



GebäuDE-21

Konzeptionierung und Vorstudie zur Nutzung von
amtlichen Gebäudebestandsdaten und
Fernerkundungsdaten als aktuelle Geodatenbasis
zur Integration für einen Zensus 2021 am Beispiel
eines typischen Testgebietes

erstellt durch



18.12.2015



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	7
1 Hintergrund: Zensus	7
1.1 Registergestützter Zensus in Deutschland	7
1.1.1 Gebäude- und Wohnungszählung	8
1.1.2 Anschriften- und Gebäuderegister	9
1.2 Fernerkundung und Geodaten als alternative Datenquelle für die Erstellung und Aktualisierung von Gebäuderegistern.....	9
2 Zielstellung	10
2.1 Struktur des Gesamtvorhabens.....	11
2.2 Arbeitsziele und Vorgehensweise	11
3 Übersicht über mögliche Datenquellen	12
3.1 Fernerkundungsdaten	12
3.2 Geobasisdaten.....	13
3.2.1 Amtliche Hausumringe (HU-DE)	14
3.2.2 Georeferenzierte Adressdaten (GA) und amtliche Hauskoordinaten (HK-DE)	14
3.2.3 3D-Gebäudemodell LoD1 Deutschland (LoD1-DE)	16
3.2.4 ATKIS Basis-DLM	16
3.2.5 Gebäudedaten aus ALKIS.....	17
3.2.6 Flurstücke aus ALKIS	17
3.3 Nutzergenerierte Geodaten	18
4 Projektrealisierung	19
4.1 Auswahl und Beschreibung des Testgebietes	19
4.2 Erstellung von Referenzdatensätzen.....	20
4.2.1 Referenz für die satellitenbildbasierte Veränderungsanalyse	20
4.2.2 Gebäudereferenzdatensatz.....	21
4.2.3 Differenzierung nach der Wohnnutzung.....	23
4.3 Berechnung von Gebäudemerkmalen.....	24
4.4 Veränderungsanalyse von urbanen Strukturen auf Basis von Erdbeobachtungsdaten – „Change detection“	25
4.4.1 Datenvorverarbeitung und Prozessierung	26
4.4.2 Berechnung der Bildmerkmale.....	27
4.4.3 Change detection	28

4.5	Identifikation potentieller Wohngebäude	29
4.5.1	Identifikation irrelevanter Gebäude.....	30
4.5.2	Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten einer Wohnnutzung.....	30
5	Ergebnisse	31
5.1	Veränderungsanalyse – „Change Detection“	31
5.1.1	Änderungen der urbanen Struktur.....	32
5.1.2	Bewertung	34
5.2	Identifikation potentieller Wohngebäude auf Basis von HU und ATKIS	35
5.2.1	Beschreibung der Struktur der Daten	35
5.2.2	Adressierte Wohngebäude (GA im HU).....	36
5.2.3	Ermittlung von Größenschwellwerten für den Ausschluss irrelevanter Gebäude.....	37
5.2.4	Anwendung der Schwellwerte	41
5.2.5	Nutzung der Flächennutzung aus ATKIS für die Gebäudebeschreibung.....	42
5.3	Identifikation potentieller Wohngebäude auf Basis des 3D-Gebäudemodells (LoD1-DE)....	44
6	Ausblick	44
7	Quellen	46

Abkürzungsverzeichnis

Adv	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
AGR	Anschriften- und Gebäuderegister
ALKIS	Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem
AOG	Anzahl oberirdischer Geschosse
ArcGis	Geoinformationssoftware der Firma ESRI
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
BASIS-DLM	Maßstabsloses Digitales Landschaftsmodell
BAW	Bauweise
BJA	Baujahr
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BMI	Bundesministerium des Innern
DAF	Dachform
DGM	Digitales Geländemodell
DGM50/250/1000	Digitales Geländemodell im Maßstab 1:50.000; 1:250.000; 1:1.000.000
DLKM	ALKIS-Objektartenkatalog
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DOP	Digitale Orthophotos
DTK	Digitale Topographische Karte
ETRS 89	Europäisches Terrestrisches Referenzsystem 1989
GA	Georeferenzierte Adressdaten
Geobasis NRW	Landesvermessung Nordrhein-Westfalen (NRW)

GeoInfoDok	Dokumentation zur Modellierung der Geoinformationen des amtlichen Vermessungswesens
GFL	Geschossfläche
GIS	Geographisches Informationssystem
GLCM	Grey-level cooccurrence matrix
GPS	Globales Positionierungssystem
GVHU	Gemeinschaft zur Verbreitung der Hausumringe
GVISYS	Gemeindeverzeichnis-Informationssystem
Halcon	Bildverarbeitungssoftware der Firma MVTec Software GmbH
HHO	Gebäudehöhe
HK-DE	amtliche Hauskoordinaten (Deutschland)
HU-DE	Hausumringe (Deutschland)
IÖR	Leibniz-Institut für Ökologische Raumentwicklung
LoD1	Level of Detail Stufe 1 (3D Gebäudemodell)
MV	Bundesland Mecklenburg-Vorpommern
NRW	Nordrhein-Westfalen
OSKA-LiegKat NRW	Objektschlüsselkatalog Liegenschaftskataster NRW
OSM	OpenStreetMap
POI	Point of Interest
SN	Bundesland Sachsen
StaBA	Statistisches Bundesamt
UTM	Universal Transverse Mercator Koordinatensystem
VG25	Verwaltungsgrenzen (1:25.000)
VGI	Volunteered Geographic Information
ZSHH	Zentrale Stelle Hauskoordinaten, Hausumringe und 3D-Gebäudemodelle
ZUS	Betriebsbereitschaft

