die in Tabelle 3 klassifizierten Zusammenhänge zwischen Indexwerten und Waldfläche deutlich zu erkennen. Ist der Zusammenhang zwischen den Indizes und der Waldfläche bekannt, so kann der Waldflächenanteil mit den Indizes kombiniert und zur speziellen Differenzierung von Strukturen in diesen Gebieten verwendet werden.

#### 4. Erfassung der Struktur mit Hilfe von Stichproben

Soll ein Indexwert tendenzfrei aus kleinen Stichprobenflächen geschätzt werden, so setzt dies voraus, daß die in den Stichprobenflächen beobachtbare Flächenstruktur im Mittel jener des Gesamtbildes entspricht. Zwei Überlegungen lassen jedoch erwarten, daß einfache Hochrechnungen aus Stichproben nicht zu tendenzfreien und konsistenten Schätzungen führen werden:

- Die Zerschneidung von Einzelflächen bei der Bildung der Stichprobenausschnitte führt zu nicht erwartungstreuen Schätzwerten für die Anzahl und mittlere Größe der Flächen.
- Die Tatsache, daß sich in einem Gesamtgebiet räumlich und skalierungsabhängig unterschiedliche Flächenstrukturen überlagern.

Nur wenige Studien befassen sich mit der Erfassung struktureller Diversität aus Stichproben. HUNSAKER et al. (1994) fanden befriedigende Ergebnisse für die Schätzung des Flächenanteils der einzelnen Landschaftstypen, mit Ausnahme seltener Klassen mit geringen Flächenanteilen. Für die Messung der Komplexität mit Hilfe von fraktalen Indizes – vergleichbar dem Index DLFD – konnten die Stichproben nicht empfohlen werden. Auch für die hier nicht behandelten Indizes Dominanz, Contagion und Häufigkeit verschiedener Randlinientypen waren die Ergebnisse unbefriedigend. HUNSAKER et al. führen dies vor allem auf eine zu geringe Fläche der Hexagone zurück, die viele Zerschneidungen zur Folge hat und somit verzerrte Werte für die Anzahl von Einzelflächen liefert.



In der hier vorliegenden Studie wurden die Indexkomponenten Waldfläche (*LAND*), Anzahl der Waldeinzelflächen (*n*) und Randlinienlänge (*e*) untersucht. Für jede der 100 Stichproben pro Ausschnittgröße wurde der Gesamtwert der drei Größen geschätzt. Aus Summe bzw. Mittelwert der 100 zufällig gewählten Kartenausschnitte pro Ausschnittgröße wurden dann die entsprechenden Quotienten berechnet.

In Abbildung 3 sind die Differenzen der Schätzungen in Prozent des Gesamtwertes dargestellt. Es ist deutlich erkennbar, daß bestimmte Indexwerte von der Größe der Ausschnitte abhängig sind aus denen sie berechnet wurden.

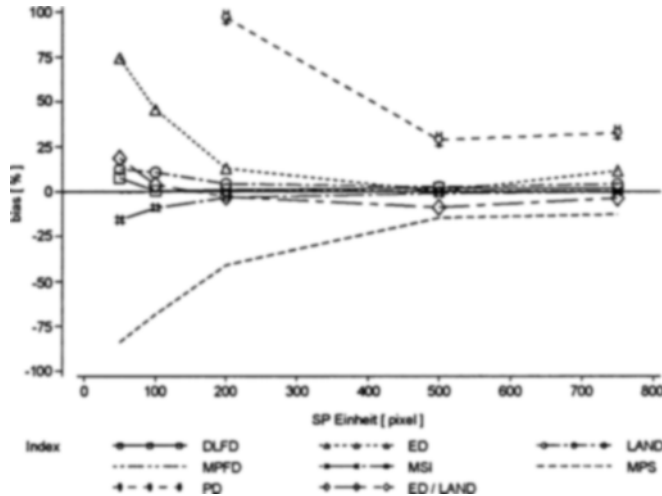


Abb. 3. Abhängigkeit der geschätzten Indexwerte von der Ausschnittgröße

Fig. 3. Sample based index values as a function of sample plot size (size of windows)

