

Simulation städtischer und touristischer Flächenexpansionen als Grundlage für eine nachhaltige Entwicklung – Fernerkundung und GIS als Planungsinstrumente

Simone Naumann

(Dr. Simone Naumann, University of Education Heidelberg, Im Neuenheimer Feld 561, 69120 Heidelberg, Germany, naumann@ph-heidelberg.de)

1 ZUSAMMENFASSUNG

Eine der größten Begleiterscheinungen der Globalisierung ist die flächenhafte Ausdehnung von städtischen Räumen. Während am Ende der 1970er Jahre nur rund 38% der weltweiten Bevölkerung in Städten lebten, waren es 2008 bereits 50%. Diese (Sub-)Urbanisierungsprozesse (urban sprawl), die oftmals eng gekoppelt sind an sozioökonomischen Veränderungen und verstärkt zu Flächenumwidmungen führen, betreffen nicht nur die „klassischen Megacities“ sondern auch Regionen, die durch den Massentourismus geprägt sind.

Auf den Kanarischen Inseln erfolgt seit Beginn des Tourismus in den 1960er Jahren ein sozioökonomischer Wandel von einer Agrar- zu einer Dienstleistungsgesellschaft. Diese mit dem stetig wachsenden Tourismusboom einhergehenden ökonomischen und sozialen Veränderungen haben weit reichende Auswirkungen auf den Natur- und Kulturraum, insbesondere auf der Insel Teneriffa. Die steigende Zahl der Urlauber (1978: 1,3 Mio.; 2008: 5,3 Mio.) führt zu einer erhöhten Nachfrage nach touristischer Infrastruktur und damit zu einer verstärkten Flächeninanspruchnahme.

Zur Abschätzung der Folgen dieser Entwicklungen und zur Ableitung von Handlungsoptionen für (Gegen-) Maßnahmen bedarf es räumlicher Szenarien, die die Entwicklung der bebauten Flächen zweidimensional darstellen. Grundlage der Simulation hinsichtlich der Flächenexpansion stellen flächendeckende Satellitenbilddaten vom Typ LANDSAT 3 MSS (1978) und LANDSAT 7 ETM+ (2002) sowie Orthophotos (1978, 1996) von ausgewählten Teilregionen dar. Die mit Hilfe eines objektorientierten Ansatzes klassifizierten multiskalaren Fernerkundungsdaten gehen in eine Change-Detection-Analyse auf Basis einer Post-Klassifikations-Technik ein. Der demographische und sozioökonomische Wandel auf der Insel wird mittels Daten über die Entwicklung der Einwohner, der Beschäftigten in den einzelnen Sektoren und der Touristen in räumliche Informationen transformiert.

Die komplexe Modellierung der künftigen Dynamik der Siedlungen auf Teneriffa basiert auf einem integrativen Ansatz von Geographischen Informationssystemen (GIS) und Zellulären Automaten. Die Datengrundlage bilden sowohl sozioökonomische als auch naturräumliche Parameter. Die bimodale Struktur des Modells gliedert sich in die Analyse von positiven Einflussgrößen und Inhibitoren zur Ableitung von Potenzialflächen sowie in die Simulation des Wachstums der Siedlungen im eigentlichen Sinne. Die Gewichtung der einzelnen Parameter innerhalb des Modells ist aus multikriteriellen Entscheidungsverfahren und Korrelationsanalysen abgeleitet, in die die Datensätze von 1978 und 2002 einfließen. Die Validierung des Modells, die auf einem zusätzlichen Fernerkundungsdatensatz von 1988 basiert, umfasst die Überprüfung des Untersuchungszieles und die Aussagefähigkeit des Modells hinsichtlich verschiedener Gütekriterien.

2 URSACHEN UND FOLGEN DER FLÄCHENEXPANSION – DAS BEISPIEL TENERIFFA

Weltweit ist eine zunehmende Umwandlung von naturnahen Flächen in Siedlungs-, Verkehrs- und Industrieflächen zu verzeichnen. Folglich erfährt die Analyse der Veränderungen der Flächeninanspruchnahme und der Entwicklung des „urban sprawl“ in unterschiedlichen europäischen und außereuropäischen Agglomerationsräumen in den letzten Jahrzehnten einen immer größeren Stellenwert. Der wachsende Landschaftsverbrauch der Städte war bereits 1996 auf der UN-Stadttagung Habitat II in Istanbul Anlass das Leitbild der "kompakten Stadt" zu formulieren, um somit den zunehmenden „Flächenverbrauch“ zu minimieren (<http://www.un.org/Conferences/habitat/eng-stat/13/aus13.txt>).

Die direkten und indirekten Gründe für die zunehmende Flächeninanspruchnahme, wie Erschließung neuer Wohn-, Gewerbe- und Industriegebiete, Anstieg des Flächenbedarfs, Wanderungsbewegungen und Remanenz-Effekt sind regional unterschiedlich stark ausgebildet. Einhergehend mit diesen (Sub-)Urbanisierungsprozessen durch Flächenexpansion ergeben sich aufgrund der Multifunktionalität der Ressource Boden komplexe ökologische, ökonomische und sozialen Folgen. Die Bandbreite ökologischer Wirkungen der zunehmenden Flächeninanspruchnahme reicht von lokalen Umweltveränderungen, wie

Bodenabtrag und Bodenversiegelung bei baulichen Eingriffen, über additive Prozesse (z.B. Verlust hochwertiger landwirtschaftlicher Böden auf regionaler oder überregionaler Ebene) bis hin zu synergistischen, multikausalen Belastungs- und Schädigungsformen (wie z.B. der Reduzierung der biologischen Vielfalt durch Fragmentierung) (Siedentop, Kausch 2003). Die ökonomischen Folgen zeigen sich vor allem in den zunehmenden Kosten für Infrastrukturbereitstellung als Reaktion auf siedlungsräumliche Expansion-Trends. Demnach entfallen bei dezentralen und dispers bebauten Siedlungsgebieten höhere infrastruktureller Folgekosten als bei verdichteten, nach innen gerichteten Siedlungsweisen (Siedentop 2004). Die Wanderungsprozesse führen aufgrund der sozialen Selektivität zu regionalen Entmischungsprozessen und folglich auch zu finanziellen Mehrbelastungen der schrumpfenden Gemeinden.

