

Valentin Kraus / Brigitte Rudel

# Stadtwachstumsszenario einer zukünftigen Megacity: Fallstudie Ahmedabad

109 - Data Science: Erfassung, Modellierung, Analyse und  
Visualisierung von Daten

## Abstract

In diesem Paper wird gezeigt, dass die Verknüpfung von Geoprodukten aus urbaner Fernerkundung und frei verfügbaren Daten zur Entwicklung wertvoller Analysetools führen kann. Anhand des Fallbeispiels Ahmedabad in Indien, das mit einer anhaltenden, rasanten Stadtentwicklung konfrontiert ist, wird demonstriert, wie unter der Annahme bestimmter Wachstumscharakteristiken das künftige Stadtwachstum in ArcGIS modelliert werden kann.

## Keywords:

urbane Fernerkundung, Landsat, Modellierung, GIS, Rasteranalysen, Stadtwachstum

## 1. Einleitung

Im Jahr 2014 lebten 54% der Weltbevölkerung in Städten bzw. deren Umlandregionen. Waren es im Jahr 1950 noch 30%, so sollen 2050 bereits 66% der Bevölkerung in städtischen Agglomerationen leben. Indien wird weltweit der größte Zuwachs an städtischer Bevölkerung prognostiziert. Entsprechend UN-Prognosen sollen bis 2050 404 Millionen Menschen in die Städte wandern. Damit würde sich die derzeitige Stadtbevölkerung Indiens nahezu verdoppeln (U.N., 2015).

Flächenversiegelung, die zumeist mit Urbanisierungsprozessen verbunden ist, ist wohl als die drastischste Form irreversibler Veränderung der Landbedeckung zu sehen. Indien weist bereits seit drei Jahrzehnten hohe Urbanisierungsraten auf. Stadtplanern fehlt es allerdings an Tools, um Stadtwachstumsprozesse zu messen, zu beobachten und besser verstehen zu können. Gleichzeitig ist die multitemporale Fernerkundung zu einem bedeutenden Instrument zur Datengenerierung geworden, um diese Veränderungsprozesse zu beobachten. Landsat-Bilddaten eignen sich, um zeitliches und räumliches Stadtwachstum, Nachverdichtung und weitere Stadtentwicklungsprozesse in Stadtregionen zu analysieren. (Taubenböck et al. 2009)

Lokalen Behörden wird die Verwendung von Geographischen Informationssystemen (GIS) als Hilfstool empfohlen (Adhvaryu 2011). Mit GIS stehen leistungsfähige Methoden zur Verfügung, raumbezogene

Daten für Fachbereiche wie Raumplanung, Ressourcenschutz, Umweltmonitoring usw. effektiv zu nutzen sowie raumbezogene Problemstellungen zu bearbeiten und zu modellieren (Albertz 2009).

Das Ziel dieser Arbeit war es daher, ein Tool zu entwickeln, das Fernerkundungsprodukte, Zusatzdaten und GIS-Methoden verknüpft. Stadtplaner sollten dabei unterstützt werden, räumliche Entwicklungstrends besser zu verstehen und Szenarien zum Stadtwachstum generieren zu können. Um zusätzliche Kosten zu vermeiden, sollte mit frei verfügbaren Daten gearbeitet werden.

## 2. Untersuchungsgebiet und Datengrundlagen

Ahmedabad ist mit 5,6 Millionen Einwohnern die größte Stadt von Gujarat und die 7. größte urbane Agglomeration in Indien. Der Fluss Sabarmati teilt die Stadt in einen westlichen und einen östlichen Teil. Ahmedabad ist ein industrielles Zentrum und hat für Westindien hohe ökonomische Relevanz. Aufgrund des rasanten Stadtwachstums der letzten Jahre (1991: 2,8 Mio. Einwohner (EW), 2001: 3,5 Mio. EW) wurden 2006 die administrativen Stadtgrenzen ausgedehnt (siehe *AMC-Ahmedabad Municipal Corporation*-Grenzen in Abbildung 1) (Shukla et. al 2010). Das rasante Stadtwachstum soll sich auch künftig fortsetzen, wenngleich die vorliegenden Prognosequellen (Shukla et al. 2010, CIA 2010) unterschiedliche Annahmen treffen (zwischen 7,8 und 11 Mio. EW für das Jahr 2035).

