

### Menschen zählen aus dem All: Möglichkeiten und Grenzen von Satellitendaten zur Abschätzung der Bevölkerungsentwicklung und des Gebäudebestandes in deutschen Städten

Wurm, Michael; Taubenböck, Hannes; Goebel, Jan; Dech, Stefan; Wagner, Gert G.

Veröffentlichungsversion / Published Version

Arbeitspapier / working paper

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit / provided in cooperation with:

SSG Sozialwissenschaften, USB Köln

#### Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Wurm, M., Taubenböck, H., Goebel, J., Dech, S., & Wagner, G. G. (2010). *Menschen zählen aus dem All: Möglichkeiten und Grenzen von Satellitendaten zur Abschätzung der Bevölkerungsentwicklung und des Gebäudebestandes in deutschen Städten*. (RatSWD Working Paper Series, 155). Berlin: Rat für Sozial- und Wirtschaftsdaten (RatSWD). <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-415521>

#### Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer Deposit-Lizenz (Keine Weiterverbreitung - keine Bearbeitung) zur Verfügung gestellt. Gewährt wird ein nicht exklusives, nicht übertragbares, persönliches und beschränktes Recht auf Nutzung dieses Dokuments. Dieses Dokument ist ausschließlich für den persönlichen, nicht-kommerziellen Gebrauch bestimmt. Auf sämtlichen Kopien dieses Dokuments müssen alle Urheberrechtshinweise und sonstigen Hinweise auf gesetzlichen Schutz beibehalten werden. Sie dürfen dieses Dokument nicht in irgendeiner Weise abändern, noch dürfen Sie dieses Dokument für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, aufführen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

#### Terms of use:

This document is made available under Deposit Licence (No Redistribution - no modifications). We grant a non-exclusive, non-transferable, individual and limited right to using this document. This document is solely intended for your personal, non-commercial use. All of the copies of this documents must retain all copyright information and other information regarding legal protection. You are not allowed to alter this document in any way, to copy it for public or commercial purposes, to exhibit the document in public, to perform, distribute or otherwise use the document in public.

By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.



Rat für Sozial- und  
Wirtschaftsdaten (RatSWD)

[www.ratswd.de](http://www.ratswd.de)

# RatSWD

## *Working Paper Series*

Working Paper

Nr. 155

### Menschen zählen aus dem All

Möglichkeiten und Grenzen von Satellitendaten zur Abschätzung der Bevölkerungsentwicklung und des Gebäudebestandes in deutschen Städten

---

Michael Wurm, Hannes Taubenböck, Jan Goebel,  
Stefan Dech und Gert G. Wagner

---

August 2010

---

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Working Paper Series des Rates für Sozial- und Wirtschaftsdaten (RatSWD)

---

Die *RatSWD Working Papers* Reihe startete Ende 2007. Seit 2009 werden in dieser Publikationsreihe nur noch konzeptionelle und historische Arbeiten, die sich mit der Gestaltung der statistischen Infrastruktur und der Forschungsinfrastruktur in den Sozial-, Verhaltens- und Wirtschaftswissenschaften beschäftigen, publiziert. Dies sind insbesondere Papiere zur Gestaltung der Amtlichen Statistik, der Ressortforschung und der akademisch getragenen Forschungsinfrastruktur sowie Beiträge, die Arbeit des RatSWD selbst betreffend. Auch Papiere, die sich auf die oben genannten Bereiche außerhalb Deutschlands und auf supranationale Aspekte beziehen, sind besonders willkommen.

*RatSWD Working Papers* sind nicht-exklusiv, d. h. einer Veröffentlichung an anderen Orten steht nichts im Wege. Alle Arbeiten können und sollen auch in fachlich, institutionell und örtlich spezialisierten Reihen erscheinen. Die *RatSWD Working Papers* können nicht über den Buchhandel, sondern nur online über den RatSWD bezogen werden.

Um nicht deutsch sprechenden Nutzer/innen die Arbeit mit der neuen Reihe zu erleichtern, sind auf den englischen Internetseiten der *RatSWD Working Papers* nur die englischsprachigen Papers zu finden, auf den deutschen Seiten werden alle Nummern der Reihe chronologisch geordnet aufgelistet.

Einige ursprünglich in der *RatSWD Working Papers* Reihe erschienen empirischen Forschungsarbeiten, sind ab 2009 in der RatSWD Research Notes Reihe zu finden.

Die Inhalte der *RatSWD Working Papers* stellen ausdrücklich die Meinung der jeweiligen Autor/innen dar und nicht die des RatSWD.

Herausgeber der RatSWD Working Paper Series:

Vorsitzender des RatSWD (2007/2008 Heike Solga; seit 2009 Gert G. Wagner)

Geschäftsführer des RatSWD (Denis Huschka)

# Menschen zählen aus dem All

## **Möglichkeiten und Grenzen von Satellitendaten zur Abschätzung der Bevölkerungsentwicklung und des Gebäudebestandes in deutschen Städten\***

Michael Wurm<sup>a,b\*</sup>, Hannes Taubenböck<sup>a</sup>, Jan Goebel<sup>c</sup>,  
Stefan Dech<sup>a,b</sup> und Gert G. Wagner<sup>c,d</sup>

- a Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), Oberpfaffenhofen, Deutschland
- b Lehrstuhl für Fernerkundung, Universität Würzburg, Würzburg, Deutschland
- c Längsschnittstudie Sozio-oekonomisches Panel, DIW Berlin, Berlin, Deutschland
- d Technische Universität Berlin und MPI für Bildungsforschung, Berlin, Deutschland

---

\* Der vorliegende Beitrag ist eine überarbeitete und erweiterte Fassung von Wurm & Taubenböck (2010a).

## Zusammenfassung

Menschen zählen aus dem All? Kann das denn möglich sein? Die Antwort lautet ja, allerdings ist diese Zählung nur in urbanen Räumen und nur auf indirekte Weise möglich. Aufgrund der indirekten Messung wird freilich gleichzeitig der Datenschutz perfekt gewahrt. Die hier dargestellte Methode beruht darauf, dass die physischen Objekte der Stadtlandschaft, die direkt aus Erdbeobachtungsdaten abgeleitet werden können, dazu benutzt werden, indirekt auf die Anzahl der dort lebenden Personen zu schließen. Diese Methode wird vor allem vor dem Hintergrund interessant, da Einwohnermelderegister insbesondere in Großstädten keine zuverlässige Auskunft über die Einwohnerzahlen geben. Sicherlich kann die Fernerkundung keine katastergenaue Informationen liefern, aber der Beitrag zeigt, dass aus dem All die Bevölkerung in ihrer kleinräumlichen Verteilung verblüffend genau *indirekt* geschätzt werden kann. Erdbeobachtungsdaten können *direkt* für gute Schätzungen des Gebäudebestandes genutzt werden. Derartige Schätzungen sind im Zeitraum zwischen Gebäude- und Wohnungszählungen, die typischerweise zusammen mit einem Zensus im Zehnjahresabstand stattfinden, sinnvoll. Erdbeobachtungsdaten können auch einen Bevölkerungszensus keineswegs ersetzen, aber die Erdbeobachtungsdaten vergrößern das Analysepotential von Zensusdaten.

## Abstract

Is it possible to count the earth's population from outer space? The answer is yes, in urban areas it is possible. However, this can only be done in an indirect manner: by identifying physical objects in the urban landscape in earth observation data and using these to estimate the number of inhabitants. Since the approach is indirect, data protection and the individual right to privacy are fully guaranteed. The data obtained using this method fill a gap, given that municipal population registers do not contain accurate population counts. However, remote sensing technology is not able to provide cadastral information. Nevertheless, as this paper shows, satellite imagery is capable of providing the basis for population estimates for small-scale areas. And, of course, remote sensing data also can be used to estimate the building stock. It would make sense to produce such estimates during the intervals between each building stock census, which is usually conducted every ten years with the population census. Remote sensing data cannot replace a population census, but can enrich the analytical power of population census data.

*Keywords:* Remote Sensing, spatial disaggregation, population estimation, census

*JEL Classification:* J11, C83, R14

## 1 Hintergrund

Der demographische Wandel in der westlichen Welt ist durch Rückgang, Alterung und Wanderungsbewegungen der Bevölkerung gekennzeichnet (Kilper & Müller, 2005). Diese Prozesse sind räumlich stark unterschiedlich ausgeprägt, so ist für München im Vergleich zu Städten wie Leipzig auch zukünftig Bevölkerungswachstum prognostiziert. Diese Prozesse haben entscheidenden Einfluss auf die Siedlungsentwicklung und -dichte, den Flächenverbrauch, die Mobilität sowie die technischen Infrastruktursysteme. Eine nachhaltige Raumentwicklung muss daher, neben physischen Indikatoren (vgl. z. B. Heiden & Heldens 2010, Taubenböck et al. 2010), auch auf einer aktuellen und fortschreibungsfähigen Informationsgrundlage zur Bevölkerungsverteilung basieren.