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: RapidEye-Aufnahme von Krefeld aus dem Jahr 2009.....	13
Abbildung 2: Beispiele einer Visualisierung der Hausumringe.	14
Abbildung 3: Bearbeitungszeiträume bis zur Veröffentlichung der Georeferenzierten Adressdaten..	15
Abbildung 4: Beispiel Hauskoordinaten als Punkt Feature-Layer.	15
Abbildung 5: Beispiel Baublöcke des ATKIS Basis-DLM.....	17
Abbildung 6: OpenStreetMap: Beispiel Innenstadtbereich von Krefeld.....	18
Abbildung 7: Übersichtskarte der Stadt Krefeld.....	20
Abbildung 8: Gebiet mit Veränderung.	21
Abbildung 9: Gebiet mit geringer Veränderung.....	21
Abbildung 10: Workflow der Referenzdatenaufbereitung.	23
Abbildung 11: Schematische Darstellung der einzelnen Bearbeitungsschritte	26
Abbildung 12: Unterschiedliche radiometrische Eigenschaften zwischen den Aufnahmen für die Aufnahme 2009 und 2012.....	27
Abbildung 13: Histogramme der Change Vektoren der berechneten Texturmaße für den ersten Bildkanal zwischen 2009 und 2012.	29
Abbildung 14: Darstellung des Rückstreuverhaltens von landwirtschaftlich genutzten Flächen und ihre Änderung im Zeitraum 2009 und 2012 mit Überlagerung der Objektart <i>Siedlung</i> des DLM und Darstellung der veränderten Bildpunkte in den Change Vektoren der Hauptkomponenten.....	32
Abbildung 15: Darstellung der Veränderung im Umfeld der Helios Klinik in Krefeld und die Darstellung in der RapidEye-Aufnahme im Jahr 2009, RapidEye 2012, die Change Vektoren und zwei höher aufgelöste Datensätze aus der Zeit vor dem Umbau 2009 und nach dem Umbau 2015.....	33
Abbildung 16: Darstellung der Veränderung im Umfeld der Helios Klinik in Krefeld und die Darstellung in der RapidEye-Aufnahme im Jahr 2009, RapidEye 2012, die Change Vektoren der Hauptkomponenten und zwei höher aufgelöste Datensätze aus der Zeit vor dem Umbau 2009 und nach dem Umbau 2015.....	34
Abbildung 17: 3D-Gebäude differenziert nach Hausumringe mit und ohne Wohnung am Beispiel von Krefeld.....	35
Abbildung 18: Adressierte Hausumringe (Hauptgebäude) mit Wohnraumnutzung.	36
Abbildung 19: Histogramm der adressierten Hausumringe mit Wohnraum und Hausumringe ohne Wohnraum bezogen auf die Gebäudegrundrissfläche.	37
Abbildung 20: Histogramm im 2er-Logarithmus der adressierten Hausumringe mit Wohnraum und Hausumringe ohne Wohnraum bezogen auf die Gebäudegrundrissfläche.....	38
Abbildung 21: Histogramm der adressierten Hausumringe mit Wohnraum bezogen auf die Gebäudegrundrissfläche.	39
Abbildung 22: Histogramm der adressierten freistehenden Hausumringe mit Wohnraum bezogen auf die Gebäudegrundrissfläche.	40

Abbildung 23: Histogramm der adressierten freistehenden Hausumringe mit Wohnraum bezogen auf die Gebäudegrundrissfläche.	40
Abbildung 24: Hausumringe nach Anwendung des Schwellwertes: Hausumringe schwarz umrandet und rot markiert die irrelevanten Hausumringe sowie grün die adressierten Hausumringe (Hauptgebäude) mit Wohnraum mit einer Gebäudegrundrissfläche größer 25m ²	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Daten	21
Tabelle 2 Gebäudenutzungsarten mit potenzieller Wohnfunktion	24
Tabelle 3: Hausumringe.....	35
Tabelle 4: Gebäudegrundflächen der Hausumringe für Gebäude mit und ohne Wohnnutzung.	36
Tabelle 5: Zentrale Ergebnistabelle.....	41
Tabelle 6: Gegenüberstellung der Anzahl der Hausumringe nach ATKIS-Funktion und der Klassifizierung nach Wohnnutzung laut ALK.	43
Tabelle 7: allgemeine Gegenüberstellung der Anzahl der Hausumringe nach ATKIS-Funktion und der Klassifizierung nach Wohnnutzung laut ALK.	43
Tabelle 8: Übersicht der Objekte im Datensatz des 3D Gebäudemodells aufgeschlüsselt nach adressierten Objekten und denen mit Wohnraum.....	44

Zusammenfassung

Dieser Bericht fasst die wesentlichen Erkenntnisse aus Phase I des Vorhabens GebäuDE-21 zusammen. Dabei wird zunächst der Hintergrund von Volkszählungen und Zensen in Deutschland beschrieben und auf Forschungsaktivitäten im internationalen Umfeld im Bereich der Geodaten- und Fernerkundungsdatennutzung für Zensen verwiesen, wodurch das aktuelle Vorhaben in den internationalen Kontext eingeordnet werden kann. Danach wird auf die konkreten Zielstellungen und die Struktur des Vorhabens eingegangen sowie die Rahmenbedingungen vorgestellt.