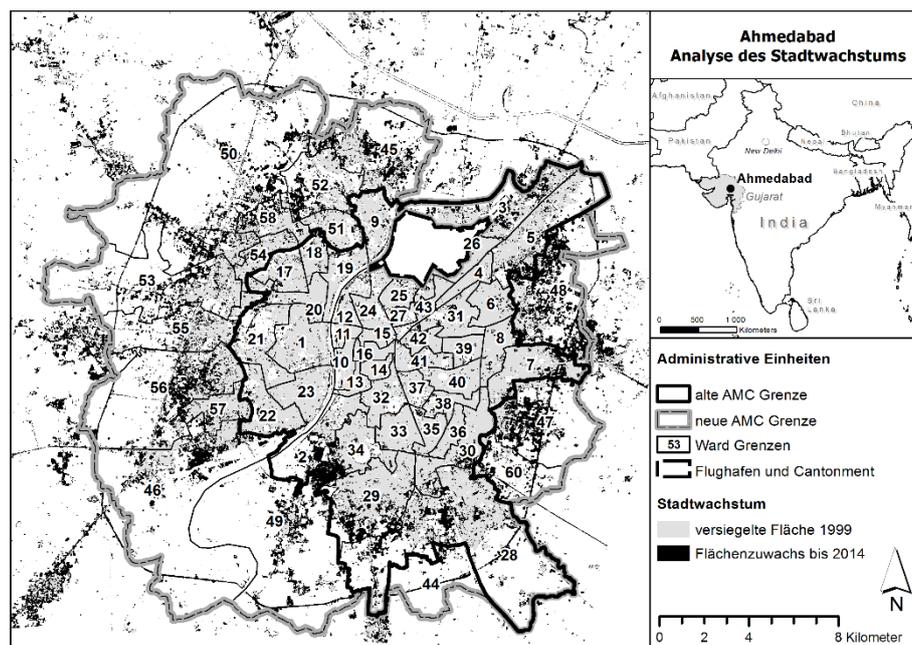


Abbildung 1: Stadtwachstum Ahmedabad 1999-2014

Im Rahmen vorhergehender Untersuchungen (Steinnocher et.al 2015) wurde für die Metropolregion Ahmedabad ein Geodatenbestand angelegt, bestehend aus Satellitenbildern sowie Zusatzdaten. Für das Stadtgebiet wurden zwei Fernerkundungsdatensätze eingesetzt:

- VHRI von Pléiades Satelliten (geometrische Auflösung: 0.5m, 23.2. und 8.3.2013)

- Multitemporale Landsat-Szenen (geometrische Auflösung: 30m, 14.7.2014 von Landsat 8 und 6.7.1999 von Landsat 5)

Während die Pléiades-Bilder für die detaillierte Analyse der Landbedeckung (*lokale Ebene*) eingesetzt wurden, lieferten die Landsat-Szenen die Basis für die Untersuchungen zu Landbedeckungsveränderungen im betrachteten Zeitraum (*regionale Ebene*). Zusätzliche Daten wurden von Statistiken (Urban Management Center 2013) und OpenStreetMap (OSM) verwendet.

Die Analyse des Stadtwachstums (versiegelte Flächen) basiert auf den Daten von Landsat 5 und Landsat 8 (Zeitraum: 1999-2014, siehe Abbildung 1) und wurde anhand identer Trainingsgebiete für beide Datensätze erfasst. Um mehr Informationen über das Stadtwachstum, insbesondere über das Verhältnis des Wachstums versiegelter Flächen in Zusammenhang mit dem Bevölkerungswachstum, zu generieren, wurden weitere Analysen durchgeführt. Diese basierten auf den Ergebnissen der regionalen Ebene und werden im vorliegenden Paper behandelt. Für detailliertere Analysemöglichkeiten wurde die Pixelgröße der Landsat-Geoprodukte auf 5m verkleinert.

