

Indikatoren zur Charakterisierung der Ökoeffizienz von Siedlungsstrukturen – exemplarische Ergebnisse unter Verwendung verschiedener Geodaten

Nguyen Xuan THINH und Ulrich SCHUMACHER

Zusammenfassung

Die Begriffe „Ökoeffizienz von Siedlungsstrukturen“ und „ökoeffiziente Siedlungsstrukturen“ sind relativ neu und operationell noch nicht etabliert. Es fehlt international eine Systematisierung von Indikatoren zur Messung der Ökoeffizienz von Siedlungsstrukturen. Um einen theoretischen Zugang zu erhalten, soll das Konzept der Ökoeffizienz von Produkten (SCHMIDHEINY 1992) auf Siedlungsstrukturen übertragen werden. Zur theoretischen Fundierung der Entwicklung von Indikatoren dient eine Kosten-Nutzen-Matrix. Eine empirische Untersuchung wird exemplarisch für die beiden Indikatoren Zerklüftungs- und Vernetzungsgrad der Siedlungsfläche dargestellt. Die GIS-gestützte Ermittlung von Indikatorwerten für die Bundesrepublik Deutschland bzw. ein Bundesland auf Kreisebene zeigt bei beiden Indikatoren eine hohe Korrelation der Werte für die Geodatenätze CORINE und ATKIS trotz starker Unterschiede in der räumlichen Auflösung.

1 Einführung

Im Gegensatz zu nachhaltigen Stadt- und Siedlungsstrukturen (Sustainable Urban Form) sind die Begriffe „Ökoeffizienz von Siedlungsstrukturen“ und „ökoeffiziente Siedlungsstrukturen“ relativ neu. In der Literatur gibt es zahlreiche Publikationen über nachhaltige Stadt- und Siedlungsstrukturen: So definiert z. B. das von WILLIAMS et al. herausgegebene Buch (2001) Elemente der nachhaltigen Stadt (Größe, Dichte, Konfiguration, Städtebau und Qualität) von der Makro- bis zur Mikroskala, beschreibt komplexe Probleme bei der Definition und Entwicklung der nachhaltigen Stadt und stellt gute Praxisbeispiele aus Europa, den USA und Australien vor. Dieses Buch widerspiegelt einen Stand der Diskussion über die nachhaltige und kompakte Stadt. Weitere Monographien über diese Thematik und die kompakte Stadt findet man beispielsweise bei LYNCH (1984), WENTZ (2000), FRUMKIN et al. (2004), NAESS (2006) und DEAKIN et al. (2007). Vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeitsdiskussion wurde das Ökoeffizienzkonzept für Produkte 1992 vom World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) anlässlich der UN-Konferenz in Rio de Janeiro eingeführt und als Optimierungsaufgabe wie folgt formuliert:

Ökoeffizienz := [Wirtschaftlicher Wert eines Produkts] / [Verbrauchsmenge von Rohstoff und Energie] → max!

Der vorliegende Aufsatz beschreibt eine Übertragung dieses Konzeptes von Produkten auf Siedlungsstrukturen, um deren Ökoeffizienz zu charakterisieren. Dazu ist es erforderlich, geeignete Indikatoren zu finden bzw. zu entwickeln. Mit Hilfe vorhandener und allgemein zugänglicher Geodaten werden ausgewählte Indikatoren GIS-gestützt ermittelt und räumli-

che Disparitäten bei der Indikatorenausprägung auf verschiedenen Maßstabsebenen analysiert, um einen Beitrag für die nachhaltige Raumplanung zu leisten.

2 Theoretische Fundierung zur Entwicklung von Indikatoren

2.1 Kosten-Nutzen-Matrix

In der internationalen Literatur fehlt eine Systematisierung von Indikatoren zur Messung der Ökoeffizienz von Siedlungsstrukturen, auch wenn zahlreiche Indikatorensysteme für nachhaltige Raumstrukturen zu finden sind. Zur theoretischen Fundierung und Auswahl geeigneter Indikatoren wird die Ökoeffizienz von Siedlungsstrukturen analog zum Konzept der Ökoeffizienz von Produkten formal wie folgt definiert:

Ökoeffizienz von Siedlungsstrukturen bedeutet die immer bessere Bereitstellung von Nutzen/Funktionen bzw. Dienstleistungen von Siedlungssystemen bei laufend abnehmendem Verbrauch natürlicher Ressourcen (Flächen, Material und Energie).