2.1 Flächeninanspruchnahme durch Tourismus

Beliebte Urlaubsdestinationen wie Mallorca oder die Kanarischen Inseln sind durch einen weiteren maßgebenden Faktor geprägt, der die zunehmende Flächeninanspruchnahme ursächlich trägt: Massentourismus. Neben der Beherbergung, Verkehrsinfrastruktur, Gastronomie nehmen auch Freizeit-, Spiel- und Sportanlagen Flächen in Anspruch. Regionen in denen der Tourismus eine primäre Wirtschaftskraft darstellt, wenden nur selten ein nachhaltiges Flächenmanagement an. So wurden beispielsweise von 1950-1990 etwa die Hälfte der spanischen Küste für den Tourismus ausgebaut (Imbusch, Kahlenborn 2000). Aufgrund ihrer begrenzten Fläche per se und ihrer großen Beliebtheit bei Urlaubern sind besonders Inseln von den Folgen der zunehmenden Flächenversiegelung stark betroffen. Allein Teneriffa wurde 2008 von rund 5,3 Mio. Touristen besucht. Die Insel ist zwar mit 2.052 km² die größte des Kanarischen Archipels, aufgrund der naturräumlichen Gegebenheiten sind aber nur rund 19 % der Gesamtoberfläche der Insel bewohnbar.

Nur sechs Jahre nach dem Bau der ersten großen touristischen Anlage auf Teneriffa im Jahr 1890, das Gran Hotel Taoro im Orotavatal, wurden bereits 5.000 Touristen gezählt, was gleichzeitig als Beginn für die bis heute anhaltende „Blütezeit“ des Tourismussektors angesehen wird, der ab den 1960er Jahren in einen Massentourismus überging. Beeinflusst von einer zunehmenden Internationalisierung, die sich besonders auf die Tourismusbranche positiv auswirkte, stiegen die Touristenzahlen von 1960 mit 73.000 auf über 2 Mio. im Jahre 1975. Im Gegensatz dazu ging die landwirtschaftliche Produktion zurück: im Zeitraum von 1940 bis 1975 von 50 % auf 20 %. Der dienstleistende Sektor stieg im gleichen Zeitraum von 27 % auf 51 % und zwar insbesondere in den Bereichen Handel, Transport, Bauwirtschaft und Dienstleistungen (Castellano Martin 1999). Verstärkt seit 1992 erfährt der Tourismus auf dem Archipel einen bis heute anhaltenden enormen Aufschwung. Der Massentourismus konzentriert sich auf der Insel hauptsächlich auf zwei Küstenregionen: eine nördliche Zone mit Puerto de la Cruz als Zentrum und eine südliche mit den Städten Los Cristianos und Playas de la Americas. Diese beiden Regionen werden von rund 80 % der Touristen als Urlaubszielort gewählt.

Das Ansteigen des Wirtschaftswachstums um 3,6 % von 1975 bis 1990 findet seine Ursache in der Expansion des Tourismus-Sektors, der ca. 45 % des Bruttosozialproduktes umfasst. Demnach hat sich der Tourismus-Sektor zu einer führenden Rolle in der Wirtschaft der Insel entwickelt, was sich auch maßgeblich auf die Baubranche auswirkt. Nach Angaben von Martin Martin (1999) existieren innerhalb der Provinz Santa Cruz (Tenerife, La Palma, La Gomera, El Hierro) 7.000 Industrieunternehmen, von denen 3.803 in der Baubranche tätig sind. Dies bedeutet, dass 54,3 % der Industrie dem Subsektor Bauwirtschaft angehören. Begründet wird diese hohe Zahl durch den seit den 1970er Jahren vorherrschenden Tourismusboom. In einem Zeitungsinterview gab der Berater für Öffentlichkeitsarbeit, Wohnen und Wasser bekannt, dass seine Abteilung der größte Investor der autonomen Regierung sei (13,6 % laufende Ausgaben gegenüber 86,4 % Investitionen). So wurden allein 1999 für den Straßenbau rund 123 Mio. €, für Wasserleitungen 67 Mio.€ und rund 62 Mio. € für Hafenanlagen und Wohnungen ausgegeben. Die Konzentration der Siedlungen im Bereich der Fußstufe und deren Erweiterungen, die deutlich im Zusammenhang mit der touristischen Infrastruktur stehen bewirken eine Umwelt-Beeinträchtigung dieser Zonen, gerade im Bezug auf den steigenden Flächenverbrauch.

Die Entwicklung von einer Agrar- hin zu einer Dienstleistungsgesellschaft macht sich nicht nur in der Verlagerung der Zahl der Erwerbstätigen zum tertiären Sektor bemerkbar, sondern auch in der Aufgabe von landwirtschaftlichen Nutzflächen. Als Beispiele seien hier das Orotavatal genannt, dass jährlich 68 ha landwirtschaftlich genutzte Fläche verliert (Wildpret De la Torre 1995) sowie die sukzessiv wachsenden

Touristenstädte Los Cristianos und Playa de las Americas im Süden der Insel. Somit kommt auch bezüglich der Entwicklung des Tourismus dem Raumlimit und der Vulnerabilität der insularen Ökosysteme künftig eine besondere Rolle zu.

2.2 Folgen der Flächennutzungskonflikte

Eine Vielzahl von Untersuchungen über die Auswirkungen des (Massen-)Tourismus auf die Ökosystemen machen deutlich, dass die schwerwiegenden tourismusbedingten Folgen eher durch die Infrastruktur und den damit verbundenen baulichen Maßnahmen als durch die unmittelbaren Erholungsaktivitäten bedingt sind. Ein großes Konfliktpotenzial bietet die Standortwahl von touristischen Einrichtungen, die meist landschaftlich attraktive und zugleich ökosystemar sensitive Regionen bevorzugen, wie beispielsweise den Küstenraum. Die bei der touristischen Flächennutzung unvermeidliche Landerschließung führt zur Zerstörung und Fragmentierung von Biotoptypen, zu Bodenerosion und Lebensraumverlust. Zusätzlich werden die Ökosysteme indirekt durch hohen Wasserverbrauch, Abwasser- und Müllproblematik belastet. Touristische Aktivitäten, wie Wassersport, Golf, Trekking und Bergsport bewirken durch die Häufigkeit zwar keine massiven räumlichen negativen Einflüsse, können jedoch punktuell zu erheblichen Belastungen führen.