### 3. Durchführung der Analyse

#### 3.1 Untersuchung des bisherigen Stadtwachstums

Unter der Annahme, dass versiegelte Flächen auf eine anthropogen bedingte Transformation der Landoberfläche zugunsten baulicher Gegebenheiten städtischer Bereiche hindeuten (Straßen, Gebäude etc.) (Stern/Entwisle 2005), wurde ein Zusammenhang zwischen der Zunahme an versiegelten Flächen und dem Bevölkerungswachstum hergestellt. Die folgenden Analyseschritte dienen der Erforschung des bisherigen Stadtwachstums auf der Ebene administrativer Stadtteile (Wards). Die Korrelation zwischen Bevölkerungszunahme und Zunahme an versiegelten Flächen (in Rasterpixel) wurde untersucht und via Scatterplot dargestellt (Abbildung 2)<sup>1</sup>. Die 59 Wards wurden zur besseren Interpretation entsprechend der AMC-Grenzerweiterung in Zonen eingeteilt. Stadtteile, die einen Zuwachs an versiegelten Flächen von weniger als 10.000 Rasterpixel aufwiesen, wurden dabei ausgeschlossen, wie auch Wards, die eine Bevölkerungszunahme von weniger als 1.000 Einwohner zu verzeichnen hatten.

Punkte, die im Scatterplot (Abbildung 2) unterhalb der Trendlinie zu liegen kommen, repräsentieren Wards mit einem erheblichen Zuwachs an versiegelten Flächen, während das Bevölkerungswachstum als gering zu betrachten ist. Punkte oberhalb der Trendlinie repräsentieren Wards mit relativ hohem

---

<sup>1</sup> Es bestand eine Zeitlücke zwischen den Geodatenprodukten der Landsat-Bilder (1999/2014) und den Bevölkerungsdaten (2001/2011). Die Bevölkerungsdaten wurden an das Stadtwachstum gekoppelt und auf der zeitlichen Basis der Landsat-Bilder behandelt. Aufgrund der Erweiterung der administrativen Stadtgrenzen 2006 waren Nachberechnungen hinsichtlich der Bevölkerungsstände auf Ward-Ebene notwendig.

Bevölkerungswachstum im Vergleich zum Flächenzuwachs. Eine visuelle Validierung der Ergebnisse erfolgte mittels der hochauflösenden Satellitenbilddaten (Pléiades).

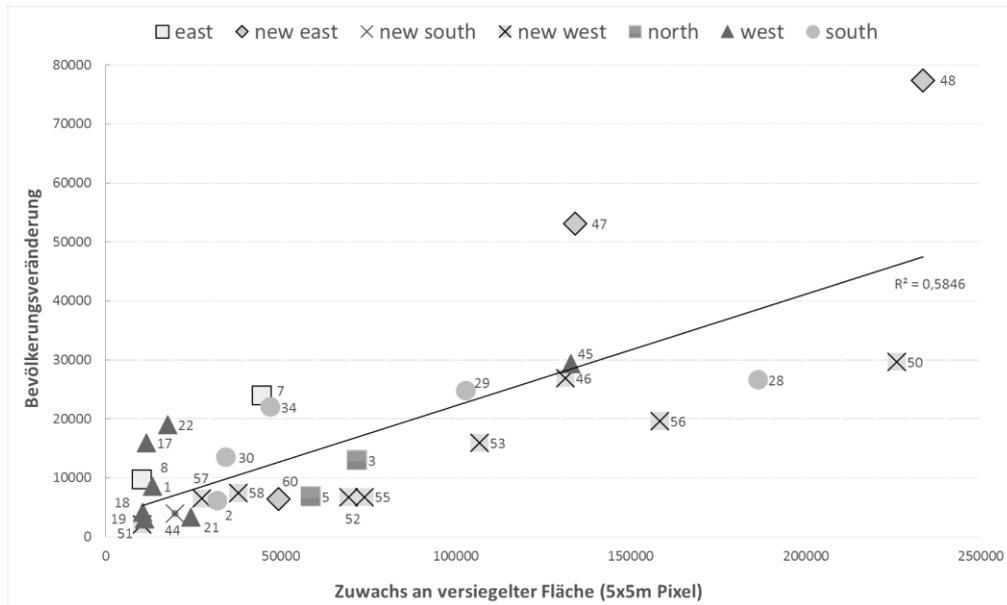


Abbildung 2: Scatterplot

### 3.2 Modellierung des künftigen Stadtwachstums

Der durchschnittliche Flächenverbrauch pro Einwohner konnte für 2011 bereits auf Ward-Ebene errechnet werden. Unter der Annahme einer konstanten Ratio wurde die Bevölkerungsextrapolation daran gekoppelt und für die Zeitpunkte 2020, 2025, 2030 und 2035 hochgerechnet.