Daten zur kleinräumigen Bevölkerungsverteilung sind allerdings oftmals nicht verfügbar oder stark veraltet. Aufgrund der großen Dynamik vieler urbaner Räume sind Informationen zur kleinräumigen Bevölkerungsentwicklung allerdings besonders wichtig. Im Folgenden soll gezeigt werden, dass fernerkundliche Methoden (*remote sensing methods*) in der Lage sind, kostengünstige und flächendeckende Abschätzungen der Bevölkerungsverteilung, bei perfekter Wahrung des Datenschutzes, in einem indirekten Messverfahren, das einzelne Menschen nicht erkennen lässt, bereitzustellen. Das Verfahren arbeitet indirekt und einzelne Menschen bleiben völlig unsichtbar, weil Informationen zu Personen nicht direkt aus den fernerkundlichen Daten ableitbar sind, sondern nur über korrelierende Parameter, wie z.B. der Anzahl, Größe oder Höhe der Gebäude, die erkennbar sind, auf die Bevölkerungszahl geschlossen werden kann.

Der Beitrag stellt zugleich ein Mosaiksteinchen in einem möglichen künftigen Bild für einen modernen Zensus dar, also einer „Volkszählung“, die auf eine konventionelle Befragung aller (erwachsenen) Bürgerinnen und Bürger eines Landes verzichtet, sondern – wie erstmal der deutsche Zensus 2011 – vorhandene Daten miteinander kombiniert und durch spezielle Stichprobenerhebungen ergänzt. Fienberg und Prewitt (2010) fordern dazu: „The task ahead is formidable. Census communities need to gather ideas for creating more robust data collection using administrative and electronic sources to supplement the [...] surveys and to

help address problems of non-response. National census offices need to become more nimble in testing methodologies without jettisoning the best of current approaches.”

Der vorliegende Beitrag geht von einer ähnlichen Idee – die Bevölkerungszahl mit Hilfe von Fernbeobachtung indirekt zu erfassen – aus wie Sutton et al. (2001). Diese Autoren benutzten nächtliche Satellitenaufnahmen, die die Helligkeit auf der Erdoberfläche aufgrund künstlichen Lichts erfassen, als Indikator für die Bevölkerungsdichte von über 1000 Städten („census from heaven“). Dieser Ansatz ist für Großstädte in der Dritten Welt und stark wachsende Megastädte in Schwellenländern besonders interessant. Er kann auch zu einem Indikator für die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit ausgebaut werden, da mit steigendem Wohlstand das Ausmaß künstlicher Lichtquellen steigt (Henderson et al. 2009). Chen und Nordhaus (2010) zeigen überdies, dass „luminosity“ dazu dienen kann die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit von Ländern besser zu schätzen, die kein gutes amtliches Statistik-Berichtssystem haben.

Für die Erfassung der stadtstrukturellen Grundlageninformation zur Ableitung der kleinräumigen Bevölkerungsabschätzung wurde ein objekt-orientierter (Baatz & Schäpe, 2000), übertragbarer Prozessablauf entwickelt. Sowohl Daten von satelliten- als auch flugzeuggetragenen Fernerkundungssystemen werden genutzt, um dem Anspruch einer hohen räumlichen Auflösung gerecht zu werden.

Die dreidimensionalen Informationen eines digitalen Oberflächenmodells (DOM) werden mit Aufnahmen des höchst auflösenden, optischen Satellitenbildsystems IKONOS kombiniert (vgl. Taubenböck & Roth 2010), um sowohl die physische Struktur als auch die Landbedeckung in hoher geometrischer Genauigkeit von bis zu einem Meter abzuleiten. Damit liegen bereits wertvolle Informationen über den Gebäudebestand vor. Die für vorliegende Arbeit verwendete Methode zur Bildverarbeitung basiert auf Arbeiten von Esch et al. (2008), und Wurm et al. (2009) bzw. Wurm & Taubenböck (2010b). Die Herstellung der Daten- bzw. Informationsbasis in Form des 3-D Stadtmodells für die vorgestellte Bevölkerungsabschätzung wird von Wurm & Taubenböck (2010a) dargestellt.

Die Verknüpfung von Fernerkundungsdaten und sozioökonomischer Information ist bereits Gegenstand einer Vielzahl an wissenschaftlichen Arbeiten.

Chen (2002) zeigt den Zusammenhang von Zensusdaten und Siedlungsdichte, abgeleitet aus Landsat-TM Daten. Liu et al. (2006) entwickelten Methoden zur Verknüpfung von Bevölkerungsdichte und Texturinformation basierend auf Landschaftsstrukturmaße. Bereits 1999 wies Jensen auf die Identifikation von einzelnen Wohneinheiten aus höchst aufgelösten Fernerkundungsdaten und deren hohe Korrelation mit statistischen Daten hin, was von Aubrecht et al. (2009) durch die Integration von Höheninformation aus einem digitalen Oberflächenmodell aus *Airborne Laserscanning* (ALS) gezeigt wird. Die im vorliegenden Beitrag vorgestellte Methode zeigt, wie aus höchst aufgelösten optischen Satellitenbilddaten, digitalen Oberflächenmodellen (DOM) und zusätzlicher statistischer Information eine detaillierte Bevölkerungsabschätzung für München durchgeführt werden kann.

Im Folgenden wird in Abschnitt 2 das Problem der Erhebung und Berechnung kleinräumig aufgelöster Bevölkerungszahlen dargestellt. Abschnitt 3 beschreibt die verwendeten Daten aus Satelliten- und Flugzeugaufnahmen und Abschnitt 4 die zur räumlichen Verteilung der Bevölkerung genutzte Methode. Nach einer Darstellung der Ergebnisse und deren Validierung in Abschnitt 5 wird abschließend in Abschnitt 6 auf die mögliche Rolle der Fernerkundungsdaten zur Bevölkerungsabschätzung eingegangen.

## **2 Problemaufriß**

In Deutschland ist es Aufgabe des Statistischen Bundesamtes die offiziellen Zahlen über Bevölkerungsgrößen auf Gemeindeebene zu berechnen und regelmäßig zu aktualisieren (Bundesministerium der Justiz, 2009). Abhängig von der Größe und administrativen Struktur kann jede Gemeinde zusätzlich ihre eigenen Aufzeichnungen führen. Diese sind unterteilt in untergeordnete Verwaltungseinheiten wie beispielsweise Stadtbezirke oder Stadtviertel. Räumlich detailliertere Daten, wie auf Baublockebene, sind häufig nicht verfügbar beziehungsweise werden aus datenschutzrechtlichen Gründen in dieser hohen räumlichen Auflösung von Seiten der Gemeinden nicht an Dritte weitergegeben. Auch über den Gebäudebestand liegen aufgrund von nur allenfalls im Zehnjahresabstand (i. d. R. im Zusammenhang mit einem Bevölkerungszensus)



durchgeführten Gebäude- und Wohnungszählungen teilweise nur veraltete statistische Daten vor.

Aber gerade die Informationstiefe bis zu Baublöcken und Straßenabschnitten hin ist nicht nur für eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen zur Bevölkerungs- und Gebäudestruktur und deren Bedeutung für viele Lebensbereiche von Interesse, sondern kann auch den einzelnen Verwaltungseinheiten der Gemeinden als Basis für weiterführende Analysen dienen.

Ein räumlich hoch detailliertes Wissen über die Anzahl und Verteilung der Bevölkerung und der Gebäude in einem bestimmten Gebiet, kann für verschiedenste sozialwissenschaftliche, demographische, wirtschaftswissenschaftliche und viele andere Forschungsdisziplinen von großer Bedeutung sein. So zeigen Wurm et al. (2009) und BBK (2010) beispielhaft Analysen über die Abschätzung von Verwundbarkeitspotentialen der städtischen Bevölkerung gegenüber Hochwässer in Deutschland. Die Bereitstellung derartiger Analysen auf kleinräumiger Ebene kann beispielsweise bei der Entwicklung von Evakuierungsplänen oder bei der Dimensionierung von Vorsorgemaßnahmen (Einrichtung von Notunterkünften, flächenhaftem Hochwasserschutz, etc.) von Bedeutung sein.