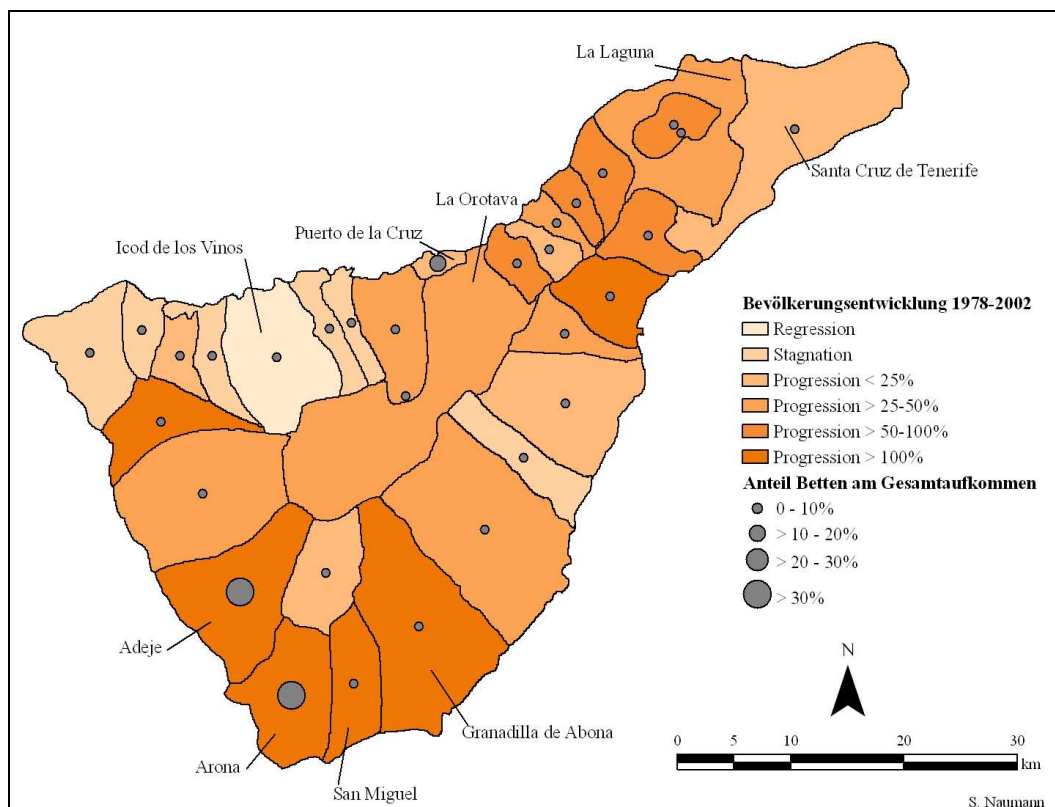


Abb. 1: Bevölkerungsentwicklung von 1978-2002 in den Gemeinden Teneriffas

Auf der Kanareninsel Teneriffa zeigt sich als Folge des touristischen Flächendrucks die zunehmende Aufgabe von Flächen mit traditionellem Ackerbau, vor allem in mittleren Höhenlagen, einhergehend mit Wanderungsbewegungen (Landflucht). Diese binnenmigratorischen, intraregionalen und intralokalen Prozesse und Umstrukturierungen der Bevölkerungsverteilung, als Folge des Tourismus zeigen sich in einem verstärkten Zuzug der arbeitnehmenden Bevölkerung in Gemeinden mit touristischen Zentren (vgl. Abb. 1). Eine eher stagnierende Entwicklung der Bevölkerungszahlen ist in den Gemeinden im äußersten Nordwesten und in Fasnia zu verzeichnen, wobei in Icod de los Vinos mit 15% Bevölkerungsschwund sogar ein rückläufiger Trend zu beobachten ist. Besonders auffällig ist die extreme Zunahme der Bevölkerung in den südlichsten Gemeinden, wie beispielsweise Adeje, Arona, San Miguel und Granadilla de Abona. Auch Ortschaften wie Tacoronte und El Sauzal weisen im Zeitraum 1978-2002 eine Bevölkerungszunahme auf, bedingt durch den hohen Attraktivitätsfaktor im Bezug auf die Nähe zur Universitätsstadt La Laguna und zur Hauptstadt Santa Cruz de Tenerife. Ein Vergleich der Bevölkerungszahlen und der Beschäftigten in den

einzelnen Wirtschaftssektoren zeigt die hohe Dependenz der Gemeinden vom Tourismus als Magnet für die Bevölkerung.

Die anfängliche Konzentration des Tourismus auf die mittleren Höhenlagen der Inselregionen verlagerte sich mit Beginn des Massentourismus ab den 1960er Jahren verstärkt in die Küstenregionen und damit in die semi-aride Fußstufe. Die schwerwiegendsten tourismusbedingten Auswirkungen auf Arten und Ökosysteme und auch die direkt messbaren gehen bei dem auf der Insel vorherrschenden Massen-, Ferien- und Club-Tourismus von der Infrastruktur und den damit verbundenen baulichen Maßnahmen aus. In erster Linie sind hier durch die in den letzten Jahrzehnten ständig steigenden Touristenzahlen die zunehmenden Baumaßnahmen vor allem in der südlichen Küstenregion der Insel zu nennen (Naumann 2006). Durch die Nutzungsänderung von Agrarflächen in touristische Urbanisationen werden natürlichen Landschaftselemente degradiert. Die massiven Bautätigkeiten führen durch die Beschaffung von Baumaterial zu einer weiteren Beeinträchtigung der Landschaft. So wird selbst aus Naturschutzgebieten Basalt gewonnen, um Wellenbrecher, Strandbefestigungsanlagen, Sport- und Fischerhäfen zu errichten. Auch die Entnahme von Sand an Stränden und in Barrancos sowie von pyroklastischen Material zur Gewinnung von Baumaterial sind Folgen dieses Baubooms.

Die wirtschaftliche Bedeutung des Tourismussektors, der 83% zum Bruttoinlandsprodukt beiträgt und die enormen Boden- und Bauspekulationen, die mit dem Tourismus einhergehen, bergen ein großes Konfliktpotenzial zwischen den ökonomischen und ökologischen Interessen. Auch die Ausweisung von Naturschutzgebieten ist bei einer derart großen Einwohnerzahl (2008: 886.033 Einwohner) und einer realen Einwohnerdichte (2002: 415 EW/km²) nicht ausreichend um die Erhaltung der ökologischen Vielfalt zu tragen, so eine Studie der United Nations Organization (UNO) über die Kanarischen Inseln. Stellt man diese Angaben den Touristenzahlen (Tourist-host contact) gegenüber, so kommen auf jeden Einwohner der Insel durchschnittlich 6,4 Touristen pro Jahr. Die Touristendichte pro km² beträgt 2.212, die Bettendichte 76 – Faktoren die bei der Entwicklung von raumplanerischen Konzepten zur Tragfähigkeit und Vulnerabilität berücksichtigt werden müssen. Gerade die ökologische Vielfalt stellt nach Umfrageergebnissen einen der größten Anziehungspunkte für die tinerfenischen Touristen dar. So gaben rund 24% der Befragten die Umgebung bzw. die Landschaft als Einflussfaktor für die Wahl ihres Urlaubszieles Teneriffa an (Ferrer, Cabrero 1995).