Die Extrapolation der Bevölkerung auf Ward-Ebene erfolgte auf Grundlage des beobachteten Wachstums 2001 bis 2011 (Gesamtstadt: 4,3 Mio. bzw. 4,9 Mio. EW). Dafür musste zunächst die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate berechnet werden (Husa/Wohlschlägl 2004: 62). Während diese für die Gesamtstadt 1,21% betrug, wiesen die einzelnen Wards mitunter sehr unterschiedlich hohe Raten aus. Extrem hohe Wachstumsraten wurden auf 3,8% reduziert. Dies bedeutet, dass sich die Bevölkerung innerhalb des Zeitraumes 2011 bis 2035 immerhin mehr als verdoppeln würde (Husa/Wohlschlägl: 63f.).

Sechs innenstädtische Wards verzeichneten eine negative Bevölkerungsveränderung von 2001-2011 und wurden von der Extrapolation ausgeschlossen. Die Berechnung der Bevölkerungsextrapolation, jeweils mit Ausgangszeitpunkt 2011 (Husa/Wohlschlägl 2004: 63), wurde an den durchschnittlichen Flächenverbrauch pro Einwohner 2011 gekoppelt. Die Ergebnisse stellten den hochgerechneten Zuwachs an versiegelten Flächen für die gewählten Untersuchungszeitpunkte dar.

Um die räumliche Verteilung des hochgerechneten Flächenzuwachses berechnen und visualisieren zu können, wurde ein Model in ArcGIS (Modelbuilder) erstellt. Dabei kamen unterschiedliche Raster

Analysetools zum Einsatz. Das Resultat sollte einen Rasterlayer darstellen, der die attraktivsten Siedlungsflächen für das künftige Stadtwachstum beinhaltet. Dies geschah durch Kombination einzelner Attraktivitätslayer. Die Daten für die Berechnung bestanden aus: urban footprint (versiegelte Fläche) 1999 und 2014, NDVI-Raster 2014<sup>2</sup>, Ausschlussflächen (Gewässer, bestehendes Siedlungsgebiet etc.) und dem OSM Straßennetz. Als attraktivste Stadterweiterungsgebiete sollten jene Areale herangezogen werden, die folgende Kriterien erfüllen:

1. geringe Distanz zu bestehenden Siedlungsflächen (Gewichtung 0,4)
2. Siedlungsgebiete jüngeren Ursprungs sind als attraktiver zu werten (Gewichtung 0,3)
3. geringe Distanz zu Hauptverkehrsstraßen (ohne Autobahnen) (Gewichtung 0,2)
4. Areale mit niedrigem Vegetationsanteil sind zu favorisieren (Gewichtung 0,1)
5. Areale mit sehr hohem Vegetationsanteil sind auszuschließen.

Aufgrund des graduellen Charakters des Analysemodells sowie der verfügbaren Daten wurde ein Modellierungsverfahren gewählt, in dem mit unscharfen Grenzen gearbeitet werden konnte (fuzzy site analysis). Der Grad der Zugehörigkeit zu einem Kriterium wird dabei zwischen 0 und 1 definiert, wobei unterschiedliche Zugehörigkeitsfunktionen angewandt werden können (Bill 2010: 526ff.). Dadurch konnten scharfe Grenzziehungen vermieden und den gewünschten Analysekriterien („je–desto“-Aussagen) entsprochen werden.