Mit anderen Worten: Eine Siedlungsstruktur wird umso ökoeffizienter, wenn sie mehr Nutzen bietet und/oder gleichzeitig weniger ökologische Kosten in Form von Flächeninanspruchnahme, dem Verbrauch von Materialien, Rohstoffen sowie Energie und dem Emitieren von Lärm und Schadstoffen verursacht. Man kann die Ökoeffizienz von Siedlungsstrukturen (OEKO_X) abstrakt als folgende Optimierungsaufgabe formulieren:

$$\text{OEKO}_X := \frac{F_{\text{Nutzen}}}{F_{\text{Ressourcenaufwand \& Umweltbelastung}}} = \frac{F_{\text{Nutzen}}}{F_{\text{Kosten}}} \rightarrow \max!$$

Dieses theoretische Konstrukt fordert die Maximierung des Nutzens einer Siedlungsstruktur pro Einheit Ressourcenaufwand und Umweltbelastung. Die Maximierung des Nutzens einer Siedlung bedeutet z. B., dass die Siedlung mehr Menschen die Möglichkeit zum Wohnen, Arbeiten, Bilden und Erholen mit höherer Lebensqualität bietet und gleichzeitig eine höhere Bruttowertschöpfung produziert. Die Quantifizierung dieses Quotienten erfordert eine Aufstellung komplexer Größen und Zusammenfassung in messbaren Variablen einheitlicher Dimension, die Funktionen des Nutzens und der Kosten F_{Nutzen} bzw. F_{Kosten} für eine allgemeine Siedlung darstellen.

Der Nutzen kann in folgende Kategorien aufgeteilt werden:

- *Grunddaseinsfunktionen (N1),*
- *Ökonomisches Leistungsvermögen (N2) und*
- *Lebens-, Umwelt- und raumstrukturelle Qualität (N3).*

Die Kosten (Ressourcenaufwand & Umweltbelastung) beinhalten folgende Komponenten:

- *Flächeninanspruchnahme (K1),*
- *Stofflicher Verbrauch (K2),*
- *Energieverbrauch (K3),*
- *Transportaufwand von Personen und Gütern (K4) und*
- *Emission von Lärm und Schadstoffen (K5).*

Zur Systematisierung wird eine Matrix aufgestellt, in der alle Kosten-Kategorien mit allen Nutzen-Kategorien kombiniert werden:

Kosten-Nutzen-Matrix	Flächeninanspruchnahme (K1)	Stofflicher Verbrauch (K2)	Energieverbrauch (K3)	Transportaufwand (K4)	Lärm- u. Schadstoff-Emission (K5)
Grunddaseinsfunktionen (N1)					
Ökonomisches Leistungsvermögen (N2)					
Lebens-, Umwelt- und raumstrukturelle Qualität (N3)					

Abb. 1: Kosten-Nutzen-Matrix „Ökoeffizienz von Siedlungsstrukturen“

Um ein Indikatorensystem zur Messung der Ökoeffizienz von Siedlungsstrukturen systematisch zu entwickeln und theoretisch zu begründen, ist jedes Matrixfeld N_iK_j ($i=1(1)3$, $j=1(1)5$) speziell zu betrachten. Beispielsweise können in das Matrixfeld N_1K_1 folgende Indikatoren aufgenommen werden:

- *Siedlungsdichte* [Einwohner je ha Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV)],
- *E-A-Dichte* [Einwohner & Arbeitsplätze je ha SuV] und
- *Wohnungsdichte* [Anzahl der Wohnungen je ha SuV].

Für jedes Matrixfeld ist mindestens ein typischer quantifizierbarer Indikator auszuwählen. Hierzu gehört eine Beschreibung des Indikators mit Darstellung des Berechnungsverfahrens und der Datengrundlage bzw. -verfügbarkeit. Weil dieser Arbeitsschritt z. Z. noch nicht abgeschlossen ist, liegt hier der Fokus exemplarisch auf der theoretischen Begründung und GIS-gestützten Ermittlung zweier Indikatoren.