3 SIMULATION DER KÜNFTIGEN FLÄCHENENTWICKLUNG

Im Rahmen von Untersuchungen zur lokalen und globalen Veränderungen der Landschaftssysteme ist, neben der reinen Erfassung dieser Veränderungen, vor allem die Analyse des Wirkungsgefüges und damit die Abschätzung über potenzielle Entwicklungen in der Zukunft von großer Bedeutung. Die Ableitung von Handlungsoptionen für (Gegen-) Maßnahmen bedarf räumlicher Modelle und Szenarien, die die künftige Entwicklung der Flächeninanspruchnahme wiedergeben. Zur Einschätzung der weiteren Entwicklung erfolgt die Aufspaltung der Komplexität des Systems in eine Vielzahl von Teilsystemen. Die Instrumente eines Modells, die zur Prognose landschaftlicher Entwicklungen eingesetzt werden, müssen demnach sozioökonomische und naturräumliche Trends sowie alle wesentlichen Wirkungszusammenhängen zusammenführen und diese raumbezogen integrieren.

Die Forschung zur Analyse der sozioökonomischen und physisch geographischen Einflussfaktoren von Siedlungsentwicklungen unter Verwendung von Modellen, die die Komplexität der Systeme wiedergibt hat eine lange Tradition und erfährt in den letzten Jahren vor allem durch Städte- und Raumplaner, Wirtschaftsanalytiker und Ökologen eine hohe Nachfrage (vgl. Batty 2003). In der Forschung zu Flächennutzungsänderungen gibt es eine Vielzahl von Modellen, die der Vorhersage von Entwicklungen, der Ermittlung von Lösungsvorschlägen für Planungsprozesse oder der Untersuchung von Einflussgrößen dienen und auf unterschiedlichen räumlichen Ebenen operieren. Die Dokumentation von Veränderungen betroffener Regionen im Sinne des Suburbanisierungsprozesses erfolgt im weitesten Sinne unter Zuhilfenahme von Fernerkundungsdaten und GIS (vgl. Epstein, Payne, Kramer 2002).

3.1 Modellkonzeption zur Simulation künftiger Flächeninanspruchnahmen auf Teneriffa

Die Siedlungsentwicklung ist ein komplexer Prozess, der von unterschiedlichen sozioökonomischen und naturräumlichen Gegebenheiten beeinflusst wird. Die Simulation dieser Entwicklung muss folglich insofern simplifiziert werden, dass die einzelnen Faktoren und das Wirkungsgefüge insgesamt modellierbar bleiben

und dennoch ein realistisches funktionsbezogenes Resultat ergeben. Die Ableitung der „driving forces“ erfolgt über Veränderungs- und Korrelationsanalysen der Landbedeckung/-nutzung sowie sozioökonomischen Parameter. Das Grundgerüst des Modells zur künftigen Flächeninanspruchnahme stellt eine Kombination von Entscheidungsunterstützungs-Techniken (decision support systems, DSS) mit Geographischen Informationssystemen dar, die in eine Eignungs-/Potenzialanalyse mündet. Aus dieser multikriteriellen Entscheidungsanalyse resultiert eine Eignungs- bzw. Potenzialkarte in Form einer thematischen Karte, die aufzeigt welche Räume für die vorgegebene Nutzung geeignet sind. Während die Komplexität des Prozesses auf der deskriptiven Ebene in Geographischen Informationssystemen (GIS) verarbeitet werden können, erfordert die Modellierung der räumlich- und zeitlich-dynamischen sowie selbst-regulierenden Entwicklungen und Szenarien weitere Methoden und Techniken, wie sie bei Zellulären Automaten implementiert sind. Der Zelluläre Automat, der zur Modellierung der Siedlungsentwicklung auf Teneriffa eingesetzt wird, ist in einem GIS integriert, um somit auch die Möglichkeit der Berechnung von Zuständen und Zellumgebungen im Rahmen der Map-Algebra nach Tomlin (1990) nutzen zu können (vgl. Couclelis 1997).

3.1.1 Ableitung der „driving forces“ vergangener Nutzungsänderungen

Ausgehend von Veränderungsanalysen der Flächennutzung und verschiedener sozioökonomischer Parameter können mittels Korrelationsanalysen die „driving forces“ für die Expansion der urbanen Flächen eruiert werden. Die Datengrundlage bilden zum einen Satellitenbilddaten der Region zu verschiedenen Zeitpunkten, die im Sinne eines Postklassifikationsverfahrens miteinander verglichen werden (Monitoring). Zum anderen kommen Geodaten der entsprechenden Gemeinden und Bezirke, wie z.B. Bevölkerungszahlen und -prognosen (Simulation Zu- und Abwanderung), Beschäftigtenzahlen (Wirtschaftskraft), Bettenzahlen (Wirtschaftskraft) zum Einsatz. Auf dieser Basis kann das Simulationsmodell das wiedergibt wo, in welcher Art und wie viel Fläche künftig bebaut wird, kalibriert werden.

Die Untersuchung der räumlichen Veränderungen hinsichtlich der Bebauungsflächen wurde mit Fernerkundungsdaten von verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt („change detection“). Objekt-orientierte Klassifikation von Landsat-Szenen von 1978, 1986 und 2002 sowie Orthophotos von 1978 und 1996 dienten der Ableitung der Landnutzung und -bedeckung. Die halb- und vollautomatische Identifikation der Veränderung von Flächen zwischen den multitemporalen Datensätzen erfolgte mittels der sog. Post-Klassifikations-Analyse, bei der die Satellitenbilddaten zunächst unabhängig voneinander klassifiziert und dann über Matrizen gegenübergestellt wurden. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Datensätze nicht wie beispielsweise bei den Verfahren mittels Abbildungsalgorithmen normalisiert werden müssen. Durch den pixelweisen Vergleich der einzelnen klassifizierten Bildern und der anschließenden Erstellung von Veränderungsmatrizen können die Veränderungen in den einzelnen Klassen identifiziert und quantitativ ausgewertet werden. Der überwiegende Anteil der Flächenumwidmungen umfasst landwirtschaftliche Nutzflächen, Brandungszonen und typische Vegetationsgesellschaften der Fußstufe und Mittelstufe (vgl. Abb. 2).