Eine Ursache für die festgestellten Abhängigkeiten der Indizes *PD* und *MPS* ist die Zerschneidung von Einzelflächen. Bei der Schätzung der Indizes entstehen durch die Bildung von Ausschnitten mehr Einzelflächen pro Einheit als tatsächlich vorhanden sind. Die Einzelflächendichte (*PD*) überschätzt daher bei kleinen Ausschnittgrößen den wahren Wert. Für die mittlere Einzelflächengröße (*MPS*) gilt, daß große Einzelflächen erst dann auch als eine einzige Fläche erkannt werden, wenn die gewählte Ausschnittgröße die Größe dieser Einzelflächen deutlich überschreitet. Daher wird bei kleinen Ausschnittgrößen die mittlere Einzelflächengröße unterschätzt. Bei den hier untersuchten Strukturen werden diese Überlegungen allerdings durch eine breite Amplitude von Einzelflächengrößen beeinflusst. Eindeutige Aussagen über die notwendige Größe des Ausschnitts für tendenzfreie Schätzungen sind nicht möglich.

Für die Randlinienlänge ergeben sich wie beim Waldanteil erwartungstreue Schätzungen. Die Überschätzung bei kleineren Ausschnitten ist im Falle der Randlinienlänge auf die Berechnungsmethode zurückzuführen, die die Zerschneidungslinien von Einzelflächen als Randlinien behandelt. Wählt man als Bezugsgröße für die absolute Randlinienlänge nicht die gesamte Stichprobenfläche, sondern nur die Waldfläche (Index *ED/LAND*) ist die Verzerrung etwas geringer und bereits ab einer Größe von 100 Pixel annähernd Null (Abbildung 3). Ebenso gute Resultate zeigt der mittlere Formindex (*MSI*), der nur bei kleinen Ausschnittgrößen den wahren Wert unterschätzt.

Die Stichprobenergebnisse für den fraktalen Index *DLFD*, der aus den log-transformierten Größen Umfang und Fläche gebildet wird, sind nahezu unabhängig von der Ausschnitt-

größe. Die Differenzen zum wahren Wert sind relativ gering und zeigen kein eindeutig tendenzielles Verhalten.

In Tabelle 4 sind die Eigenschaften aller untersuchten Indizes zusammengefaßt.

Table 4. Zusammenfassung der Eigenschaften der vorgestellten Indizes

Table 4. Overview of the properties of the indices analysed

Gruppe	Differenzierung (geeignete Indizes)	Korrelation (unkor- reliert mit)*	Skalenin- varianz	Abhängig vom Waldanteil (Typ)	Tendenz frei schätzbar
Größe/Anzahl	LAND	PD, DLF	ja	-	ja
	LPI	PD, LSI, DLF	ja	linear	-
	PD	LPI, LSI	nein	unkorreliert	nein
	MPS	ED, LSI, MPFD	nein	linear	nein
Form	ED	MPS	nein	nicht linear	ja
	LSI	MSI, MPS, LPI, PD	ja	nicht linear	-
	MSI	LSI, PD	ja	unkorreliert	(ja)
	DLFD	LPI, LAND	(ja)	unkorreliert	ja
	MPFD	LPI, LAND, MPS	(ja)	unkorreliert	ja

\*  $\alpha = 0,05$

## Diskussion

Die Studie beschreibt Indizes zur Charakterisierung von Flächenstrukturen auf der Basis von Rasterbildern. Zur Verdeutlichung der generellen Indexeigenschaften wurden Wald/Nichtwaldstrukturen untersucht. Für die Auswertung wurde angenommen, daß keine Klassifizierungsfehler vorliegen. In der praktischen Anwendung spielt diese Fehlerquelle jedoch eine wesentliche Rolle, insbesondere bei der Erkennung von Strukturveränderungen: Fehlklassifizierungen können solche Veränderungen vortäuschen bzw. die Ergebnisse verzerren (vgl. hierzu auch HESS, 1994).

Die meisten der untersuchten Indizes zeigen gute differenzierende Eigenschaften, wobei einige Indizes hoch korreliert sind. Das generelle Verhalten der Indizes bei Skalierungsänderung ist hier klar zu erkennen. Im konkreten Anwendungsfall wird die Abhängigkeit der Indexwerte von einer Skalierungsänderung weniger klar vorhersagbar sein, da diese zur Auflösung bzw. Differenzierung von Feinstrukturen führt. Grundsätzlich bezieht sich ein Strukturkennwert nur auf den Skalenbereich, aus dem er abgeleitet wurde. Während die Skaleninvarianzeigenschaften vor allem von der Zu- oder Abnahme struktureller Details bei Skalierungsänderung abhängen, spielt bei der Schätzung der Indexwerte neben der Homogenität der vorhandenen Strukturen die Größe der Stichprobeneinheit eine wichtige Rolle.