Die Zielstellung beinhaltet die exemplarische Bearbeitung einer Großstadt in Deutschland (Krefeld) anhand von Satellitenbilddaten aus zwei Beobachtungsjahren (2009 und 2012) um Bildanalyseverfahren anzuwenden, welche die Veränderung der Bebauungsstruktur in diesem Zeitraum darstellen. Die Veränderungsanalyse weist die Gebiete mit deutlichen strukturellen Änderungen in der Siedlungsstruktur aus. Größere Gebiete mit Änderung treten dabei deutlich hervor, kleinere Änderungen sind aufgrund der geometrischen Pixelauflösung (5 x 5 m) nicht eindeutig zu erkennen.

Der zweite Teil des Vorhabens beschäftigt sich mit der Klassifikation von amtlichen Hausumringdaten in die semantische Klasse *Wohngebäude* und *Nicht-Wohngebäude*. Für die Klassifikation werden dabei eine Reihe zusätzlicher amtlicher sowie nichtamtlicher Geobasisdaten verwendet. Auf Basis von numerischen Gebäudemerkmalen welche u.a. aus der Form der Gebäude berechnet werden, kann eine Einteilung der Hausumringe in diese beiden Klassen getroffen werden.

1 Hintergrund: Zensus

Seit dem Jahr 2011 ist für alle Mitgliedsstaaten der Europäischen Union die regelmäßige Durchführung Volks-, Gebäude- und Wohnungszählungen im Abstand von 10 Jahren vorgeschrieben. Diese europaweite Zählung wurde zum ersten Mal für den Stichtag 9. Mai 2011 und damit zum Europatag durchgeführt. Vor dieser europäischen Erhebung wurden in den einzelnen Mitgliedsstaaten nationale Volkszählungen durchgeführt; in Deutschland zuletzt 1981 in der DDR und 1987 in der BRD.

Diese Erhebungen waren Vollerhebungen, in welchen alle Einwohner mittels Fragebogen durch Interviewer befragt wurden. Dieses Verfahren wird in manchen Mitgliedsländern der Europäischen Union auch heute noch angewendet (z. B. Großbritannien, Irland, Griechenland, Portugal, Italien, Rumänien) während nach skandinavischem Vorbild in anderen Ländern mittlerweile registergestützte Verfahren verwendet werden. Daneben gibt es auch Länder mit Mischformen, welche sich beider Verfahren – der traditionellen Befragung und einer registergestützten Erhebung – bedienen (z. B. Spanien, Polen, Niederlande). Dieses Mischverfahren wurde in Deutschland erstmalig beim Zensus 2011 angewendet und ist auch für den zweiten europäischen Zensus 2021 vorgesehen.

1.1 Registergestützter Zensus in Deutschland

Der registergestützte Zensus in Deutschland stützt sich vornehmlich auf Daten aus Verwaltungsregistern, welche vor allem über die einzelnen Kommunen und Register der Bundesagentur für Arbeit erhoben werden. Aus den Melderegistern der Einwohnermeldeämter

werden zu jeder Person sowohl die Anschrift und personenbezogene Merkmale erhoben (z.B. Name, Geschlecht, Geburtsdatum, Familienstand, Staatsangehörigkeit).

Aus dem Erwerbsregister der Bundesagentur für Arbeit werden Informationen über die Erwerbstätigkeit der sozialversicherungspflichtig Beschäftigten Einwohner entnommen (z.B. Name, Anschrift oder Geburtsdatum und Angaben zum Wirtschaftszweig und Arbeitsort). Angaben zu nicht sozialversicherungspflichtig Beschäftigten von öffentlichen Arbeitgebern, wie Beamte oder Soldaten, werden direkt über die öffentlichen Arbeitgeber erhoben.

Diese registergestützten Verwaltungsdaten entsprechen Vollerhebungen, jedoch können über diese Register nicht sämtliche für den Zensus relevanten Daten erhoben werden. Es fehlen beispielsweise Angaben über Bildung oder konkretem Beruf eines Menschen und vor allem Angaben zu Selbstständigen. Vielmehr aber fehlen Angaben über die Wohnsituation und den Wohngebäudebestand. Darum müssen im Rahmen des Zensus zusätzliche Angaben aus ergänzenden Erhebungen über Stichproben zugeführt werden. Darunter fallen sowohl Befragungen in Wohnheimen und Gemeinschaftsunterkünften, die Haushaltsbefragung und vor allem die Gebäude- und Wohnungszählung. Die Haushaltsbefragung dient dabei der Erhebung von Informationen, welche durch keine Register abgedeckt werden. Sie wird zum Zwecke der Erhebung von realitätsnahen Einwohnerzahlen verwendet, da die Melderegister in größeren Gemeinden große Abweichungen zur tatsächlichen Einwohnerzahl aufweisen können. Für die gesamte Bundesrepublik Deutschland werden Angaben zu etwa 10 % der Bevölkerung im Rahmen dieser Haushaltsbefragung erhoben. Die zusätzlichen Merkmale beziehen sich z. B. auf Bildung, Erwerbstätigkeit und Migrationshintergrund. Die registergestützten Angaben und die stichprobenbasierten Haushaltsbefragungen werden miteinander kombiniert, um Karteileichen und Fehlbestände zu ermitteln.