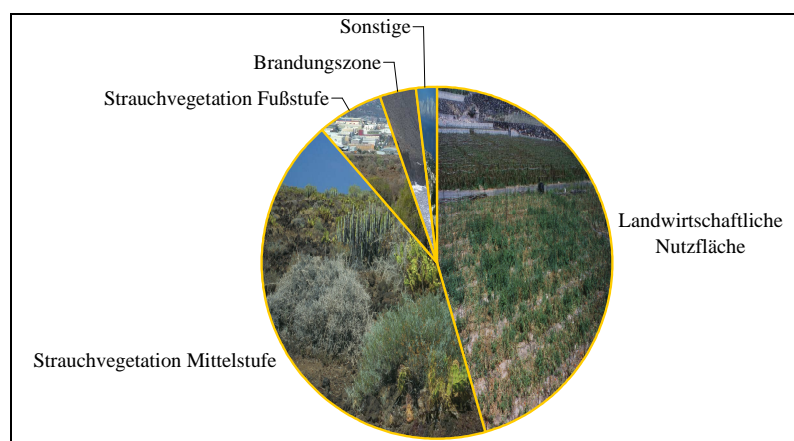


Abb. 2: Anteil der einzelnen Klassen an den Flächenumwidmungen

Die nichtparametrische Korrelationsanalyse umfasst die für die Siedlungsentwicklung bedeutsamen Landbedeckungen und -nutzungen, die aus der Veränderungsanalyse hervorgingen und weitere physisch-

geographische und anthropogene Faktoren wie Höhenstufen, Hangneigung, Exposition, Bevölkerungsveränderungen, touristische Infrastruktur und Beschäftigtenzahlen pro Sektoren. Auf der Grundlage der Resultate der Korrelationsanalysen werden die Reliefparameter Höhenstufen 0-1.750 m und Hangneigung 0-25° als Inhibitoren in das Modell integriert. Diese beiden Parameter werden unter der Annahme einer konstanten Entwicklung, in binäre Daten transformiert. Demnach entstehen keine Siedlungen auf einer Höhe von über 1.750 m oder an Hängen mit mehr als 25° Neigung. Das Ausschlusskriterium Schutzgebiete wird ebenfalls in zwei Klassen mit den Werten 0 und 1 umgesetzt (Naumann 2008).

3.1.2 Multikriterielle Entscheidungsverfahren

Im Anschluss an die Festlegung der Eingangsparameter und deren individuelle Gewichtung auf der Grundlage der Veränderungs- und Korrelationsanalysen ist die Bestimmung von geeigneten Verschneidungsmethoden und damit die Ermittlung der Gewichtsverteilung im Sinne der multikriteriellen Entscheidungsevaluation (MKE) notwendig. Das Grundprinzip der multikriteriellen Entscheidungsverfahren ist die Formulierung von signifikanten Zielen für eine Entscheidung anhand verschiedener Kriterien. Die einzelnen im Rahmen von decision support systems (DSS) zur Anwendung kommenden multikriteriellen Analyseverfahren unterscheiden sich hauptsächlich in Hinsicht auf die Entscheidungsregel, die für die Verknüpfung von Einzelkriterien (Gewichtung und Kombination) herangezogen wird (Eastman et al. 1995).

Die Gewichtung und Verschneidung der verschiedenen Eingangsparameter für das Modell erfolgt auf der Grundlage unterschiedlicher multikriterieller Entscheidungsmethoden (MKE): Bool'sche Verknüpfung (Boolean Intersection), Analytischer Hierarchieprozess (Analytic Hierarchy Process, AHP) und Ordered Weighted Averaging (OWA). Die Bool'sche Verknüpfung kommt bei der Generierung einer Ausschlusskarte auf Basis der Inhibitoren Höhe, Hangneigung und Schutzgebiete zum Einsatz. Die aus der Korrelationsanalyse als signifikant für das Siedlungswachstum hervorgehenden sozioökonomischen Parameter sowie die Landbedeckung und -nutzung werden in einem Analytischen Hierarchieprozess (AHP) in einer paarweisen Vergleichsmatrix gegenübergestellt. Die resultierenden Gewichte durch den paarweisen Vergleich finden anschließend Eingang in die OWA, in der eine Reihenfolge der Zielerträge festgelegt wird. Im Gegensatz zur gewichteten linearen Kombination (WLC) erfolgt die Gewichtung im Rahmen der Ordered Weighted Averaging-Methode (OWA) nicht nur qualitativ über die Mittelwertbildung der Gewichte, sondern zusätzlich über Ordnungsgewichte, mit deren Hilfe die Kriterien auch nach der Reihenfolge ihrer Ausprägung gesetzt werden (Mendes, Motizuki 2001). Durch Verwendung von zwei unterschiedlichen Arten von Gewichten bei der OWA können das Entscheidungsrisiko sowie die Substituierbarkeit und damit die Kompensation der Entscheidungskriterien gesteuert werden (Hocevar, Riedl 2003). Die erste Art von Gewichten gleicht der WLC-Methode und zielt auf die einzelnen Parameter. Die zweiten Gewichte basieren auf der Rangfolge, die den Parametern zugewiesen wird. Auf diese Weise erhält der Parameter mit der niedrigsten Gewichtung (WLC) in der Rangfolge eine erste Position (Ordnungsgewicht), der Parameter mit der nächst niedrigeren Punktzahl erhält den zweiten Rangfolge-Platz etc.

3.1.3 Ableitung von Potenzialkarten für Flächenumwidmungen

Die Potenzialkarte dient als Entscheidungsgrundlage für das Wachstum der Siedlungen und wird für jeden Modelldurchlauf auf der Grundlage der Ergebnisse der Veränderungsanalysen der Landbedeckung und -nutzung, der Korrelationsanalyse und der verschiedenen multikriteriellen Entscheidungsanalysen neu berechnet. Zur Umsetzung der Modellannahme hinsichtlich der größten Wahrscheinlichkeit von Siedlungserweiterungen im unmittelbaren Umkreis von bereits bestehenden wird die euklidische Distanz für jede Rasterzelle mit dem Status „Siedlung“ bis zur Maximalentfernung von 1,5 km zur nächstgelegenen Zelle berechnet. Der Übergang von hohen Wahrscheinlichkeiten bezüglich des Siedlungsausbaus bei geringer Entfernung hin zu geringen Wahrscheinlichkeiten in weiter entfernten Zellen wird durch eine lineare Fuzzy-Funktion über drei Stützpunkte innerhalb der Software MapModels generiert (Riedl 1999). Im Anschluss an die Gewichtung und/oder Verknüpfung der einzelnen Parameter mit Methoden der MKE erfolgt die Ausgabe einer Potenzialkarte, die die Grundlage für die Simulation mit einem Zellulären Automaten darstellt.