Die untersuchten Indizes zeigen bezüglich Differenzierung, Korrelation, Skaleninvarianz und Schätzung aus Stichproben unterschiedliches Verhalten. Auch in der Literatur wird wiederholt darauf hingewiesen (DALE et al., 1995, S. 49; RIPPLE et al., 1991, S. 74), daß es keinen *einzelnen Index* gibt, der das komplexe Phänomen „Flächenstruktur“ in seiner Gesamtheit alleine abzubilden vermag. Da viele Bestimmungsgrößen Einfluß auf die Zielgröße „Flächenstruktur“ nehmen, ist in den meisten Fällen die Kombination mehrerer Indizes angezeigt.

## Dank

Die vorliegende Studie basiert auf Ergebnissen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsprojektes (KL 894/2-1). Die Autoren danken der DFG für die Förderung dieses Projektes.

Herrn OLAF KÜGLER danken die Autoren für seine effiziente Unterstützung bei der Durchführung der Indexberechnungen.

## Literatur

- BENSON, B. J.; MCKENZIE, M. D., 1995: Effects of sensor spatial resolution on landscape structure parameters. *Landscape Ecology* 10, No. 2, S. 113–120.
- BURROUGH, P. A., 1986: Principles of geographic information systems for land resources assessment. Monographs on soil and resource survey No. 12. Oxford University press. 191 S.
- COSEFORMA, 1995: Inventario Forestal de Región Huetar Norte. Resumen de Resultados. II edición. Costa Rica, Marzo 1995. Documento del proyecto COSEFORMA.
- COCHRAN, W. G., 1977: Sampling techniques, 3rd edition. John Wiley & Sons, New York. 428 S.
- DALE, H. V.; OFFERMAN, H.; FROHN, R.; GARDNER, R., 1995: Landscape characterization and biodiversity research. In BOYLE, T. J. B., BOONTAWEE, B. (Hrsg.): Measuring and monitoring biodiversity in tropical and temperate forests. Proceedings of a IUFRO Symposium, Chiang Mai, Thailand 1994, S. 47–65.
- GARDNER, R. H.; MILNE, B. T.; TURNER, M. G.; O'NEILL, R. V., 1987: Neutral models for the analysis of broad scale landscape pattern. *Landscape Ecology* 1, No. 1, S. 15–28.
- GARDNER, R. H.; TURNER, M. G.; DALE, V. H.; O'NEILL, R. V., 1992: A percolation model of ecological flows. In HANSEN, A. J. et al. (eds.): Landscape boundaries, consequences for biotic diversity and ecological flows. Springer Vlg. New York, S. 259–269.
- GUSTAFSON, E. J.; PARKER, G. R., 1992: Relationship between landcover proportion and indices of landscape spatial pattern. *Landscape Ecology* 7, No. 2, S. 101–110.
- HESS, G., 1994: Pattern and error in landscape ecology: A commentary. *Landscape Ecology* 9, No. 1, S. 3–5.
- HUNSAKER, C. T.; O'NEILL, R. V.; JACKSON, B. L.; TIMMINS, S. P.; LEVINE, D. A.; NORTON, D. J., 1994: Sampling to characterize landscape pattern. *Landscape Ecology* 9, No. 3, S. 207–226.
- LUND, H. G., 1998 (Hrsg.): IUFRO Guidelines for designing multipurpose-resource inventories. IUFRO World series vol. 8, 216 S.
- KLEINN, CH.; TRAUB, B.; DEES, M., 1995: Calibrating forest cover estimates from coarse resolution images with samples of high resolution images – a model study on possible effects of misregistration –. Proceedings of the meeting of IUFRO S. 4.11–00 held at IUFRO XX World congress, 6–12 August 1995, Tampere, Finland, S. 210–219.
- KÖHL, M.; PAIVINEN, R., 1996: Definition of a system of nomenclature for Mapping European Forests and for compiling a pan European Forest Information System. Ispra, JRC, Joensuu, EFI, WSL, EUR 16416 EN, 238 S.