Die Stichprobe für die Haushalte wird zufällig für die einzelnen Gemeinden generiert, auf Basis des Anschriftenverzeichnisses durchgeführt und danach alle Personen unter der ermittelten Anschrift befragt, welche zum Stichtag (Zensus 2011: 9. Mai) unter dieser Anschrift gewohnt haben. Die Anzahl der Bevölkerung unter den ermittelten Anschriften variiert dabei sehr stark in den einzelnen Bundesländern: zwischen 4,4 % in Hamburg und 13,7 % in Rheinland-Pfalz (Zensus 2011).

1.1.1 Gebäude- und Wohnungszählung

Für die Erhebung von Gebäude- und Wohnungsinformationen wurden deutschlandweit etwa 17,5 Millionen Haus- und Wohnungseigentümer befragt (Vollerhebung). In dieser Befragung wurden Angaben zur Art des Gebäudes, dem Baujahr sowie wohnungsspezifischen Merkmalen wie Größe, Anzahl der Räume und Bewohner erhoben. Damit werden Informationen über den Zustand bzw. Leerstand von Wohnungen in Deutschland und die Wohnraumversorgung der Bevölkerung gewonnen. Die Gebäude- und Wohnungszählung stellt gemeinsam mit den registerbezogenen Angaben die Datengrundlage für die Generierung von Haushalten dar, welche die Grundlagen für weitere Auswertungen sind. Erst aus der Kombination aller Daten können detaillierte Angaben über die Struktur von Haushalten und deren Wohnsituation gemacht werden, wie beispielsweise Angaben über durchschnittliche Wohnungsgrößen von Familien unterschiedlicher Größe.

1.1.2 Anschriften- und Gebäuderegister

Das Kernelement für die Zusammenführung der einzelnen Erhebungen bildet das Anschriften- und Gebäuderegister (AGR), in welchem alle Anschriften in Deutschland abgelegt sind. Es stellt gleichzeitig die Grundgesamtheit aller verfügbaren Adressen dar. Das AGR wird von den statistischen Ämtern aus Daten der Vermessungsämter, der Meldeämter und der Bundesagentur für Arbeit gebildet. Aus dem Gesamtbestand werden nur jene Anschriften herausgefiltert, welche Gebäude mit Wohnraum darstellen. Aus dem AGR werden sämtliche Eigentümer von Wohnraum über die Grundsteuer erhebenden Stellen ermittelt und somit die Grundlage für die Gebäude- und Wohnungszählung erstellt.

1.2 Fernerkundung und Geodaten als alternative Datenquelle für die Erstellung und Aktualisierung von Gebäuderegistern

Nationale Zensen sind in großen Volkswirtschaften mit großem Aufwand und auch entsprechenden Kosten verbunden. In Deutschland belaufen sich die geschätzten Kosten des Zensus 2011 auf über 700 Millionen Euro (Zensus 2011). In den Vereinigten Staaten von Amerika haben sich die Kosten für die zehnjährige Befragung der über 320 Millionen Einwohner seit den 1970er Jahren beinahe versiebenfacht und erreichten 2010 eine Höhe von etwa 12 Mrd. US\$ (Mervis, 2014). Nationale Zensusbehörden weltweit versuchen angesichts der hohen Zensenkosten auch immer wieder neuartige Erhebungsmethoden bzw. Informationsquellen zu erschließen. Konkret sollen die Zensuskosten für 2020 durch Forschungsaktivitäten um etwa 5 Mrd. US\$ reduziert werden (Thompson, 2014).

Die Spannweite der Innovationen ist dabei sehr breit: während in einigen Ländern Material und Kosten vor allem durch die Reduktion der verschickten Fragebögen angestrebt werden, gehen Vorstellungen in einigen, zumeist großen, Staaten der Erde noch weiter, wo vor allem alternative und neuartige Wege zur Erstellung und Pflege des Anschriftenregisters in den Vordergrund des Forschungsinteresses gerückt sind. Es stellt die Grundlage für die Aussendung und Erhebung der Fragebögen dar. Hier steht vor allem die Reduzierung der Adressen im Vordergrund, welche durch Zensusmitarbeiter nacherhoben oder geprüft werden müssen. Beispiele für die Integration von aktuellen Geo- und Fernerkundungsdaten sind etwa Polen, wo an einem geographischen Adresspunktregister gearbeitet wird, welches mit Unterstützung von Luftbildern kontinuierlich aktualisiert werden soll. Dabei wird vor allem auf den Einsatz von geschulten GIS-Bearbeitern gesetzt, welche die Daten auswerten (Dygaszewicz, 2014). Auch in Brasilien wird die Nutzung von geographischen Informationssystemen (GIS), globalen Positionierungssystemen (GPS), Satellitenbilddaten und Luftbildern in Erwägung gezogen, um durch die Aktualität von Fernerkundungsdaten aktuelle und kostengünstige Kartierungen bereitstellen zu können. Schwierigkeiten stellen aber noch die großen technischen Herausforderungen bei der Bildanalyse dar (da Silva Barbuda, 2014). Für die Bestimmung der Gebäudenutzung wird in Australien eine georeferenzierte Adressdatenbank unter Verwendung von Registerinformationen in Klassen „Wohnbebauung“, „gewerblich“ und „spezielle Nutzung“ klassifiziert. Die Wohnbebauung kann dabei mit hohen Genauigkeiten (97 %) klassifiziert werden (Crick, 2014).