2.2 Zwei potenzielle Indikatoren

Wenn zwei Siedlungen die gleiche Fläche beanspruchen, so unterscheidet sich ihre raumstrukturelle Qualität durch die räumliche Anordnung unterschiedlicher Nutzungsarten, welche wiederum durch Kompaktheitsmaße und Vernetzungsgrade charakterisiert werden (vgl. ARLT et al. 2001, THINH 2002). Kompakt gebaute Städte mit hoher Nutzungsmischung und kurzen Wegen zwischen Wohnung, Arbeit, Versorgung, Bildung, Erholung und Kommunikation bringen ihren Bewohnern mehr Lebensqualität und Sozialverträglichkeit (vgl. STETE 1995, S. 42). Deshalb sind die Kompaktheitsmaße und Vernetzungsgrade der Siedlungsflächen dem Matrixfeld N_3K_1 zuzuordnen. Für die empirische Untersuchung wird der Zerklüftungsgrad stellvertretend für Kompaktheitsmaße verwendet. Bezüglich der Berechnungsalgorithmen des Zerklüftungs- und Vernetzungsgrades sei auf THINH (2002) und THINH et al. (2007) verwiesen.

3 Exemplarische Ergebnisse bei ausgewählten Indikatoren

3.1 Geodatenbasis

Ausgewählte Indikatoren werden für die Bundesrepublik Deutschland bzw. den Freistaat Sachsen auf Kreisebene ermittelt. Auf der Basis von CORINE-Daten (Land Cover 2000) wurden der Zerklüftungs- und Vernetzungsgrad der Siedlungsfläche für alle deutschen Landkreise und kreisfreien Städte berechnet. Dafür wurden einzelne Bodenbedeckungsarten den Funktionen Wohnen (1.1.1-1.1.2) und Industrie/Gewerbe/Verkehr (1.2.1-1.3.3) zugeordnet. Weil stark differenzierte Siedlungsstrukturen durch die CORINE-Daten auf Grund ihres Bezugsmaßstabes (1 : 100 000) nur in vereinfachter Form wiedergegeben und dadurch die Werte von Strukturindikatoren beeinflusst werden, kommen auch Vektordaten des Basis-DLM (Digitales Landschaftsmodell 1 : 25 000) aus ATKIS zur Anwendung. Dafür wurden ausgewählte Objektarten für Wohnen (2111, 2113) sowie Industrie/Gewerbe/Verkehr (2112, 2114, 2121-2135, 2211-2221, 2225-2229, 2301, 3101-3524) zusammengefasst. Somit kann die potenzielle Eignung beider Datensätze zur Berechnung entsprechender Strukturparameter eingeschätzt werden.

3.2 Empirische Ergebnisse

Der *Zerklüftungsgrad* der Siedlungsfläche in Deutschland zeigt ein differenziertes Bild, wobei die kreisfreien Städte generell niedrigere Werte, also eine kompaktere Siedlungsstruktur als die Landkreise besitzen. Hohe Zerklüftungsgrade finden sich v. a. bei langgestreckten Siedlungen im Mittelgebirgsvorland. Niedrige Zerklüftungsgrade sind dagegen für suburbane Räume mit großen Industrie- und Gewerbegebieten sowie Tagebauflächen typisch (Zuordnung der Abbau- zur Siedlungsfläche).

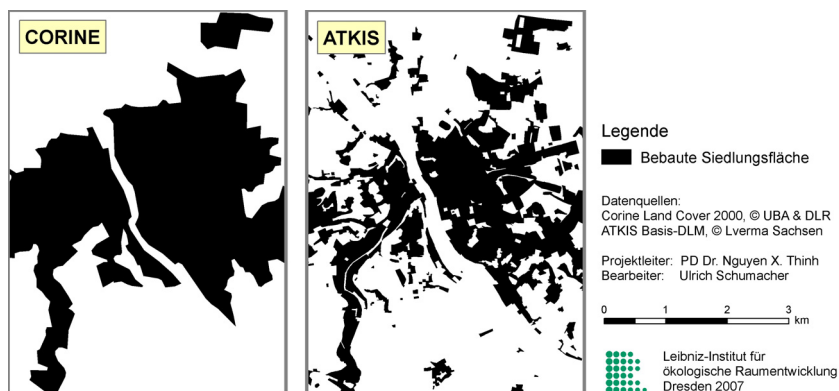


Abb. 2: Zerklüftung der bebauten Siedlungsfläche – Widerspiegelung durch CORINE- und ATKIS-Daten am Beispiel der Stadt Meißen