Auch die im Städtevergleich zwischen München und Köln differierende Bevölkerungsdichteverteilung vom Zentrum in Richtung Stadtrand ist ein Beispiel einer analytischen Herangehensweise im Hinblick auf die Beantwortung demographischer Fragestellungen mit neuen Methoden (Fina et al., 2010).

Eine Vollerhebung der Bevölkerungszahlen und -struktur wird in Deutschland bestenfalls alle 10 Jahre im Rahmen einer Volkszählung (Zensus) durchgeführt. Dieser Rhythmus entspricht den internationalen Minimalvorgaben für Zensen (vgl. z.B. Grohmann 2009, Wagner 2010). Aufgrund der deutschen Vereinigung und konzeptionellen Problemen liegt der letzte Zensus allerdings länger als 10 Jahre zurück. In der DDR wurde die letzte Volkszählung 1981 und in Westdeutschland 1987 durchgeführt. Der nächste Zensus ist bereits angelaufen und wird mit Stichtag 9. Mai 2011 durchgeführt werden. Parallel dazu wird eine Gebäude- und Wohnungszählung bei Immobilienbesitzern durchgeführt (siehe z.B. <http://www.zensus2011.de/>).

Nur Vollerhebungen erlauben die Abschätzung der Bevölkerungszahl und des Gebäudebestandes auf kleinräumiger Ebene, da Stichproben zu kleine Fallzahlen aufweisen. Selbst eine im internationalen Vergleich sehr große amtliche Stichprobe, der Mikrozensus, der etwa 1% der Bevölkerung umfasst, liefert für ein durchaus beachtlich großes „Kiez“ mit beispielsweise 5000 Einwohnern nur 50 Fälle. Diese Fallzahl ist für aussagekräftige Ergebnisse viel zu klein und Registerdaten über Gebäude enthalten häufig nur rudimentäre Angaben über die Art und die Qualität der Bebauung.

Die Einwohnermelderegister, die konzeptionell alle Einwohner erfassen, sind insbesondere in Großstädten fehlerbehaftet, da es kein zentrales Einwohnermelderegister gibt und man sich *faktisch* weder abmelden noch anmelden *muss*, wenn man in einer bestimmten Wohnung lebt. So zeigen die Ergebnisse des Zensus-tests, dass insbesondere die so genannten „Karteileichen“ mit der Gemeindegröße zunehmen, in Großstädten über 800.000 Einwohnern ca. 8% (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2004). Da Finanzaufweisungen an Städte und Gemeinden von der Einwohnerzahl abhängen, haben diese auch kein großes Interesse ihre Einwohnermeldedaten um diese „Karteileichen“ zu bereinigen. Und es gibt Bevölkerungsgruppen, die sich nicht anmelden können, da sie illegal in einer Gemeinde bzw. (Groß)Stadt leben.

Gegenwärtig wird damit gerechnet, dass deswegen die Bevölkerungszahl für ganz Deutschland um mehr als 1,3 Million Personen *überschätzt* wird (Statistisches Bundesamt Deutschland 2008).

Wenn es gelingen würde aus Erdbeobachtungsdaten kleinräumig aufgelöste Bevölkerungszahlen im Querschnitt und in der zeitlichen Veränderung gut abschätzen zu können, wäre dies für die Stadtplanung ein immenser Gewinn. Der weitere Beitrag untersucht daher die vorhandenen und absehbaren Möglichkeiten am Beispiel der Stadt München. Dabei wird erst einmal davon ausgegangen, dass die für gesamte Städte bekannten Bevölkerungszahlen stimmen. Im Ausblick wird darauf eingegangen was es bedeutet, wenn diese zentrale Annahme nicht stimmt, wofür – wie oben ausgeführt – vieles spricht.

### 3 Daten

Um die Bevölkerungsaggregate, welche für ein gesamtes Stadtgebiet, oder administrative Teile davon vorliegen, auf einzelne Gebäude zu verteilen, bedarf es einer entsprechenden Datengrundlage. Die in diesem Papier vorgestellte Methode beruht auf der Ableitung eines 3-D Stadtmodells aus Fernerkundungsdaten (Wurm & Taubenböck, 2010b), welche einerseits aus optischen, höchst aufgelösten Satellitenbilddaten bestehen, und andererseits aus digitalen Oberflächenmodellen, welche – im vorliegenden Fall – aus stereoskopischen, flugzeuggestützten Aufnahmen bestehen, die über photogrammetrische Verfahren die Höhen der einzelnen Bildpunkte errechnen lassen.

Zum Zwecke der Validierung der Methode wird im Folgenden angenommen, dass die kleinräumigen Daten zur Bevölkerungsgröße, die die amtliche Statistik schätzt, hundertprozentig stimmen. Diese Annahme ist bekanntermaßen nicht völlig zutreffend, aber eine andere Möglichkeit zur Validierung der Methode besteht derzeit nicht.

#### 3.1 *Fernerkundungsdaten*

Optische Satellitenbilddaten mit einer ausreichenden geometrischen Auflösung für die detaillierte Charakterisierung von kleinräumigen städtischen Landschaften gibt es seit 1999. Aus diesen Bildern (vgl. Abb. 1, links) ist die physische Ausstattung des städtischen Raumes mit einem Detail von bis zu einem Meter erkennbar. Der im Satelliten angebrachte Sensor zeichnet in mehreren Wellenlängen (Blau, Grün, Rot, nahes Infrarot) die Erdoberfläche auf und ermöglicht somit auch die Identifikation von Merkmalen, welche dem menschlichen Auge verborgen bleiben würden.

Den zweiten, für die Ableitung der Höhe der einzelnen Gebäude wichtigen Datensatz stellt das digitale Oberflächenmodell (DOM, vgl. Abb. 1 rechts) dar. Dieses wird durch ein auf einem Flugzeug angebrachtes Kamerasystem hergestellt. Das System HRSC-AX (High Resolution Stereo Camera – Airborne Extended) wurde ursprünglich für die russische Mars96 Mission (Neukum et al., 1995) vom DLR entwickelt. Bei der Befliegung befindet sich neben den optischen

Aufnahmeinstrumenten auch ein Positionierungssystem aus GPS/INS (Global Positioning System/Inertial Navigation System), welches die exakte Verortung des Flugzeuges und auch der Aufnahmen ermöglicht. Die mit den einzelnen Kameras aufgenommenen stereoskopischen Bilder werden danach mittels photogrammetrischen Verfahren zu einem DOM umgewandelt. Die geometrische Auflösung der Daten ist identisch mit jener des Satellitenbildes. Im zeitlichen Kontext betrachtet, sind die beiden fernerkundlichen Datengrundlagen im Abstand von einem Jahr (IKONOS: 09/2003, HRSC-AX: 09/2004) aufgenommen worden.

**Abbildung 1:** Satellitenbilddaufnahme (links) und Oberflächenmodell (rechts) vom Zentrum Münchens.



Quelle: IKONOS: 09/2003, HRSC-AX: 09/2004 ; DLR 2010

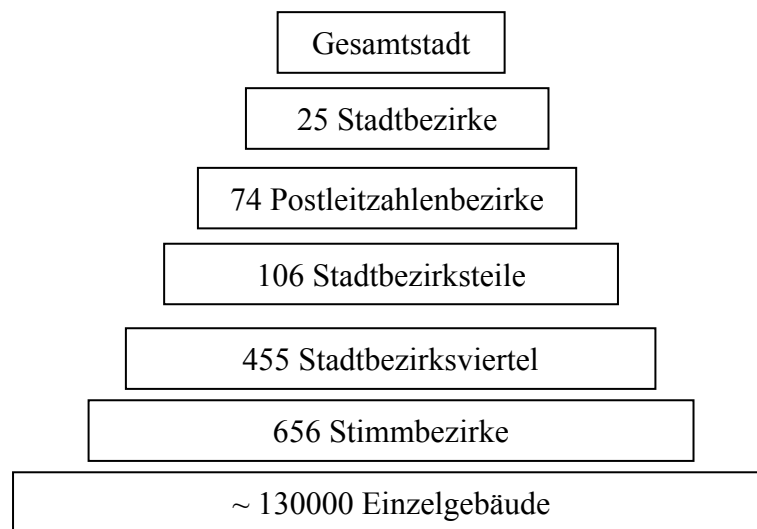
### 3.2 *Bevölkerungsdaten*

Daten, die Auskunft über die Bevölkerungsverteilung der Stadt München geben, wurden vom Statistischen Amt der Stadt München (Landeshauptstadt München, 2009) bezogen. Die Bevölkerungsdaten werden für sechs hierarchisch gegliederte Organisationseinheiten aufbereitet und zur Verfügung gestellt (Anzahl in Klammer): Gesamtstadt (1), Stadtbezirke (25), Postleitzahlenbezirke (74), Stadtbezirksteile (106), Stadtbezirksviertel (455) und Stimmbezirke (656) (vgl. Abbildung 2).