ad 1./3.) Zunächst wurden Euklidische Distanzen ausgehend vom Straßennetz sowie den versiegelten Flächen berechnet. Die Fuzzy Membership Function „linear“ wurde unter der Annahme einer abnehmenden Attraktivität mit zunehmender Distanz angewendet. Für die Siedlungsflächen wurden 3.000m, für das Straßennetz 1.500m angenommen und dahingehend Werte von 1 (sehr attraktiv) bis 0 (nicht attraktiv) vergeben.

ad 2.) Der urban footprint wurde in zwei Zonen aufgeteilt: urban footprint 1999 mit einem pixel value von 1 und urban footprint 2014 mit einem pixel value von 2. Darauf wurde das Tool *Focal Statistics* angewandt. Dieses Tool berechnet für jede Eingabezellenposition eine Statistik (hier: Summe) der Werte innerhalb einer angegebenen Nachbarschaft. Die Nachbarschaft wurde mit einem Radius von 150 Zellen angegeben. Dadurch wurde ein neuer Raster erzeugt, in dem ältere Siedlungsgebiete (urban footprint 1999) und Umgebungsbereiche aufgrund der Summierung niedrigere Ergebniswerte erbrachten als jüngere Siedlungsareale (urban footprint 2014). Die Werte wurden danach entsprechend Attraktivität fuzzifiziert (0=niedrige, 1=hohe Ergebnisvalues), membership type: linear.

---

<sup>2</sup> NDVI (Normalized Differenced Vegetation Index): stellt Areale mit hohem und niedrigem Vegetationsanteil dar. Der Rasterlayer wurde aus den Landsat-Bilddaten errechnet und weist Pixelwerte von 85 bis 159 auf.

ad 4.) Der NDVI-Raster 2014 weist einen Wertebereich von 85 bis 159 auf. Die Membership Function „Small“ wurde im Fuzzy Membership-Analysetool gewählt. Diese bewirkt, dass der Grad der Zugehörigkeit zu einer Menge mit abnehmenden Eingabewerten zunimmt (Midpoint=122, spread=15). Die Kombination der einzelnen Attraktivitätslayer erfolgte als gewichtete Summe (siehe Abbildung 3) anhand der bereits angeführten Gewichtungen.