Der Einfluss der Geodatenbasis auf die Berechnung des Zerklüftungsgrades wurde für CORINE- und ATKIS-Daten am Beispiel von Sachsen und dem Zeitschnitt 2000 getestet (siehe Abb. 2). Erwartungsgemäß hängen die absoluten Werte des Zerklüftungsgrades vom Erfassungsmaßstab bzw. Generalisierungsgrad der verwendeten Daten ab: Je größer der

Maßstab, desto länger sind die Kanten der Vektordaten und folglich desto größer der Zerklüftungsgrad. Trotzdem ergab die empirische Analyse einen starken Zusammenhang der Zerklüftungsgrade für beide o. g. Geodaten (Korrelationskoeffizient $r = 0,92$). Diese gute Korrelation spricht prinzipiell für eine Verwendung der europaweit verfügbaren CORINE-Daten zur Berechnung der Indikatorwerte bei Vergleichsuntersuchungen.

In Einzelfällen können jedoch Abweichungen von der starken Korrelation auftreten, was sich im Quotienten der Zerklüftungsgrade zeigt: Bei kleinteiligen Strukturen im städtischen wie im ländlichen Bereich spiegeln die detaillierteren ATKIS-Daten die reale Situation deutlich besser wider. Im Falle ausgeräumter Landschaften mit groben Siedlungsstrukturen besitzt der Quotient der Zerklüftungsgrade aber einen kleineren Wert.

Der *Vernetzungsgrad* zwischen Wohnbaufläche sowie Industrie-, Gewerbe- und Verkehrsfläche innerhalb von Siedlungen in Deutschland zeigt ebenfalls ein differenziertes Bild. Dabei besitzen die kreisfreien Städte generell höhere Vernetzungsgrade. Hohe Vernetzungsgrade finden sich außerdem in einigen altindustrialisierten Landkreisen mit kompakter Siedlungsstruktur, wo die historisch gewachsene räumliche Nähe von Wohn- und Arbeitsstätten greift. Niedrige Vernetzungsgrade finden sich dagegen in ländlich geprägten und schwach besiedelten Gebieten.

Der Einfluss der Geodatenbasis auf die Berechnung des Vernetzungsgrades wurde ebenfalls getestet (siehe Abb. 3). Die absoluten Werte sind auch hier vom Erfassungsmaßstab der Daten abhängig: Je größer der Maßstab, desto feingliedriger sind die Vektordaten und meist desto größer der Vernetzungsgrad. Die empirische Analyse ergab einen starken Zusammenhang der Vernetzungsgrade für beide o. g. Geodaten (Korrelationskoeffizient $r = 0,88$). Diese gute Korrelation spricht zunächst für eine Verwendung der CORINE-Daten bei der Berechnung der Indikatorwerte, deutliche Ausreißer setzen jedoch ein Achtungszeichen.

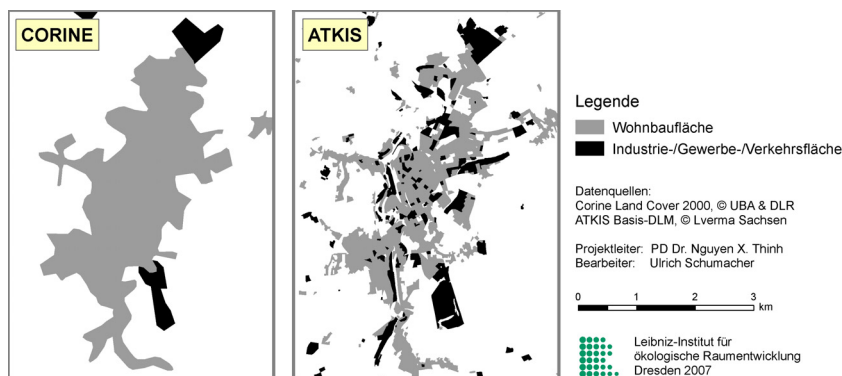


Abb. 3: Vernetzung der Funktionen Wohnen und Arbeiten in der Siedlungsfläche – Widerspiegelung durch CORINE- und ATKIS-Daten am Beispiel der Stadt Anna-berg-Buchholz