Ferner kann auf Basis von Einzeladressen jede beliebige Gebietsgliederung vorgenommen werden (Landeshauptstadt München, 2009). Die Einwohnerzahlen der jeweiligen Stadtbezirke für die Jahre 2004 und 2005 sind Tabelle 1 zu

entnehmen. Die Wohnbevölkerung für das Jahr 2005 ist zusätzlich angegeben, da für dieses Jahr Referenzdaten über die ansässige Bevölkerung auf Stadtbezirksteilebene vorliegen. Die Änderungsangaben  $\Delta EW$  ( $EW = \text{Einwohner}$ ) zeigen, dass die beiden Jahre keine dynamische Bevölkerungsbewegung aufweisen. Eine Vergleichbarkeit zwischen den beiden Jahren ist demnach gegeben und die Zahlen der Stadtbezirksteilebene von 2005 können für die Validierung der Ergebnisse über die Verteilung der Stadtbezirksbevölkerung von 2004 herangezogen werden.

**Abbildung 2:** Die geographischen Untergliederungen der Münchener Statistik.



Quelle: Landeshauptstadt München, 2009.

**Tabelle 1:** Bevölkerungszahlen für die Stadtbezirke Münchens (Stand 31.12.2004 bzw. 31.12.2005) am Ort der Hauptwohnung.

Nr.	Stadtbezirk	EW 2004	EW 2005	ΔEW ‰
0	München	1273180	1287975	0,116
1	Altstadt-Lehel	18210	18631	0,231
2	Ludwigsvorstadt-Isarvorstadt	43469	43954	0,112
3	Maxvorstadt	41581	42201	0,149
4	Schwabing-West	55231	56033	0,145
5	Au-Haidhausen	51383	52502	0,218
6	Sendling	35691	35966	0,077
7	Sendling-Westpark	48669	49472	0,165
8	Schwanthalerhöhe	25369	25507	0,054
9	Neuhausen-Nymphenburg	81921	82156	0,029
10	Moosach	46856	47193	0,072
11	Milbertshofen-Am Hart	63076	64612	0,244
12	Schwabing-Freimann	59602	59766	0,028
13	Bogenhausen	72982	73860	0,120
14	Berg am Laim	38145	39009	0,227
15	Trudering – Riem	48914	50990	0,424
16	Ramersdorf-Perlach	100845	100820	-0,002
17	Obergiesing	44473	45132	0,148
18	Untergiesing-Harlaching Thalkirchen-Obersendling-Forstenried-	46462	46857	0,085
19	Fürstenried-Solln	78056	79147	0,140
20	Hadern	43396	43981	0,135
21	Pasing-Obermenzing	62081	62724	0,104
22	Aubing-Lochhausen-Langwied	37595	37560	-0,009
23	Allach-Untermenzing	27374	27586	0,077
24	Feldmoching-Hasenberg	52958	53389	0,081
25	Laim	48841	48927	0,018

Quelle: Statistisches Amt der Landeshauptstadt München, 2005 und 2006.

## 4 Methoden

### 4.1 Erstellung des 3-D Stadtmodells

Die fernerkundlichen Bilder sind zunächst *Daten* und keine direkte *Information*. Die Stärke der Erdbeobachtung liegt darin, diese Datensätze in quantifizierbare Information zu transferieren. Die offensichtlichste Anwendung ist die direkte Erfassung der verschiedensten Elemente (z.B. Gebäude) der betrachteten Landschaft.

Seit Satellitenbilddaten Auflösungen von rund einem Meter erreichen, ist die Segmentierung ein essentieller Schritt in der Bildanalyse dieser Daten. Zugleich ist durch diese Auflösung der Datenschutz einzelnen Personen gegenüber gewährt, da diese nicht in den Daten erkennbar sind.

Traditionelle, pixelbasierte Klassifikationsmethoden haben auf Grund der durch die hohe Auflösung entstehenden spektralen Heterogenität innerhalb von Objekten (z. B. ein Dach mit kleinen Fenstern, oder Autos auf Straßen) nicht mehr das ausreichende Potential mit entsprechender Genauigkeit, Objekte richtig zu klassifizieren (Wurm & Taubenböck, 2010b). Objektorientierung bedeutet in der Fernerkundung, dass nicht einzelne Bildelemente (Pixel) betrachtet werden, sondern vielmehr Cluster von Pixeln, so genannte Segmente. Die grundlegende Funktion von Segmentierungsalgorithmen ist die Fusion von Pixeln basierend auf ihrer „spektralen Homogenität“ beziehungsweise der Differenzierung unterschiedlicher Segmente auf Grund ihrer Heterogenität (Schiewe, 2002). Mit Hilfe der berechneten Segmente ist es möglich, realitätsnahe und damit thematisch bedeutsame Objekte zu erstellen, welche mit räumlichen Mustern – der Wirklichkeit entsprechend – übereinstimmen (Blaschke & Strobl, 2001).

Basierend auf dem DOM können somit die erhöhten künstlichen Objekte in einer Landschaft, also Gebäude, zu räumlichen Einheiten zusammengefasst werden und von den anderen Elementen differenziert werden (vgl. Abbildung 1). Die Klassifikation dieser Segmente kann zudem auf die spektrale Information aus den optischen Satellitendaten des IKONOS Sensors zurückgreifen, um die korrekte Zuordnungswahrscheinlichkeit zu erhöhen.

Mit der Erfassung der Gebäudegrundrisse ermöglichen räumliche Differenzanalysen mit der umgebenden Geländeoberfläche die Möglichkeit, Gebäudehöhen als thematische Information zu integrieren. Aus den Spektralinformationen der

optischen Satellitendaten wird es möglich mittels objekt-orientierter Verfahren die restliche Landoberfläche ergänzend abzuleiten. So werden nicht nur Gebäude oder Straßen abgeleitet, sondern auch versiegelte Bereiche, Baumareale, Wiesen, offener Boden oder Wasserflächen raumbezogen klassifiziert.

Diese urbanmorphologischen Bausteine können eindeutig für eine Beschreibung der Stadtlandschaft identifiziert und quantifiziert werden und damit die Grundlage bieten, um indirekt weitere Informationen abzuschätzen. Eine ausführliche Beschreibung der Methode ist bei Wurm & Taubenböck (2010b) nachzulesen.

Für sämtliche der sieben Landnutzungsklassen wurde für München eine Genauigkeitsabschätzung auf der Basis eines visuellen Abgleichs der Ergebnisse mit Referenzdaten durchgeführt. Die Gesamtgenauigkeit beläuft sich demnach auf 94%. Die abgeleiteten Einzelgebäude wurden hinsichtlich ihrer Höhenabschätzung im Sinne von Stockwerken mit amtlichen Referenzdaten verglichen und liefern über alle Gebäudehöhen eine mittlere Genauigkeit von über 80%.

#### 4.2 *Räumliche Disaggregation der Bevölkerungsdaten*

Der Ansatz für die räumliche Disaggregation basiert auf Bevölkerungsdaten von München, die auf der Ebene der Stadtbezirke zur Verfügung stehen. Die Methode zielt auf eine Verteilung der Bevölkerungsdaten auf die räumliche Einheit von Einzelgebäuden ab (Steinnocher et al., 2005; Aubrecht et al., 2009). Diese Informationen auf Einzelhausniveau liegen mit dem abgeleiteten 3-D Stadtmodell (Wurm & Taubenböck, 2010b) aus IKONOS-Satellitenbilddaten und einem DOM aus HRSC-AX (*High Resolution Stereo Camera – Airborne Extended*) für das Jahr 2005 vor.

Die räumliche Verteilung der Bevölkerungsdaten basiert auf drei aufeinander aufbauenden Annahmen:

1. Die Bevölkerung lebt innerhalb der untersuchten Stadtbezirke räumlich gleichmäßig verteilt.
2. Die Bevölkerung lebt nur in Gebäuden, die einer Wohnnutzung zugeführt sind.
3. Die Anzahl der Personen pro Gebäude ist Abhängig von der Größe des Wohnraums.