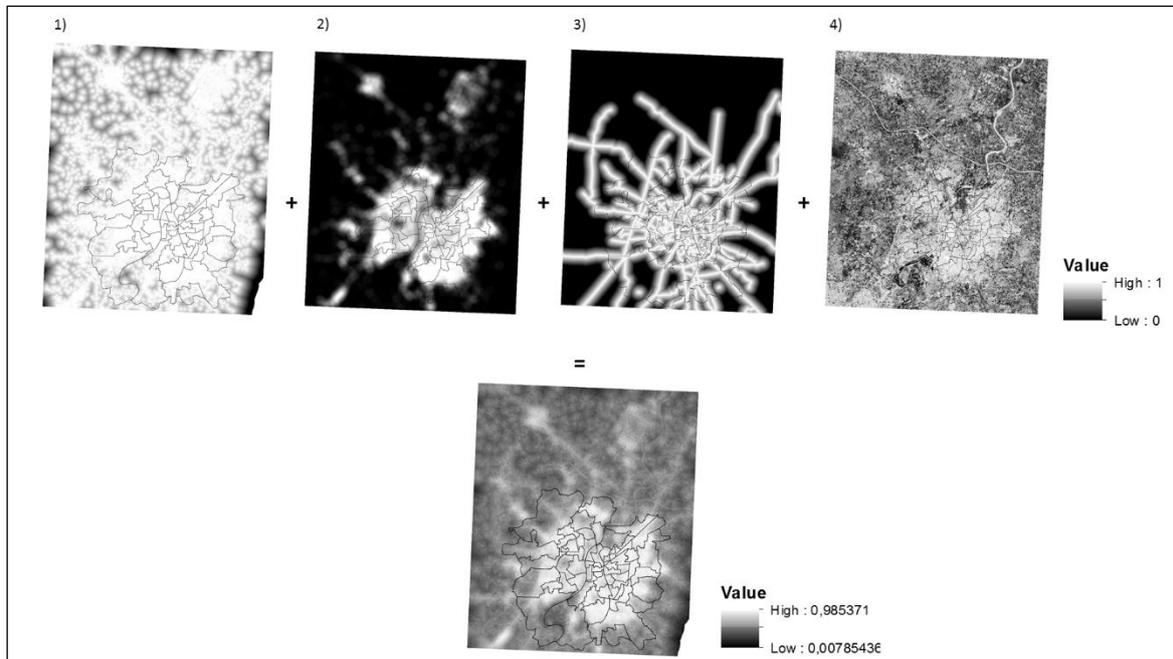


Abbildung 3: Kombination der einzelnen Attraktivitätslayer

ad 5.) Abgesehen von den Arealen mit hohem Vegetationsanteil (NDVI-Werte über 125) wurden die bereits existierenden Siedlungsflächen (urban footprint) sowie die Ausschlussflächen (Gewässer, hochrangige Infrastrukturf lächen etc.) aus dem kombinierten Attraktivitätslayer entfernt.

Der Flächenzuwachs pro Ward wurde für die Jahre 2020, 2025, 2030 und 2035 bereits auf Ward-Ebene errechnet. Diese Werte repräsentieren die jeweilige Anzahl an zusätzlichen urban footprint-Rasterpixel. Diese wurden den Ward-Features in ArcGIS jeweils als Attributwert angehängt. Mittels ArcGIS-Tool *Iterate Feature Selection* konnten die einzelnen Wards selektiert werden. Folglich wurden die attraktivsten Areale (Rasterpixel mit den höchsten Attraktivitäts-Werten) entsprechend dem hochgerechneten Flächenzuwachs pro Ward und Zeitpunkt aus dem kombinierten, bereinigten Attraktivitätslayer extrahiert. Die resultierenden Raster datasets wurden anschließend je nach Prognosezeitraum zusammengefügt (*Mosaic To New Raster*). Das Ergebnis des modellierten Stadtwachstums ist in Abbildung 4 zu sehen.

#### 4. Ergebnisdiskussion und Conclusio

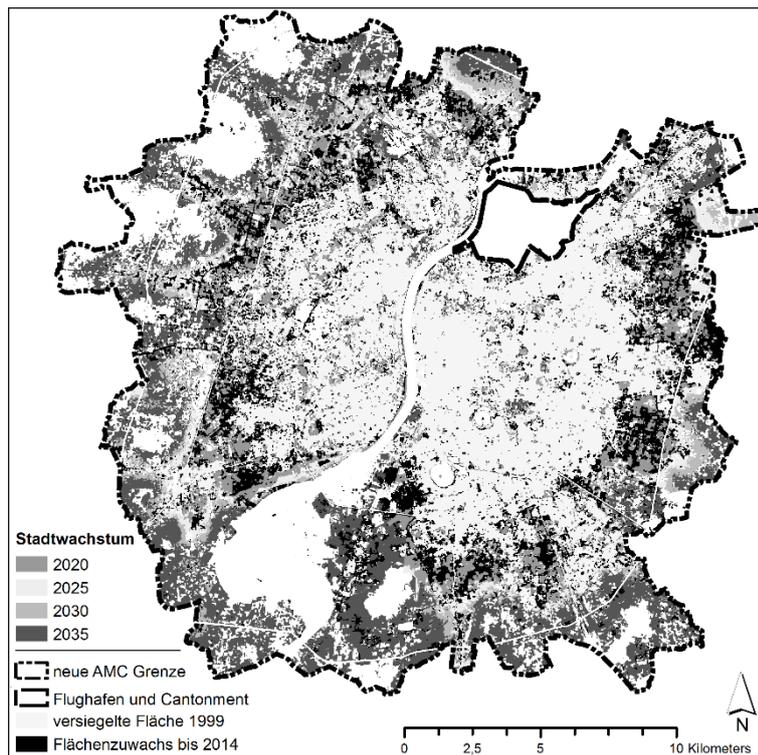


Abbildung 4: modelliertes Stadtwachstum, Ahmedabad

Aufgrund der vorhandenen Bevölkerungsdaten wurde eine Einwohnerzahl von 6,7 Millionen für die Stadt Ahmedabad im Jahr 2035 errechnet. Die Modellierung des Siedlungswachstums zeigt, dass unter den gegebenen Annahmen Siedlungsflächen für die zusätzlichen 1,76 Millionen Einwohner vorhanden wären, bei einer maximal verfügbaren Siedlungsfläche für 7,1 Mio. Einwohner. Allerdings gelangten einige Wards rasch an ihre Kapazitätsgrenzen und konnten das errechnete Flächen- bzw. Bevölkerungswachstum nicht aufnehmen. So wurden für das Prognosejahr 2035 die Einwohner, die