Zelluläre-Automaten-Modelle

Räumlich-dynamische und selbstregulierende Modelle wie Zelluläre Automaten, in denen Raum, Zeit und auch die unterschiedlichen Stadien einer Zelle als diskret angenommen werden, simulieren die lokalen

Nutzungsänderungen vor allem durch lokale Nachbarschaftsstrukturen (White et al. 1997). Ein Zellulärer Automat besteht aus den Bausteinen Zellraum, Nachbarschaft, Randbedingungen, Zustandsentwicklung und Zustandsmenge (Batty 1997). Der Raum gleicht dabei einem regulären Gitter von gleichförmigen Zellen im zwei- oder dreidimensionalen Raum. Die Nachbarschaftsbeziehung jeder einzelnen Zelle ist abhängig von der Dimension und der Geometrie des Zellulären Automaten. Eine Änderung des Systemzustandes erfolgt in Zeitschritten über ein a priori festgelegtes Regelsystem, das auf deterministischen oder statistischen Wahrscheinlichkeiten basiert. Die Regeln finden lokal auf allen Zellen Anwendung und werden durch den Zustand der jeweiligen Zelle und den Zuständen der Nachbarzellen festgelegt (Jenerette, Wu 2001). Der Status einer Zelle, gesteuert von einem Automaten, ist folglich abhängig von dem Zustand der Zelle selbst, den Zuständen der Nachbarzellen und den Überföhrungsfunktionen bzw. Regeln (Weimar 1997). Das Regelsystem basiert auf Entscheidungsheuristiken, die beispielsweise in Abhängigkeit von Nachbarschaftsbeziehungen formuliert sind oder auf Übergangswahrscheinlichkeiten, die u.a. über Zeitreihenanalysen aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden können (vgl. Candéau, Rasmussen, Clarke 2000).

Der Wachstumsprozess für Siedlungsflächen selbst ist abhängig von dem Status der Zelle und im Sinne eines Zellulären Automaten auch von der Nachbarschaft der betrachteten Zelle. Im vorliegenden Modell wurde eine Moore-Nachbarschaft mit dem Radius $r = 1$ unter Einbezug der Diagonalen mit acht Nachbarn verwendet, in der die Zellen unabhängig voneinander agieren. Befindet sich innerhalb dieser Nachbarschaft der Zelle mindestens eine Siedlungszelle aus dem vorangegangenen Jahr bzw. aus dem letzten Iterationsschritt, dann ist die betrachtete Zelle potenziell dazu geeignet eine neue Siedlungszelle zu werden. Insgesamt sind im Modell drei Bedingungen implementiert, die eine Zustandsänderung der Zelle verhindert: Die Zelle enthält keine Daten, die Zelle ist bereits eine „Siedlungszelle“ oder die Zelle vertritt eine Landnutzungs-kategorie, die keine Änderung in eine „Siedlungszelle“ erlaubt, wie z.B. Meer. Der Simulationszeitraum umfasst die Jahre 2002-2026, wobei 2002 das Bezugsjahr darstellt, für das die Startbedingungen der Simulation definiert werden.

Die ergebnisbezogene Validierung des Modells erfolgt auf der Grundlage des Simulationszeitraumes zwischen 1988 und 2002, indem der Modellaufbau und die Gewichtung der einzelnen Parameter auf der Basis der Kalibrierung (1978 und 1988) konstant gehalten werden und die Eingangsparameter Siedlungen und Landnutzung auf den neuen Ausgangsdatensatz angepasst werden. Das Ergebnis der Simulation der Siedlungszellen von 1988 bis 2002 zeigt visuell betrachtet gute Übereinstimmung mit der klassifizierten Szene von 2002. Die Ausmaße der modellierten größeren Siedlungen wie Santa Cruz de Tenerife und der Städte Los Christianos und Playa de la Américas im Süden der Insel kommen dem Klassifikationsresultat sehr nahe. Allerdings zeichnen sich im Modellergebnis kleinere Siedlungsflächen besonders entlang der südöstlichen und südwestlichen Küstenlinie nicht deutlich wieder. Insgesamt ergeben sich in der klassifizierten Szene ca. 5,1% mehr Siedlungszellen, als im modellierten Szenario. Einer der Hauptgründe dürfte im Fehlen von sogenannten Initialzellen im Bereich der modellierten Ergebnisse liegen.

3.2 Simulationsergebnis künftiger Flächennutzungsänderungen auf Teneriffa bis 2026

Die simulierte Potenzialkarte für Siedlungsneubau im Jahr 2026 weist vor allem im Süden und Südwesten der Insel eine Vielzahl an Flächen mit sehr hohem Potenzial zur Nutzungsumwidmung ausgewiesen, was den bisherigen Trend widerspiegelt (vgl. Abb. 3).