Im sowohl flächenmäßig als auch die Einwohner betreffenden drittgrößten Staat der Erde, den Vereinigten Staaten von Amerika (USA), sind die Ideen für die Umsetzung von alternativen Daten, insbesondere Fernerkundungsdaten, noch weiter. Die *Aktualisierung bestehender Karten und*

Adressen stellt eine der vier identifizierten Kernelemente eines kosteneffizienten Zensus dar, wodurch man sich vor allem die weitgehende Reduzierung der Anzahl der Ortsbegehungen erhofft. Konkret wird für den nächsten US-amerikanischen Zensus auch nach wissenschaftlichen Bildanalyseverfahren geforscht, welche auf Basis von *Change-Detection-Verfahren* auf Veränderungen in Bildinhalten vor allem in Bezug auf den Gebäudebestand zur weitgehend automatisierten Aktualisierung von Gebäude- und Adressdatenbanken abheben sollen (Trainor, 2014).

Insgesamt können im internationalen Kontext Weiterentwicklungsmaßnahmen beobachtet werden, welche verstärkt den Einsatz von GIS und Fernerkundungsdaten sowie -technologien forcieren, um vor dem Hintergrund einer Kostenreduktion und Qualitätssicherung eine effizientere Gestaltung der nationalen Zensen zu erreichen.

Das aktuelle Vorhaben kann dementsprechend als innovativer Schritt bezeichnet werden, welcher in einen übergeordneten, internationalen Kontext eingeordnet werden kann. Es soll an dieser Stelle allerdings explizit erwähnt sein, dass es sich hierbei um die Durchführung einer Vorstudie handelt, welche zunächst auch vor allem aus einer wissenschaftlichen Sicht betrachtet wird.

2 Zielstellung

Die Verwendung von Fernerkundungsdaten und -technologien sowie die Verarbeitung von amtlichen Geobasisdaten für ihre Verwendung im Zusammenhang mit einem Zensus 2021 in Deutschland soll im Rahmen dieser Vorstudie untersucht werden. Übergeordnet sollen auf diese Weise technische Beiträge zur Unterstützung von Zensen geleistet werden, welche in weiterer Folge zu einer geodatenorientierten Erhebung von Bebauungsstrukturen und ihrer semantischen Einordnung in *Wohn- und Nichtwohngebäude* führen soll, um den Aufwand bei der Durchführung von registergestützten Zählungen in dieser Größenordnung zu reduzieren.

Es werden dabei zwei inhaltlich-technische Stränge verfolgt, welche einerseits das Ziel haben, Bildanalyseketten zu entwickeln und anzuwenden, um Veränderungen in der bebauten Siedlungslandschaft zu untersuchen. Dies geschieht über satellitengestützte Bildgebungsverfahren, welche den wesentlichen Vorteil bei der fernerkundlichen Datenakquise beinhalten, dass über wiederholte Aufnahmen die Dynamik der Erdoberfläche und darauf insbesondere der durch menschliche Siedlungsaktivität gestalteten Elemente wie Siedlungen betrachtet werden kann. Ziel dieses Teils des Vorhabens ist somit eine Darstellung von Veränderungen von Siedlungsstrukturen, vor allem von Neubau- und größeren Umbauaktivitäten.

Der zweite Teil der Untersuchung widmet sich der Plausibilisierung des Anschriftenregisters mittels einer Analyse von Geobasisdaten und dabei insbesondere der Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten einer Wohnnutzung und Identifikation irrelevanter Anschriften. Dieser Teil hat eine semantische Beschreibung von Bebauungsstrukturen auf Basis quantitativer Merkmale aus amtlichen Geobasisdaten, wie dem digitalen Datensatz der Hausumringe (HU-DE), zum Ziel. Es wird dadurch ermöglicht, auf Basis der GIS-basierten HU-DE-Daten, räumlich-morphologische Merkmale auf der Ebene individueller Gebäude zu berechnen, welche vor allem die Einteilung der Daten in die Kategorie „Wohngebäude“ und „Nicht-Wohngebäude“ zum Ziel hat. In weiterer Reihenfolge können diese Datensätze mit zusätzlichen semantischen und quantitativen Merkmalen angereichert werden,

welche einzelne Gebäudetypologien und Gebäudegrößenkategorien (z.B. Freistehendes Haus, Mehrfamilienhaus) ausweisen.

2.1 Struktur des Gesamtvorhabens

Initial wurde diese forschungsbasierte Vorstudie als Gesamtvorhaben konzipiert, in welchem die konsequente Abfolge einzelner Schritte zum übergeordneten Ziel führt. In der letztlich vereinbarten beantragten Version ist eine im Gesamtablauf zweigeteilte Struktur vorgesehen, welche einen ersten Projektteil in Phase I vorsieht und einen zweiten Projektteil in Phase II. Dargestellt werden in diesem Teil der Vorstudie die Tätigkeiten und Ergebnisse aus Phase I, welche formal ihren Abschluss im Jahr 2015 findet und eine Laufzeit von Oktober bis Dezember vorsieht.