Auf der Basis dieser vereinfachten Annahmen werden die folgenden Analyse-schritte durchgeführt. Da vor allem die Abschätzung der kleinräumigen, lage-treuen Verteilung der Bevölkerung von Interesse ist, werden Gebäude, welche mit großer Wahrscheinlichkeit zu industriellen oder gewerblichen Zwecken genutzt werden, von der Verteilung ausgeschlossen. Vor allem große Industrieanlagen würden in diesem Zusammenhang zu einer deutlichen Verzerrung der Ergebnisse führen.

Die Gebäudenutzung ist zwar nicht direkt aus Luft- oder Satellitenbild-aufnahmen ableitbar, aber physische Strukturmerkmale können Hinweise auf die Gebäudenutzung geben. So wird beispielsweise angenommen, dass großflächige Hallenbebauung, oftmals mit Flachdächern ausgestattet, keine für Wohnnutzung typische Baustruktur aufweist. Somit lassen sich ohne Zuhilfenahme weiterer externer Zusatzdaten auch indirekt automatisierte Aussagen zur Nutzung der Gebäude vornehmen. Die Einzelgebäude werden hierfür auf Basis von physischen Formkriterien wie beispielsweise Gebäudegrößen oder -höhen, in ‚Wohnnutzung‘ und ‚Nicht Wohnnutzung‘ klassifiziert. Die Ergebnisse werden anschließend visuell überprüft und eindeutige Fehlklassifikationen noch manuell bearbeitet.

Auf Basis der getroffenen Annahmen, wird die Verteilung der Gesamtbevölkerung nach folgender Gleichung (1) durchgeführt:

$$P_h = \frac{Wr_h}{Wr_g} \cdot P_g \quad (1)$$

wobei  $P_h$  die Bevölkerung pro Haus,  $Wr_h$  den Wohnraum pro Haus,  $Wr_g$  den Gesamtwohnraum und  $P_g$  die Gesamtbevölkerung auf Stadtbezirksebene darstellt. Der Wohnraum ist definiert als das mathematische Produkt aus der Gebäudefläche  $A_h$  und der Höhe des zugehörigen Gebäudes, angegeben in Anzahl der Geschosse  $h_h$ , abzüglich des Wohnungsleerstandes  $L$ , falls bekannt.

$$Wr_h = (A_h \cdot h_h) \cdot (1 - L) \quad (2)$$

Der Gesamtwohnraum für jeden Stadtbezirk  $Wr_g$  ergibt sich aus der Summe des Wohnraumes aller Einzelgebäude (3):

$$Wr_g = \sum_{h=1}^1 Wr_h \quad (3)$$

Für jene Münchener Stadtbezirke, welche räumlich vollständig vom abgeleiteten 3-D Stadtmodell abgedeckt werden, wird die Gesamtbevölkerung (aus Tabelle 1) kleinräumig nach Gleichung (1) auf die Einzelgebäude im jeweiligen Stadtbezirk verteilt: 1 – 10 (Altstadt-Lehel, Ludwigsvorstadt-Isarvorstadt, Maxvorstadt, Schwabing-West, Au-Haidhausen, Sendling, Sendling-Westpark, Schwantalerhöhe, Neuhausen-Nymphenburg und Moosach), 17, 18 und 25 (Untergiesing-Harlaching, Obergiesing und Laim).

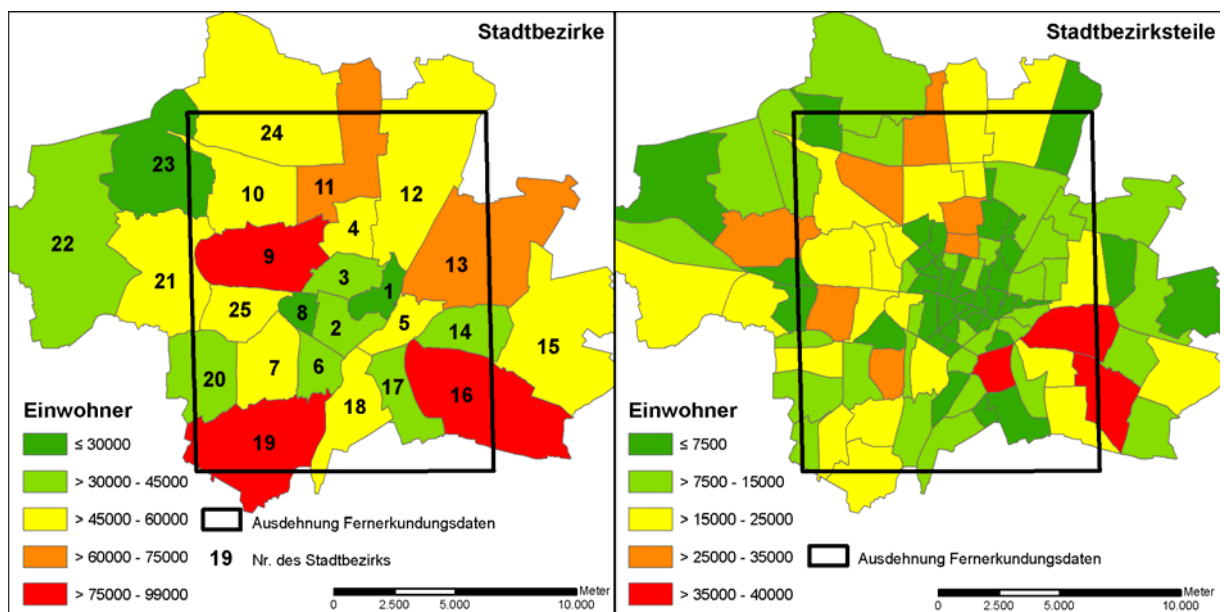
Allerdings ist für das vorliegende Stadtmodell keine gesamte Überdeckung des Münchener Verwaltungsgebietes gegeben, da die Satellitenbilddaufnahme des Sensors IKONOS mit einer West-Ost Ausdehnung von ca. 11km und einer Nord-Süd Ausdehnung von 14,6km (vgl. München: West-Ost: ca. 27km, Nord-Süd: ca. 21km) begrenzt ist (vgl. Abbildung 3). Somit ist für die Stadtbezirke mit den laufenden Nummern 11-14, 16, 19-21 und 23-24 (Milbertshofen-Am Hart, Schwabing-Freimann, Bogenhausen, Berg am Laim, Ramersdorf-Perlach, Thalkirchen-Obersendling-Forstenried-Fürstenried-Solln, Hadern, Pasing-Obermenzing, Allach-Untermenzing und Feldmoching-Hasenbergl) nur eine teilweise räumliche Überdeckung mit dem 3-D Stadtmodell gegeben. Für Gebäude, die in diesen Stadtbezirken liegen, wird die nächste untergeordnete Raumeinheit für die Verteilung der Gesamtbevölkerung herangezogen: Stadtbezirksteile werden von der amtlichen Statistik der Stadt München als 4. Hierarchiestufe geführt und beschreiben eine kleinräumigere administrative Einheit als die übergeordneten Stadtbezirke (vgl. Abbildung 2).

Für die beiden Stadtbezirke 22 und 15 (Aubing-Lochhausen-Langwied und Trudering-Riem) besteht keine Überlagerung mit dem 3-D Stadtmodell. Sie werden daher bei der Abschätzung der lokalen Bevölkerungsverteilung nicht berücksichtigt.

## 5 Ergebnisse und Validierung

Das Potential, das aus fernerkundlichen Datensätzen extrahierte 3-D Stadtmodell als physische Grundlage zur räumlichen Verfeinerung von Bevölkerungsdaten zu Nutzen, wird bei einer Gegenüberstellung der Abbildungen 3 und 4 deutlich: Die räumliche Verfeinerung zeigt die Bevölkerungsverteilung auf die individuellen Baustrukturen projiziert. Es stehen somit Bevölkerungsdaten zur Verfügung, die, nicht wie in Abbildung 3, durch eine Aggregation auf administrative Regionsebenen lokale Konzentrationen verschleiern. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Bevölkerungsverteilung für einen Ausschnitt der Münchener Innenstadt.

**Abbildung 3:** Bevölkerungsanzahl für die Stadtbezirke (links) und die Stadtbezirksteile (rechts) von München sowie die Ausdehnung der Fernerkundungsdaten.



Quelle: Wurm & Taubenböck 2010a.

**Abbildung 4:** Ergebnis der Bevölkerungsverteilung auf Gebäudeebene



Quelle: Wurm & Taubenböck 2010a.