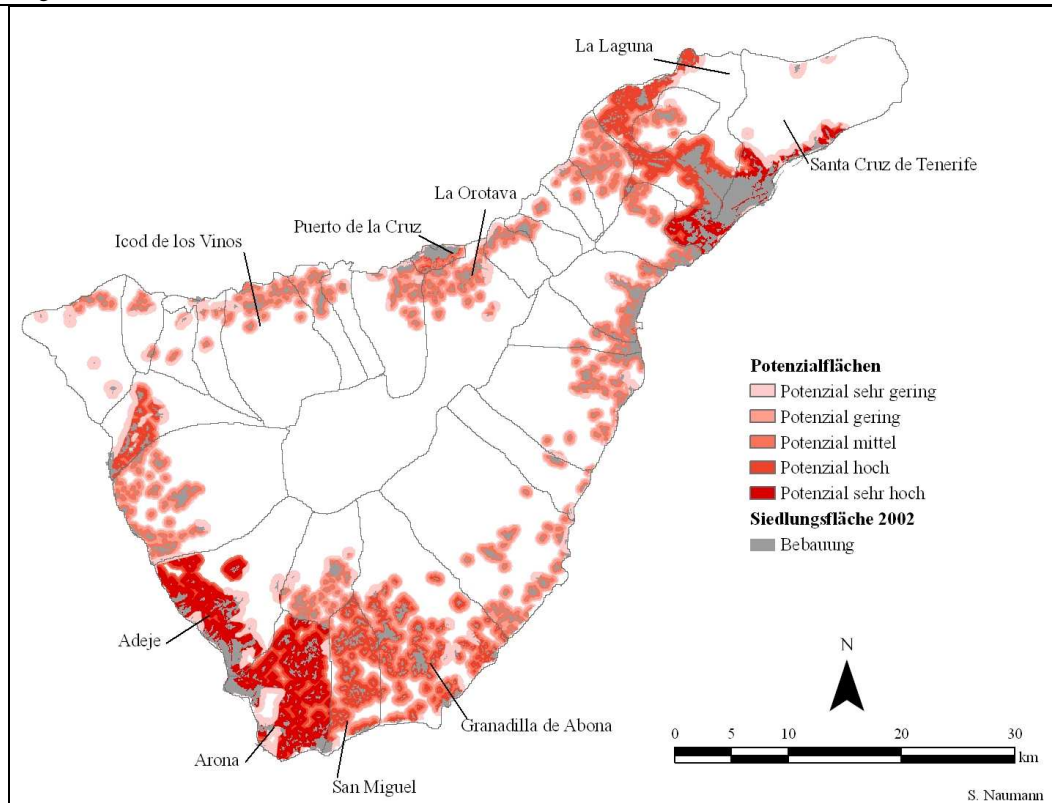


Abb. 3: Modellierter Potenzialkarte für Siedlungsflächen 2026

In der Umgebung der Hauptstadt Santa Cruz de Tenerife und der Universitätsstadt La Laguna auf der Hochebene wird demgegenüber ein leicht abgeschwächtes Potenzial zur Entstehung von neuen Siedlungszellen simuliert. Der Hintergrund für diese Entwicklung dürfte auf das geringe Vorhandensein an geeigneten Landbedeckungs- und Landnutzungsflächen zurückzuführen sein. Ebenso zeigen die inhibitorischen Parameter Hangneigung und Schutzgebiete eine hohe Bedeutung, da die Hauptstadt mit den Hafen- und Industrieanlagen im Nordwesten am Fuß des Anagagebirges (Naturreservat) situiert ist. Puerto de la Cruz, im Orotavatal gelegen, weist lediglich eine geringe Anzahl an Gebieten mit mittlerem Potenzial auf, was die Simulation auf Basis eines Zellulären Automaten 2026 mit der geringen Anzahl an neu entstandenen Siedlungszellen in diesem Bereich zeigt (vgl. Abb. 4). Während sich aus der Veränderungsanalyse des Zeitraums 1978-2002 eine Zunahme an Siedlungsflächen von 228% ergibt, ist auf der Grundlage der Simulation bis zum Jahr 2026 ein weiterer Zuwachs von 177% zu erwarten.

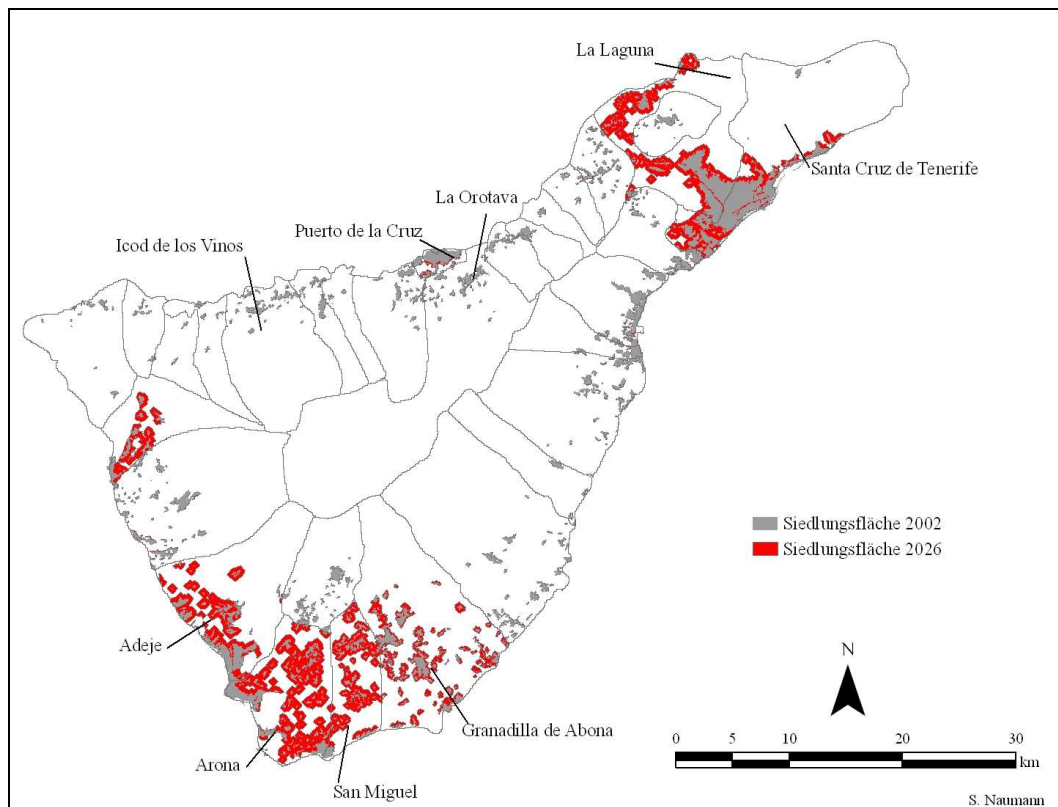


Abb. 4: Simulierte Siedlungsflächen 2026

Ein Vergleich der Siedlungsflächen 1978, 2002 und 2026 zeigt somit eindeutige Trends auf: Innerhalb der Gemeinden, die bereits im Zeitraum 1978-2002 einen deutlich hohen Zuwachs an neuen Siedlungsflächen erfahren haben, ist dies auf Basis der Simulation für das Jahr 2026 auch zu erwarten. Anzusprechen sind hier vor allem die Gemeinden im Süden der Insel wie Adeje, Arona, Granadilla de Abona und San Miguel sowie die beiden Gemeinden La Laguna und Santa Cruz de Tenerife im Nordosten. Mit Ausnahme von Santiago del Teide mit einer Zunahme von knapp 235% Siedlungszellen, zeigt sich im Nordwesten der Insel eine eher verhaltene Expansion, so z.B. in Buenavista del Norte, Icod de los Vinos, La Orotava und Los Realejos.

4 AUSWIRKUNGEN FÜR EINE NACHHALTIGE ENTWICKLUNG

Mit Hilfe der Simulation der Flächennutzungsänderungen für die Insel Teneriffa konnten die direkten Folgen des zunehmenden Bedarfs an Siedlungsflächen durch den Tourismusboom aufgezeigt werden. Vor allem die Bereiche der Fußstufe werde künftig weiterhin stark beansprucht werden, was zu einer Störung des ökologischen Gleichgewichts innerhalb der Vegetationsformation des Sukkulentenbusches führen könnte. Für eine Analyse der indirekten Auswirkungen wie beispielsweise Müllentsorgung, Störung des Wasserhaushaltes, Energiegewinnung und Störung der Ökosysteme durch diverse Freizeitaktivitäten bedarf es weiterer kleinräumiger Untersuchungen.