Phase II wird im Rahmen einer eigenen Weiterentwicklungsmaßnahme zu Beginn des Jahres 2016 beantragt und wird neben der Weiterentwicklung der Verfahren auch auf die von Seiten des Statistischen Bundesamtes im Nachgang des offiziellen Kick-Off-Treffens beim Berliner BMI vom 29.10.2015 mit E-Mail vom 05.11.2015 von Herrn Dittrich formulierten Punkte explizit eingehen.

Gegenüber dem ursprünglichen Vorhabensszenario hat sich im Laufe der Projektlaufzeit auch die Veränderung ergeben, die Höhenmessungen aus stereoskopischen Satellitenbilddaten nicht in die Herstellung des LoD1-Gebäudemodells aufzunehmen, da die Höheninformationen bereits in den HU-DE für das untersuchte Testgebiet enthalten sind und mit einer bundesweiten Bereitstellung der LoD1 HU zu Beginn des Jahres 2016 zu rechnen ist. Stattdessen wurde ein größeres Testgebiet ausgewählt, welches den gesamten geographischen Umfang einer deutschen Großstadt beinhaltet. Der Mehraufwand von Datenakquise und Prozessierung wird durch das Entfallen der somit nicht mehr notwendigen Höhenberechnungen kompensiert. Zusätzlich wird in dieser ersten Projektphase auch ein umfassender Bericht erstellt, welcher die Tätigkeiten ausführlich dokumentiert.

2.2 Arbeitsziele und Vorgehensweise

Aus Inhaltlicher Sicht sieht dieser Teil der Studie vor allem die im Folgenden beschriebenen Elemente vor:

- **AP1 Bestimmung der Kriterien und Auswahl eines Testgebietes**

In diesem ersten Teil des Vorhabens werden geeignete Kriterien bestimmt, nach welchen ein Testgebiet für die praktische Durchführung und Demonstration der Verfahren ausgewählt wird.

- **AP2 Datenakquise und Datenaufbereitung**

Die für das Vorhaben erforderlichen Geobasis- und Satellitendaten werden bei den zuständigen Stellen besorgt und mit den notwendigen Vorverarbeitungsschritten für die eigentliche Datenverarbeitung vorbereitet. Darunter fällt die Akquise der relevanten Geobasisdaten wie HU-DE, DLM-DE und die Akquise von Satellitenbilddaten von zwei unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten. Für das Testgebiet werden Daten vom Jahr 2009 und vom Jahr 2012 akquiriert, um die Veränderungen in der Siedlungsstruktur in diesem Zeitraum zu dokumentieren. Das favorisierte zeitliche Szenario mit dem Zeitraum 2012-2015 konnte aus Gründen der noch nicht dem BKG zur Verfügung stehenden Satellitenbilddaten

für das Jahr 2015 nicht realisiert werden, weshalb auf das alternative Szenario 2009-2012 ausgewichen wurde.

- **AP3 Datenaufbereitung: Prozessierung der Satellitenbilder, Erzeugung des Gebäudemodells**
Hier werden vor allem die für die Veränderungsanalyse (*change detection*) auf Basis der Satellitenbilddaten notwendigen Verarbeitungsschritte dokumentiert, welche im Rahmen des Vorhabens verwendet und (weiter-)entwickelt wurden. Darüber hinaus fällt in diesen Teil auch die Herstellung bzw. Aufbereitung des Gebäudemodells, welches für die Klassifikation nach semantischen Kategorien, wie der Nutzung in Wohngebäude bzw. Nicht-Wohngebäude, benötigt wird.
- **AP4 Aktualisierung des Gebäudebestands über Verdachtsgebiete aus Fernerkundungsbildern**
Die Verdachtsgebiete, welche über die Bildanalyseverfahren identifiziert werden, zeigen räumlich die Gebiete welche im Zeitraum 2009-2012 aufgrund Siedlungstätigkeit eine Veränderung erfahren haben.
- **AP5 Identifizierung von Wohngebäuden und Nicht-Wohngebäuden im HU-Datensatz**
Auf Basis von rein quantitativen Merkmalen werden Wohngebäude von Nicht-Wohngebäuden unterschieden und kleine Nebengebäude, wie Schuppen und Anbauten, aufgrund ihrer Lage und Größe aus dem Datensatz eliminiert.

3 Übersicht über mögliche Datenquellen

Im Folgenden werden in einer Übersicht relevante raumbezogene Datenquellen beschrieben, die für einen Zensus nützliche Informationen enthalten. Augenmerk wird dabei zunächst auf relevante Fernerkundungsdaten gelegt. Anschließend erfolgt eine Darstellung amtlicher Geobasisdaten sowie nichtamtlicher Geodaten wie OpenStreetMap.