- KOOP, H.; RIJKSEN, H. D.; WIND, J., 1995: Tools to diagnose forest integrity; an appraisal method substantiated by Silvi-Star assessment of diversity and forest structure. In: BOYLE, T. J. B. and B. BOONTAWEE (eds.): Measuring and Monitoring Biodiversity in Tropical and Temperate Forests. CIFOR, Bogor, Indonesia.
- KOROTKOV, A., 1995: UN-ECE/FAO Forest Resources Assessment: Retrospective and look in the future. In: KENNEDY, P.; PAIVINEN, R.; ROIHUVUO, L. (Hrsg.): Proceedings of an International Workshop on Designing a System of Nomenclature for European forest Mapping. 13–14 June 1994, Joensuu, Finland. ECE Report EUR 16113 EN, Luxembourg, S. 63–76.
- KRUMMEL, J. R.; GARDNER, R. H.; SUGIHARA, G.; O'NEILL, R. V.; COLEMAN, P. R., 1987: Landscape patterns in a disturbed environment. *OIKOS* 48, S. 321–324.
- MAGURRAN, A. E., 1988: Ecological diversity and its measurement. Croom Helm, London. 179 S.
- MCGARIGAL, K.; MARKS, B. J., 1995: FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. General Technical Report 351, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station (PNW-GTR-351), Portland, Oregon.
- MEENTEMEYER, V.; BOX, E. O., 1987: Scale effects in landscape studies. In: TURNER, M. G. (ed.): Landscape heterogeneity and disturbance. *Ecological Studies* 64, S. 15–34.
- MILNE, B. T., 1991: Lessons from applying fractal models to landscape patterns. In: TURNER, M. G.; GARDNER, R. H., (Hrsg.): Quantitative methods in landscape ecology. Springer Verlag New York, S. 199–235.
- O'NEILL, R. V.; GARDNER, R. H.; TURNER, M. G., 1992: A hierarchical neutral model for landscape analysis. *Landscape Ecology* 7, No. 1, S. 55–61.
- O'NEILL, R. V.; KRUMMEL, J. R.; GARDNER, R. H.; SUGIHARA, G.; JACKSON, B.; DEANGELIS, D. I.; MILNE, B. T.; TURNER, M. G.; ZYGMUNT, B.; CHRISTENSEN, S. W.; DALE, V. H.; GRAHAM, R. L., 1988: Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology* 1, No. 3, S. 153–162.
- PERSSON, R.; JANZ, K., 1997: Assessment and Monitoring of Forst and Tree Resources. World Forestry Congress. Antalya, Turkey. Topic 1, S. 17–29.
- RIITERS, K. H.; O'NEILL, R. V.; HUNSAKER, C. T.; WICKHAM, J. D.; YANKEE, D. H.; TIMMINS, S. P.; JONES, K. B.; JACKSON, B. L., 1995: A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. *Landscape Ecology* 10, No. 1, S. 23–39.
- RIPPLE, W. J.; BRADSHAW, G. A.; SPIES, T. A., 1991: Measuring forest landscape patterns in the cascade range of Oregon, U.S.A. *Biological Conservation* 57, S. 73–88.

- TRAUB, B.; KLEINN, CH., 1997: Quantitative Charakterisierung von Waldflächenformen. AFJZ, 168. Jg., Heft 2, S. 30–39.
- TRAUB, B.; KLEINN, CH.; DEES, M.; PELZ, D. R., 1995: Calibrating AVHRR Tropical Forest area estimates with TM sample images. Proceedings of the meeting of IUFRO S. 4.11–00 held at IUFRO XX World congress, 6–12 August 1995, Tampere, Finland, S. 229–239.
- TURNER, M. G., 1989: Landscape ecology: The effect of pattern on process. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 1989, 20, S. 171–197.
- TURNER, M. G.; RUSCHER, C. L., 1988: Changes in landscape patterns in Georgia. *Landscape Ecology* 1, No. 4, S. 241–251.
- TURNER, M. G.; O'NEILL, R. V.; GARDNER, R. H.; MILNE, B. T., 1989: Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology* 3, No. 3/4, S. 153–162.

*Anschrift des Verfassers:* Dr. BERTHOLD TRAUB, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Zürcherstraße 111, CH-8903 Birmensdorf, Schweiz