Eine instrumentelle Informations- und Öffentlichkeitsarbeit im Rahmen eines umwelt- und sozialverträglichen Tourismuskonzeptes, wie es bereits für die Baleareninsel Mallorca angestrebt ist, wäre ein erster Ansatzpunkt. Hierfür erfordert es einer konkreten Umweltbildung durch die Vermittlung von Wissen über die ökologischen Interaktionen zwischen Natur und Landschaft auf der einen und den anthropogenen Einflüssen auf der anderen Seite. Möglichkeiten der Umsetzung bieten sich beispielsweise in der Einrichtung von Informationszentren, die auf Tenerife schon punktuell vorhanden sind.

Die Zunahme an versiegelter Fläche im Zeitraum 1978-2002 um 228% zeigt allerdings, dass der Raum zum größten Teil unter rein wirtschaftlichen Aspekten und in Abhängigkeit von meist spezifischen touristischen Interessen verplant wurde. Die baulichen Erschließungen nehmen somit gleichviel mehr Fläche ein, wie naturnahe und ländliche Strukturen schwinden. Verstärkt wird diese Entwicklung durch den Umstand, dass auf Teneriffa wie in ganz Spanien die Planungshoheit auf Gemeindeebene liegt. Die wirtschaftliche Abhängigkeit vom Tourismussektor führt somit zusätzlich zu einer lokalen Separierung von ökonomisch benachteiligten ländlichen Räumen und touristische Zentren. Die Modellierung der künftigen

Siedlungsentwicklung könnte erste Anhaltspunkte für eine „naturnahe“ und nachhaltige Planung geben, die nicht nur die regionalen, sondern auch die lokalen Auswirkungen auf Natur und Ökonomie integriert. Im Sinne der Raum- und Regionalplanung muss sowohl die angemessene Versorgung der Bevölkerung mit Fläche, als auch der Schutz und der nachhaltige Umgang mit der endlichen Ressource Boden berücksichtigt werden.

5 LITERATUR

- BATTY, M.: New developments in urban modelling: simulation, Representation and Visualization. In: Gutathakurta, S. (Hrsg.): Integrated land use and environmental models, S. 15–43. Berlin, 2003.
- BATTY, M.: Urban systems as cellular automata. In: Environment and Planning: Planning and Design, Bd. 24, S. 159–164. 1997.
- CANDEAU, J., RASMUSSEN, S., CLARKE, K. C.: A coupled cellular automaton model for landuse/land cover dynamics. In: Proceedings of the 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs. Banff, 2000.
- CASTELLANO, J. M., MARTÍN, F. J. M.: Die Geschichte der Kanarischen Inseln. La Laguna, 1999.
- COUCLELIS, H.: From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation. In: Environment and Planning B: Planning and Design, Bd. 24, H. 2, S. 165–174. 1997.
- EASTMAN, J. R., KYEM P. A. K., TOLEDANO, J., JIN, W.: GIS and decision making. In: United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) (Hrsg.): Explorations in Geographic Information Systems Technologie, Bd. 4, S. 35–39. Geneva, 1995.
- EPSTEIN, J., PAYNE, K., KRAMER, E.: Techniques for mapping suburban sprawl. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Bd. 63, H. 9, S. 913–918. 2002.
- FERRER, F., CABRERO, O.: Metodología sobre cartografía bioclimática. In: Marzol, V., Dorta, P., Valladares, P.: Clima y agua: la gestión de un recurso climático, S. 366–378. La Laguna, 1996.
- HOCEVAR, A., RIEDL, L.: Vergleich verschiedener multikriterieller Bewertungsverfahren mit MapModels. In: Schenk, M. (Hrsg.): Beiträge zum Symposium CORP 2003, S. 599–606. Wien, 2003.
- IMBUSCH, K., TURMANN, A., KAHLENBORN, W.: Umweltschutz und Tourismus. Norderstedt, 2000.
- JENERETTE, G. D., Wu, J.: Analysis and simulation of land-use change in the central Arizona – Phoenix region, USA. In: Landscape Ecology, H. 16, S. 611–626. 2001.
- MARTÍN MARTÍN, V. O.: Tenerife, conyuntura económica y transformación especial en una isla turística. In: Cuadernos de Turismo, Bd. 3, S. 69–91. 1999.
- MENDES, J., MOTIZUKI, W.: Urban quality of life evaluation scenarios. In: CTBUH Review, Bd. 1, H. 2, S. 1–11. 2001.
- NAUMANN, S.: Modellierung der Siedlungsentwicklung auf Tenerife (Kanarische Inseln). Eine fernerkundungsgestützte Analyse zur Bewertung des touristisch induzierten Landnutzungswandels, Heidelberger Geographische Arbeiten, Bd. 125. Heidelberg, 2008.
- NAUMANN, S.: Siedlungsentwicklung auf Teneriffa – Folgen des Massentourismus für ein Inselökosystem. In: Praxis Geographie, H. 10, S. 20–24. Braunschweig, 2006.
- RIEDL, L.: Leop's MapModels. User Manual version 1.1 beta. Wien, 1999.
- SIEDENTOP, S., KAUSCH, S.: Der Übergang in die „schrumpfende Gesellschaft“. Räumliche Ausprägung von Wachstums- und Schrumpfungsprozessen in deutschen Agglomerationsräumen – ein Überblick. In: Hutter, G., Iwanow, I., Müller, B. (Hrsg.): Demographischer Wandel und Strategien der Bestandsentwicklung in Städten und Regionen. IÖR-Schriften, Bd. 41. Dresden, 2003.
- SIEDENTOP, S.: http://www.schleswig-holstein.de/UmweltLandwirtschaft/DE/BodenAltlasten/05__Flaechenmanagement/03__Problem_Flaechenverbrauch/PDF/VortragSiedentop,templateId=raw,property=publicationFile.pdf, 2004.
- TOMLIN, C. D.: Geographic information systems and cartographic modelling. Englewood Cliff, 1990.
- WEIMAR, J. R.: Simulation with Cellular Automata. Berlin, 1997.
- WHITE, R., ENGELEN, G.: Cellular automata as the basis of regional modelling. In: Environment and Planning B, Bd. 24, S. 235–246. 1997.
- WILDPRET DE LA TORRE, W.: Konfliktbereich Tourismus – Vegetation in touristisch beanspruchten Gebieten. Beispiel Kanarische Inseln. In: Berichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft, H. 7, S. 219–230. 1995.