3.1 Fernerkundungsdaten

RapidEye ist ein kommerzielles Satellitenprogramm der Firma BlackBridge, das aus einer Konstellation mit insgesamt 5 Satelliten besteht. Diese sind mit optischen Sensoren ausgestattet, die in den fünf Wellenlängenbereichen des sichtbaren Lichts *blau* (440-510 nm), *grün* (520-590 nm), *rot* (630-685 nm), *red edge* (690-730 nm) und *nahem Infrarot* (760-850 nm) Daten aufnehmen. Mit etwa 6,5 m Bodenauflösung und 5 m Pixelauflösung können mit Hilfe dieser hochaufgelösten Sensoren mit einem Überflug 77 km breite Streifen auf der Erdoberfläche abgedeckt werden. Die Länge des in Flugrichtung aufgenommen Streifens variiert dabei zwischen 50 km und 300 km. Das gleiche Gebiet auf der Erdoberfläche kann im Nadir, also direkt von oben, etwa alle 5,5 Tage aufgenommen werden. Durch die Möglichkeit des Schwenkens des Sensors auf dem Satelliten, kann die Wiederholungsrate erhöht werden, wodurch tägliche Aufnahmen möglich sind (BlackBridge, 2015). Aufgrund der hohen Überflugsrate der Satellitenkonstellation stellt sie eine geeignete Datenbasis für die Identifikation von Veränderungen auf der Erdoberfläche dar, da die hohe temporale Abdeckung die Erfolgsquote

für störungsfreie (also wolkenfreie bzw. frei von atmosphärischen Einflüssen) Aufnahmen für den relevanten Zeitraum erhöht.

Für die Auswertung wurden RapidEye-Szenen der Jahre 2009 und 2012 untersucht. Die Daten für das Jahr 2009 wurden am 21.04.2009 aufgezeichnet. Das gesamte Testgebiet wird für das Referenzjahr von einer einzelnen Aufnahme abgedeckt. Für das Jahr 2012, welches zur Darstellung der Veränderung herangezogen wird, wurden die Daten vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) bereitgestellt. Das Testgebiet wird für das Veränderungsjahr von 4 Satellitenbildkacheln abgedeckt, welche an drei Tagen, nämlich am 25.05.2012, am 23.07.2012 und am 01.08.2012 aufgenommen wurden.

Einen Eindruck der Daten vermittelt Abbildung 1, bei der sowohl das ganze Gebiet für 2009 als auch Detailansichten eines kleineren Gebietes mit Veränderungen für beide Jahre dargestellt sind.



Abbildung 1: RapidEye-Aufnahme von Krefeld (administrative Grenze in rot) aus dem Jahr 2009 auf der linken Seite der Grafik. Detailansichten einer veränderten Fläche im Süden der Stadt (grüne Markierung) mit RapidEye-Aufnahmen von 2009 (A) und 2012 (B) befinden sich rechts.

3.2 Geobasisdaten

Aus dem breiten Angebot an Geobasisdaten des deutschen Vermessungswesens sind für die Lösung der Aufgabenstellung insbesondere die Hausumringe (HU-DE), die Gebäudeadressdaten (GA), die 3D-Gebäudedaten (LoD1) und das ATKIS Basis-DLM von Bedeutung. Darüber hinaus sind die Gebäudeattribute und die Flurstücksgrenzen aus dem Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) von Interesse. Für die deutschlandweite Nutzung von ALKIS hat der Bund derzeit allerdings keine Lizenz. Die Geobasisdaten und deren spezieller Informationswert soll im Folgenden kurz erläutert werden.

3.2.1 Amtliche Hausumringe (HU-DE)

Seit 2011 werden Geobasisdaten zu den Gebäudegrundrissen der Liegenschaftskarte für ganz Deutschland zentral bereitgestellt. Unter der Produktbezeichnung „Hausumringe Deutschland“ (HU-DE) werden mit diesen Daten jährlich die Grundrisspolygone der Gebäude des Amtlichen Liegenschaftskatasters veröffentlicht (Beispiel in Abbildung 2). Zusammen mit den Georeferenzierten Adressdaten (GA) sind sie der umfangreichste Geometriedatenbestand zu Gebäuden der Bundesrepublik. Sie weisen ein einheitliches Datenformat auf, sind flächendeckend für Deutschland verfügbar und es besteht für diese Daten eine gesetzliche Fortführungspflicht.

Die Hausumringe Deutschland (HU-DE) enthalten die flächenhaft modellierten Objekte aus ALKIS. Sie stellen lediglich die Gebäudegrundfläche ohne zusätzliche Elemente (z.B. Balkone) dar und enthalten den Amtlichen Gemeindegemeinschaftsschlüssel AGS. Die Hausumringe werden durch die Länder jährlich erhoben und aktualisiert. Die Qualität der Geometrien der Hausumringe wurde in Hartmann (2015a) untersucht. Grundsätzlich kann von einer Erfassung von mehr als 95 % ausgegangen werden, wobei die fehlenden Umringe meist mit aktueller Bautätigkeit in Verbindung gebracht werden können. In Sachsen und Mecklenburg-Vorpommern gibt es im ländlichen Raum größere Erfassungslücken, der Vergleich mit den Orthophotos zeigt allerdings eine sehr gute Positionsgenauigkeit der Hausumringe.



Abbildung 2: Beispiele einer Visualisierung der Hausumringe.