Um die Güte der ermittelten Verteilung der Stadtbezirksbevölkerung auf die kleinere räumliche Ebene der Einzelgebäude beurteilen zu können, muss das Ergebnis mit einem vergleichbaren Referenzdatensatz validiert werden. Die kleinräumigste Ebene, für welche Referenzzahlen vorliegen, ist jene der Stadtbezirksteile. Die Ergebnisse auf Einzelgebäudeebene werden für die Validierung deshalb auf Stadtbezirksteile zusammengefasst und mit den Referenzdaten verglichen. Vor allem die innenstadtnahen Stadtbezirke sind in verhältnismäßig viele Stadtteilbezirksteile gegliedert und stellen somit eine valide, kleinräumige Vergleichsmöglichkeit dar (Anzahl der Stadtteilbezirke): Altstadt-Lehel (5), Ludwigsvorstadt-Isarvorstadt (8) und Maxvorstadt (9) (vgl. Abbildung 3).

Die Ergebnisse zeigen für Stadtbezirksteile mit hohem Wohnnutzungsanteil sehr hohe Genauigkeit der Disaggregation der Bevölkerungsdaten. Beispiele sind das Lehel mit -8,8%, Am alten südlichen Friedhof mit -3,2%, die Untere Au mit -2,9% oder am Gärtnerplatz mit -5,9% mit einer geringfügigen Unterschätzung der Bevölkerung. Genauso gibt es vergleichbar hohe Genauigkeiten in Stadtbezirksteilen wie z. B. dem Sendlinger Feld mit +4,3%, Haidhausen-Süd mit +2,7% oder das Westend mit +5,5% mit geringfügiger Überschätzung der Wohnbevölkerung wie sie die Bevölkerungsstatistik ausweist.

Aufgrund der Ungenauigkeiten der Bevölkerungsstatistiken können diese kleinen Abweichungen „in Wahrheit“ sogar der Realität entsprechen, d.h. es kann nicht ausgeschlossen werden, dass – zumindest für bestimmte Quartiere mit hoher Fluktuation – Fernerkundungs-Abschätzung besser sein können als die amtliche Bevölkerungszahl, wenn letztere auf einem langen Fortschreibungszeitraum basiert.

Auf jeden Fall zeigen die Ergebnisse ein im Prinzip beachtliches *Potential* dieser interdisziplinären Verknüpfung statistischer Datensätze auf einer administrativen räumlichen Einheit mit räumlich höher aufgelösten Datensätzen basierend auf Daten und Methoden der Fernerkundung.

In Gebieten mit einer höheren Durchmischung der Gebäudenutzung bzw. sogar einem überwiegendem Anteil gewerblich und industriell genutzter Areale, zeigen sich auch Limitierungen des fernerkundlichen Ansatzes. In Tabelle 2 auffällig sind die stark überschätzten Zahlen für die Stadtbezirksteile Kreuzviertel (Nr. 1.4), Ludwigsvorstadt-Kliniken (Nr. 2.7) und Königsplatz (Nr. 3.1). Eine genauere Betrachtung dieser Gebiete zeigt, dass die automatische Klassifikation der Gebäudenutzungen auf Basis physiognomischer Merkmale nicht die erforderliche Verlässlichkeit aufweist. Vor allem hinsichtlich der Gebäude der Hauptgeschäftsstraße Münchens (Kaufingerstraße, Neuhauser Straße – Kreuzviertel), vieler universitärer Einrichtungen (Königsplatz) und der Kliniken der Universität München (Ludwigsvorstadt-Kliniken) ist eine rein auf physiognomische Merkmale beschränkte Ableitung der wahrscheinlichen Gebäudenutzung fehlerbehaftet. Dieses Problem könnte theoretisch mit der Zuspiegelung externer Gebäudenutzungsdaten umgangen werden und damit auch für stark durchmischte oder überwiegend gewerblich genutzte Areale ähnlich hohe Genauigkeiten wie für reine Wohngebiete liefern.

Um aber, unabhängig von externen Daten, die Genauigkeit der Disaggregation mit fernerkundlichen Informationen einschätzen zu können, zeigt Tabelle 2 den flächendeckenden Vergleich zwischen den abgeschätzten Personenzahlen und den Referenzdaten.

**Tabelle 2:** Genauigkeitsabschätzungen der Ergebnisse auf Stadtbezirksebene

Nr.	Name	f%	Nr.	Name	f%
1.1	Graggenau	18,5	5.3	Haidhausen – Nord	-3,8
1.2	Angerviertel	-20,9	5.4	Haidhausen – Süd	2,7
1.3	Hackenviertel	17,1	5.5	Obere Au	-27,8
1.4	Kreuzviertel	563,4	5.6	Untere Au	-2,6
1.5	Lehel	-8,8	6.1	Untersending	-8,2
1.6	Englischer Garten Süd	-61,2	6.2	Sendlinger Feld	4,3
2.1	Gärtnerplatz	-5,6	7.1	Mittersending	-4,1
2.2	Deutsches Museum	-30,1	7.2	Land in Sonne	-8,4
2.3	Glockenbach	-36,3	7.3	Am Waldfriedhof	12,8
2.4	Dreimühlen	-60,6	8.1	Westend	5,5
2.5	Am alten südlichen Friedhof	-3,2	8.2	Schwanthalerhöhe	-11,0
2.6	Am Schlachthof	-47,5	9.1	Neuhausen	17,1
2.7	Ludwigsvorstadt-Kliniken	185,7	9.2	Nymphenburg	-27,7
2.8	St. Paul	48,9	9.3	Oberwiesenfeld	-11,5
3.1	Königsplatz	669,8	9.4	St. Vinzenz	3,9
3.2	Augustenstraße	21,9	9.5	Alte Kaserne	15,6
3.3	St. Benno	-16,4	9.6	Dom Pedro	-1,3
3.4	Marsfeld	-15,9	10.1	Alt Moosach	9,1
3.5	Josephsplatz	-37,1	10.2	Moosach-Bahnhof	-12,2
3.6	Am alten nördlichen Friedhof	-41,3	17.1	Obergiesing	-16,8
3.7	Universität	39,3	17.2	Südgiesing	86,0
3.8	Schönfeldvorstadt	9,9	18.1	Untergiesing	0,5
3.9	Maßmannbergl	-24,9	18.2	Siebenbrunn	-29,9
4.1	Neuschwabing	21,9	18.3	Giesing	-11,5
4.2	Am Luitpoldpark	-27,4	18.4	Neuharlaching	-10,8
4.3	Schwere-Reiter-Straße	52,5	18.5	Harlaching	30,2
5.1	Maximilianeum	24,5	25.1	Friedenheim	2,8
5.2	Steinhausen	33,8	25.2	St. Ulrich	-1,6