In mehreren Fällen treten starke Abweichungen zwischen beiden Ergebnissen auf: Bei kleinteiligen Strukturen spiegeln die detaillierteren ATKIS-Daten die reale Situation wesentlich besser als die CORINE-Daten wider. Bei einem hohen Anteil ausgeräumter Land-

schaft mit groben Siedlungsstrukturen unterscheiden sich die Vernetzungsgrade nur mäßig. Besondere Beachtung verdient ein Fall, wo die ungenaueren CORINE-Daten sogar eine höhere Vernetzung zeigen (Stadt Zwickau): Hier erweisen sich die ATKIS-Daten als zu detailliert im Sinne der Aufgabenstellung, weil zahlreiche schmale Lücken zwischen Wohnbebauung und Gewerbeflächen geometrisch die Vernetzung unterbrechen.

4 Fazit

Hier wird kein fertiges Konzept für die Bewertung nachhaltiger Siedlungsstrukturen vorgestellt, sondern ein Beitrag zur Diskussion um geeignete Indikatoren und ihre GIS-gestützte Bestimmung für die Raumplanung geliefert. Das letztgenannte Beispiel beim Vernetzungsgrad zeigt, dass eine Anforderung an die Auflösung bzw. Genauigkeit von Geodaten nicht unbedingt in ihrer Maximierung, sondern in einer optimalen Generalisierungsstufe – abhängig von der jeweiligen Zielstellung – liegen sollte. Potenzielle Zusammenhänge zwischen den ermittelten Indikatoren und der Ökoeffizienz von Siedlungsstrukturen sind bei der Weiterbearbeitung des Themas noch stärker zu fokussieren.

Literatur

- ARLT, G., GÖSSEL, J., HEBER, B., HENNERSDORF, J., LEHMANN, I. & THINH, N. X. (2001): Auswirkungen städtischer Nutzungsstrukturen auf Bodenversiegelung und Bodenpreis. IÖR-Schriften, Band 34, Dresden.
- DEAKIN, M., MITCHELL, G., NIJKAMP, P. & VREEKER, R. (Eds.) (2007): Sustainable Urban Development. Routledge Taylor & Francis Group. London.
- FRUMKIN, H., FRANK, L. & JACKSON, R. (2004): Urban Sprawl and Public Health. Island Press. Washington, Covelo, London.
- LYNCH, K. (1984): Good City Form. MIT Press. Cambridge, Massachusetts.
- NAESS, P. (2006): Urban Structure Matters. Routledge Taylor & Francis Group. London.
- SCHMIDHEINY, S. (1992): Changing course – A global business perspective on development and environment. MIT Press. Cambridge, Massachusetts.
- STETE, G. (1995): Frauen unterwegs. Forderungen an die Stadtplanung. In: Internationales Verkehrswesen. Jg. 47, Nr. 1/2, 35-42.
- THINH, N. X. (2002): Entwicklung von AML-Programmen zur räumlichen Analyse der Flächennutzungsmuster von 116 kreisfreien Städten in Deutschland. In: Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, 6/2002, 409-422.
- THINH, N. X., SCHUMACHER, U. & GEIER, K. (2007): Modellierung und Bewertung der Ökoeffizienz von Siedlungsstrukturen – Ein pragmatischer Ansatz. In: GNAUCK, A. (Hrsg.): Modellierung und Simulation von Ökosystemen. Workshop Kölpinsee 2006, Shaker Verlag. Aachen (im Druck).
- WENTZ, M. (Hrsg.) (2000): Die kompakte Stadt. Campus Verlag. Frankfurt, New York.
- WILLIAMS, K., BURTON, E. & JENKS, M. (Eds.) (2001): Achieving Sustainable Urban Form. E & FN Spon. London, New York.