rechnerisch nicht untergebracht werden konnten, manuell auf Wards mit Flächenkapazitäten verteilt.

Mit der vorliegenden Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass urbane Fernerkundungsprodukte effektiv dafür eingesetzt werden können, den Zuwachs versiegelter Flächen darzustellen sowie die Generierung von Stadtwachstumsszenarien zu unterstützen. Mit einem relativ geringen Umfang an frei verfügbaren Daten konnten flächendeckende Wachstumsszenarien modelliert werden. Potentielle Stadterweiterungsgebiete konnten eruiert werden, wodurch eine Perspektive auf die mögliche räumliche Verteilung des Zuwachses an versiegelter Fläche gegeben wird. Dadurch kann Stadtplanern eine unterschiedliche Sichtweise auf Entwicklungsprozesse ermöglicht werden. Darüber hinaus können die Wirkungen von Strategien, Plandokumenten und rechtlichen Vorgaben zur baulichen Stadtentwicklung überprüft oder hinterfragt werden.

Dabei ist zu betonen, dass die vorliegende Arbeit aufgrund der Datenverfügbarkeit ohne adäquate Stadtentwicklungsdokumente, -pläne und -strategien durchgeführt wurde. Vorwissen über lokale Gegebenheiten wurde aus Berichten und anderen Forschungsarbeiten generiert. Lokales Expertenwissen über räumliche Strukturen kann in das vorgestellte Modell allerdings eingebracht werden, wodurch die Aussagekraft erheblich erhöht werden könnte.

### **Literaturliste/Quellenverzeichnis:**

Adhvaryu, B. (2011): Analyzing evolution of urban spatial structure: a case study of Ahmedabad, India. In: Environment and Planning-Part B, 38(5), 850.

Albertz, J. (2009): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

Bill, R. (2010): Grundlagen der Geo-Informationssysteme (Vol. 5). Heidelberg: Wichmann.

CIA, U. (2010): The world factbook. <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook>, (10.09.2015)

Husa, K./Wohlschlägel, H. (2004): Grundzüge der Bevölkerungsgeographie, Lehrbehelf zur Lehrveranstaltung, Universität Wien.

Shukla, P. R./Pangotra, P./Agarwal, P./Bazaz A., B./Pathak M./Sharma S./Agarwal N. (2010): A Road Map towards Low Carbon Ahmedabad 2050.

[http://2050.nies.go.jp/report/file/lcs\\_asialocal/ahmedabad\\_2010.pdf](http://2050.nies.go.jp/report/file/lcs_asialocal/ahmedabad_2010.pdf), (9.9.2015)

Steinnocher, K./Walangitang, D./Filipczak, D. (2015): Earth observation for Low Carbon Action plan development-A concept for EO supported energy planning. In: Urban Remote Sensing Event (JURSE), 2015 Joint. IEEE, pp. 1–4.

Stern, P. C./Entwisle, B. (Hg.). (2005): Population, Land Use, and Environment: Research Directions. National Academies Press.

Taubenböck, H./Wegmann, M./Roth, A./Mehl, H./Dech, S. (2009): Urbanization in India–Spatiotemporal analysis using remote sensing data. In: Computers, Environment and Urban Systems, 33(3), 179-188.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2015): World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, (ST/ESA/SER.A/366).

<http://esa.un.org/unpd/wup/Publications/Files/WUP2014-Report.pdf>, (5.9.2015)

Urban Management Centre (2013): 'City Health Plan Ahmedabad'. Ahmedabad: Health Department, National Urban Health Mission NUHM, Ahmedabad Municipal Corporation.