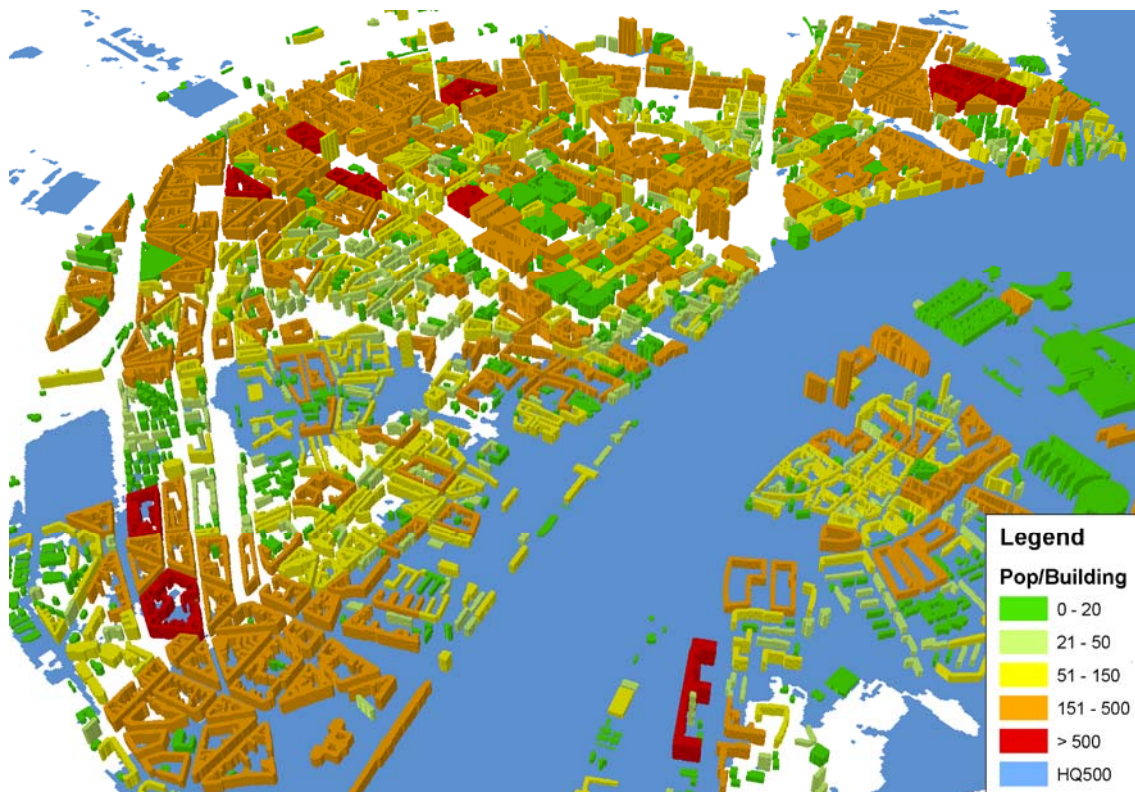
Quelle: Eigene Berechnungen

Die Abweichungen der Ergebnisse zur Referenzinformation sind jeweils in der dritten Spalte dargestellt und zeigen den Messfehler ( $f$ ) sowohl in positiver (Überschätzung) als auch in negativer Richtung (Unterschätzung). Die mittlere relative Abweichung der lokalen Disaggregation, ohne die drei bereits erwähnten Ausreißer, beträgt 20,8%, der Median 16,4% und die Standardabweichung 18,2%.

Für 25% der abgeschätzten Personenzahlen (1. Quartil) wurde eine Abweichung von weniger als 8,2% erreicht und Dreiviertel (3. Quartil) lagen unter 29,9%.

Die im vorliegenden Beitrag dargestellte Methode zur Verteilung der Gesamtbevölkerung wurde – mit ähnlichen Datengrundlagen – auch auf andere räumliche Gebiete in Deutschland angewendet. Anhand von ebenfalls höchst aufgelösten, optischen Satellitenbilddaten und einem digitalen Oberflächenmodell aus flugzeuggetragenem Laserscanning wurden weitere Abschätzungen der betroffenen Bevölkerung im Falle eines Hochwasserereignisses für die Städte Köln und Dresden durchgeführt (Wurm et al., 2009 und BBK, 2010). Die erzielten Genauigkeiten und Limitierungen sind mit jenen im vorliegenden Beitrag vergleichbar. Die Darstellung der Exposition gegenüber dem potentiellen Extremhochwasser (Abbildung 5) zeigt das Potential, welches durch räumliche Analysen möglich wird. Ist die Datengrundlage der lokalen Bevölkerungsverteilung erst einmal erhoben, können eine Vielzahl an zusätzlichen räumlichen Merkmalen oder Indikatoren in ihrem Bezug auf den Menschen analysiert werden.

**Abbildung 5:** Ergebnis der Bevölkerungsverteilung auf Gebäudeebene für die Stadt Köln mit überlagerter Ausdehnung eines potentiellen Extremhochwassers des Rheins



Quelle : Wurm et al. (2009a).

## 6 Ausblick

Der Beitrag zeigt eine *Möglichkeit* mit fernerkundungsbasierten und auf kommunaler Ebene statistisch erhobenen Daten die Bevölkerungs- und Gebäudeverteilung in heterogenen Stadtgebieten kleinräumig abzuschätzen. Die Methode beruht auf der automatischen Identifikation von Einzelgebäuden bzw. -typen aus Fernerkundungsdaten. Die Darstellung von Gebäuden kann direkt aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden. Für die Berechnung der Bevölkerung im Raum werden aggregierte Bevölkerungsdaten von Städten auf die Gebäudeebene disaggregiert, um anschließend kleinräumige Auswertungen bis unterhalb der Ebene von Stadtbezirken zu erlauben. Die Methode beruht auf der automatischen Identifikation von Einzelgebäuden bzw. -typen aus Fernerkundungsdaten.

Da einzelne Personen in den Daten der Fernerkundung im wahrsten Sinne des Wortes unsichtbar sind, entsteht kein Datenschutzproblem. Die Schätzungen der Bevölkerungszahlen basieren nicht auf der Erkennung einzelner Personen, sondern auf Informationen über die *typische* Nutzung bestimmter Gebäudetypen. Einzelfälle werden also im Wortsinne nicht betrachtet.

Wie eingangs erwähnt, kann es sich hierbei nur um eine Abschätzung der Größenordnung von Bevölkerungsverteilungen handeln. Zum einen müssen Unsicherheiten berücksichtigt werden, die sich aus der ungleichmäßigen Wohnraumausnutzung der Bevölkerung ergeben. Zum zweiten stellt die exakte, indirekte Bestimmung der tatsächlichen Nutzung jedes Gebäudes mit Fernerkundungsdaten und -methoden eine große Herausforderung dar. Eine Verbesserung der Genauigkeit der lokalen Disaggregation der Bevölkerung kann daher über visuelle Nachbearbeitung oder über die Integration von Zusatzdaten, welche Informationen zur Nutzung von Gebäuden beinhalten (Aubrecht et al., 2009), erfolgen.

Für die in diesem Aufsatz dargestellten Abschätzungen zeigen deren Validierung in urbanen Gebieten mit überwiegender Wohnnutzung beachtliche Genauigkeiten von weniger als 5% Abweichung. Die mittlere Abweichung der Gesamtergebnisse, in die auch dünn besiedelte Stadtflächen eingehen, von 20,8% von Referenzdaten zeigt aber auch die Limitierungen der Methode über Fernbeobachtung die Bevölkerungsdaten abzuschätzen. Wie oben erwähnt, kann



die Genauigkeit der Abschätzung unter Zuhilfenahme von weiteren Datenquellen – insbesondere die Gebäudenutzung betreffend – weiter erhöht werden.

Die in diesem Beitrag durchgeführten exemplarischen Berechnungen und Validierung zeigen, dass die kleinräumige Abschätzung von Bevölkerungsverteilungen eine Möglichkeit darstellen, um für Großstädte die Bevölkerungszahlen, die auf den Melderegistern beruhen, in den Raum zu übertragen. Eine offene Frage ist allerdings noch, ob diese Methode auch genutzt werden kann um Bevölkerungsentwicklungen mit Hilfe der Veränderungen im Wohnungsbestand über die Zeit zu beschreiben. Eine solche Abschätzung von entsprechend kleinräumigen *Bevölkerungsentwicklungen* würde nicht nur helfen die – insbesondere in der Zeit zwischen den Zensen zunehmenden – Ungenauigkeiten in den Melderegistern zu prüfen und für Planungszwecke ggf. zu korrigieren, sondern wäre auch für wissenschaftliche Analysen und dem Stadtmonitoring von Interesse.

Auch könnte die Korrektur von kleinräumigen Bevölkerungszahlen auf Basis von Fernbeobachtungsdaten für die 10 Jahre, die üblicherweise zwischen Volkszählungen (Zensen) liegen, eine Möglichkeit sein, um einen „permanenten Zensus“ zu vermeiden, der zum Beispiel künftig in der Schweiz auf Basis von zentral zusammengeführten Daten aus Einwohnermeldeämtern etabliert wird<sup>1</sup>. Die *Fernerkundungs-Methode* ist sicherlich deutlich ungenauer als ein *permanenter Zensus*. Sie hat aber auch Vorteile wenn es etwa um die Abschätzung der tatsächlichen Wohnbevölkerung in Gegenden geht, in denen viele illegale Migranten leben.

Mit punktuellen, exaktem Wissen über Bevölkerungszahlen in bestimmten Gebäudetypen besteht auch die Möglichkeit diese Information über Extrapolationsmethoden auf das ganze Stadtgebiete hochzurechnen. Über diese Hochrechnung ließen sich geschätzte und statistische Bevölkerungszahlen von Städten erfassen und bewerten, eventuell mit einer belastbaren Aussage zu der tatsächlichen Anzahl an „Karteileichen“.

Erdbeobachtungsdaten, die die Berechnung der kleinräumigen Bevölkerungszahlen auf fehlerhaften Bevölkerungsaggregaten für gesamte Städte basieren,

---

<sup>1</sup> Vgl. (<http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index/news/00/03/01.html>).

können den Gesamtfehler natürlich nicht korrigieren. Freilich könnten die Erdbeobachtungsdaten helfen, die *Veränderungen* von Bevölkerungszahlen abzuschätzen, indem die Bevölkerungszahl eines Basisjahres – anhand der städtischen Gesamtbevölkerung – kalibriert wird und die Veränderungen nur auf Erdbeobachtungsdaten beruhen.

Umgekehrt gilt: würden aufgrund eines „permanenten Zensus“ nach schweizerischem Vorbild gute Bevölkerungsdaten auf kleinräumiger Ebene vorliegen, dann könnten mit Erdbeobachtungsdaten zusätzliche Indikatoren oder Parameter für räumliche Analysen durchgeführt werden um z.B. die Nachbarschaft der Bevölkerung zu charakterisieren (z.B. Gebäudetypen) oder Informationen über sich verändernde Umweltbedingungen (z.B. Luftbelastung) und ihren Einfluss auf die lokalen Lebensbedingungen zu untersuchen.

Auf jeden Fall gilt, dass die Nutzung von datenschutzrechtlich unbedenklichen Erdbeobachtungsdaten zu den technischen Möglichkeiten gehören sollte, die für die Weiterentwicklung der Bevölkerungsstatistiken geprüft werden sollte. Die Bevölkerungszahlen sind für Großstädte notorisch unzuverlässig und genau für Großstädte sind Erdbeobachtungsdaten aussagekräftig. Ob der hier vorgestellte Ansatz jemals genau genug sein wird, um die Bevölkerungsentwicklung kleinräumig abzuschätzen, ist aber sicherlich eine offene Frage. Die Methodik sollte aber im Sinne der Forderung von Fienberg und Prewitt (2010) geprüft werden neue Methoden für die amtliche Statistik zu testen.

Abschließend wollen wir betonen, dass die hier vorgestellte Methode keinesfalls einen Zensus ersetzen kann. Die Ergebnisse der Fernbeobachtungen können freilich dazu dienen Zensusdaten noch aussagekräftiger zu machen als sie es alleine sein können. Angesichts des Aufwandes, der mit einem Zensus verbunden ist, sollten alle Möglichkeiten geprüft werden die Aussagekraft der konventionellen Zensusdaten durch einen „census from heaven“ (Sutton et al. 2001) zu erhöhen. Dazu wollen wir mit diesem Beitrag, der die Basis für Diskussionen sein soll, beitragen.

## Literaturverzeichnis:

- Aubrecht, C., Steinnocher, K., Hollaus, M. und Wagner, W. (2009): Integrating earth observation and GIScience for high resolution spatial and functional modeling of urban land use. *Computers, Environment and Urban Systems* 33(1), S. 15-25.
- Baatz, M. und Schäpe, A. (2000): Multiresolution Segmentation: an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII: Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*, S. 12-23
- BBK - Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (Hrsg.) (im Druck): Verwundbarkeitsassessment gegenüber Hochwasserereignissen auf kommunaler Ebene. (Schriftenreihe Praxis im Bevölkerungsschutz, Bd. 4).
- Bundesministerium der Justiz (2009): Bevölkerungsstatistikgesetz (BevStatG, BGBl. I S. 1290) und Bundesstatistikgesetz (BStatG, BGBl. I S. 2246), <http://bundesrecht.juris.de>
- Chen, K. (2002): An approach to linking remotely sensed data and areal census data. *International Journal of Remote Sensing* 23 (1), S. 37-48.
- Esch, T., Thiel, M., Bock, M. und Dech, S. (2008): Improvement of image segmentation accuracy based on multi-scale optimization procedure. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 5, Nr. 3.
- Fienberg, St. und Prewitt, K. (2010): Save your census. *Nature* 466, S. 1043.
- Fina, S., Taubenböck, H., Wurm, M. und Siedentop, S. (2010): Planungsrelevante Messgrößen der Stadtentwicklung – was leisten hoch aufgelöste Fernerkundungsdaten? In: Taubenböck, H. und Dech, S. (Hrsg.): *Fernerkundung im urbanen Raum – Erdbeobachtung auf dem Weg zur Planungspraxis*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, S.129-142.
- Grohmann, H. (2009): Von der Volkszählung zum Registerzensus: Paradigmenwechsel in der deutschen amtlichen Statistik. *ASTa Wirtschafts- und Sozialstatistisches Archiv* 3, S. 3-23.
- Heiden, U. und Heldens, W. (2010): Automatische Erkennung von Oberflächenmaterialien städtischer Objekte. In: Taubenböck, H. und Dech, S. (Hrsg.): *Fernerkundung im urbanen Raum – Erdbeobachtung auf dem Weg zur Planungspraxis*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, S.83-85.
- Henderson, J. V., Storevgard, A. und Weil, D. N., (2009): *Measuring Economic Growth from Outer Space*. NBER Working Paper No. 15199. Cambridge, Mass.
- Jensen, J. R. und Cowen, D. C. (1999): Remote Sensing of Urban/Suburban Infrastructure and Socio-Economic Attributes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 65, S. 611-622.
- Kilper, H. & B. Müller (2005): Demographischer Wandel in Deutschland. – *Geographische Rundschau*, 3: 36–41.
- Chen, X. und Nordhaus, W. D. (2010); *The Value of Luminosity Data as a Proxy for Economic Statistics*. NBER Working Paper No. 16137. Cambridge, Mass.
- Landeshauptstadt München (2009): Statistisches Amt der Stadt München. <http://www.muenchen.de/Rathaus/dir/statistik/37879/index.html>
- Liu, X., Clarke, K. und Herold, M. (2006): Population Density and Image Texture: A Comparison Study. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72, S. 187-196.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder (2004): *Ergebnisse des Zensus 2002*. *Wirtschaft und Statistik* 8, S. 813-833.
- Statistisches Amt der Landeshauptstadt München (2006): *Statistisches Taschenbuch 2006. München und seine Stadtbezirke*. 195 S. [http://www.mstatistik-muenchen.de/themen/stadtbezirke/stadtbezirkszahlen\\_2005/taschenbuch\\_2006.pdf](http://www.mstatistik-muenchen.de/themen/stadtbezirke/stadtbezirkszahlen_2005/taschenbuch_2006.pdf)
- Statistisches Bundesamt Deutschland (2008): Pressemitteilung Nr. 265 vom 22.07.2008. [http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Presse/pm/2008/07/PD08\\_265\\_121,templateId=renderPrint.psml](http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Presse/pm/2008/07/PD08_265_121,templateId=renderPrint.psml)
- Statistisches Bundesamt Deutschland (2009): *Genesis-Online Datenbank. Jährliche Erhebung der Siedlungs- und Verkehrsflächen*. Wiesbaden. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/logon>
- Steinnocher, K., Petrini, F., Tötzer, T. und Weichselbaum, J. (2005): Räumliche Disaggregation von sozio-ökonomischen Daten, *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XVII-Beiträge zum AGIT-Symposium*.
- Sutton, P., Roberts, D., Elvidge, C. und Baugh, K. (2001): Census from Heaven: an estimate of the global human population using night-time satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 22(16), 3061-3076..

- Taubenböck, H., Heldens, W., Heiden, U. und Wurm, M. (2010): Physische Indikatoren für die Stadtplanung. In: Taubenböck, H. und Dech, S. (Hrsg.): Fernerkundung im urbanen Raum – Erdbeobachtung auf dem Weg zur Planungspraxis. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, S.86-93.
- United Nations (2008): World Urbanization Prospects. The 2007 Revision. New York, 244 S.
- Wagner, G. G. (2010): Volkszählung bitte nicht überfrachten - vor allem nicht hinsichtlich der Erwartungen. RatSWD Working Paper No. 134. Berlin.
- Wurm, M., Taubenböck, H., Roth, A. und Dech, S. (2009): Urban structuring using multisensoral remote sensing data. By the example of the German cities Cologne and Dresden. In: Proceedings of Urban Remote Sensing Joint Event 2009, 8. S.
- Wurm, M. und Taubenböck, H. (2010a): Abschätzung der Bevölkerungsverteilung mit Methoden der Fernerkundung. In: Taubenböck, H. und Dech, S. (Hrsg.): Fernerkundung im urbanen Raum – Erdbeobachtung auf dem Weg zur Planungspraxis. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, S.143-152.
- Wurm, M. und Taubenböck, H. (2010b): Das 3-D Stadtmodell als planungsrelevante Grundlageninformation. In: Taubenböck, H. und Dech, S. (Hrsg.): Fernerkundung im urbanen Raum – Erdbeobachtung auf dem Weg zur Planungspraxis. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, S.66-75.
- Wurm, M, Goebel, J. und Wagner, G. G. (2010d): Integration raumrelevanter Indikatoren in sozial- und verhaltenswissenschaftliche Analysen, In: Taubenböck, H. und Dech, S. (Hrsg.): Fernerkundung im urbanen Raum – Erdbeobachtung auf dem Weg zur Planungspraxis. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, S.153-162.