3.2.2 Georeferenzierte Adressdaten (GA) und amtliche Hauskoordinaten (HK-DE)

Seit 2003 werden die Gebäudeadressen des Liegenschaftskatasters als Hauskoordinaten überregional zur Verfügung gestellt. Die Ableitung der amtlichen Hauskoordinaten erfolgt für alle Hauptgebäude mit Hausnummern aus ALKIS, d. h. Nebengebäude mit Hausnummer sind in dem Datenbestand nicht enthalten. Die Gebäudezuordnung ist in ALKIS als Attribut abgelegt (Haupt- oder Nebengebäude), wobei Gebäude mit Lagebezeichnung und Hausnummer stets Hauptgebäude und Gebäude mit Lagebezeichnung mit Pseudonummer und laufender Nummer stets Nebengebäude sind. Gebäude, die eine Lagebezeichnung mit Pseudonummer ohne laufende Nummer haben, sind nur in gekennzeichneten Gebäudenutzungsfällen Hauptgebäude. Die Hauskoordinaten umfassen eine

Kennung des Datensatzes, eine eindeutige Nummer, Qualität der georeferenzierten Gebäudeadresse, Schlüssel für Land, Regierungsbezirk, Kreis/kreisfreie Stadt, Gemeinde, Orts- bzw. Gemeindeteile, Straße, Hausnummer, Adressierungszusatz, Koordinatenwerte, Straßename, Postleitzahl, postalischer Ortsname, Zusatz zum postalischen Ortsnamen und Postalischer Ortsteil. Die Georeferenzierten Gebäudeadressen (GA) werden vom BKG angeboten. Sie werden aus den Amtlichen Hauskoordinaten (HK-DE) der Zentralen Stelle Hauskoordinaten, Hausumringe und 3D Gebäudemodell (ZSHH) erstellt. Danach werden Gebietsstände vereinheitlicht und Adressen von Drittanbietern (nexiga GmbH, 2014 und Adressangaben der Deutschen Post Direkt GmbH) ergänzt. Diese Bearbeitungen nehmen ca. 4-5 Monate in Anspruch, zwischen dem Datenbankauszug aus ALKIS und der Veröffentlichung der GA vergeht also in der Regel etwa ein Jahr, was bei Verwendung der Daten zu berücksichtigen ist. Ein detaillierter Überblick über die zeitliche Abfolge der Bearbeitung der GA ist in Abbildung 3 dargestellt, eine Darstellung der HK-DE in Abbildung 4.

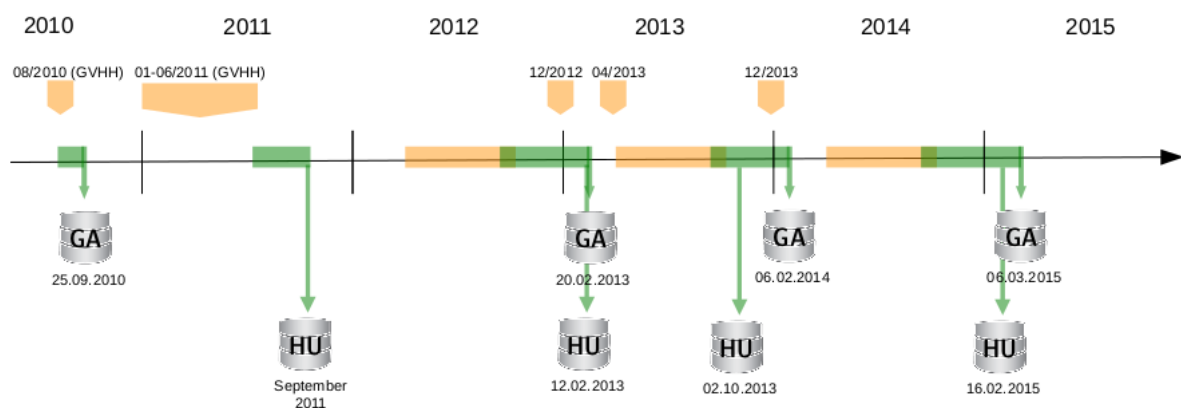


Abbildung 3: Bearbeitungszeiträume bis zur Veröffentlichung der Georeferenzierten Adressdaten. Über der Zeitachse ist der Zeitpunkt des Datenbankauszuges angegeben (Datendokumentation). An die Aufbereitung der HK bei der ZSHH (orange) schließt sich die Weiterbearbeitung durch das BKG (grün) bis zur Veröffentlichung an.



Abbildung 4: Beispiel Hauskoordinaten als Punkt Feature-Layer.

Die HK-DE der Bundesländer wurden ebenfalls in Hartmann (2015a) hinsichtlich ihrer Qualität untersucht. Aufgrund ihrer umfangreichen Attributierung kommt zur Geometrie die thematische Genauigkeit, insbesondere des Qualitätsattributes hinzu. Da die Hauskoordinaten schon für geplante Bauvorhaben in die Flurstücke gesetzt werden können, d. h. gegenüber den Hausumringen potentiell im Vorlauf sind, wird davon ausgegangen, dass es sich um einen sehr aktuellen und vollständigen Datensatz handelt. Ein Qualitätsattribut gibt Auskunft über Lage der Hauskoordinate zum Umring bzw. dem Vorhandensein eines Gebäudes:

- A – Koordinate im Umring, Gebäude vorhanden
- B – Koordinate im Flurstück, Gebäude und Umring nicht sicher vorhanden
- R – Koordinate im Flurstück, kein Gebäude vorhanden
- T – Koordinate von Drittanbieter (nur in den GA des BKG)

Der Anteil der Koordinaten der Qualitätsstufe „A“ kann herangezogen werden, um die Vollständigkeit der Hausumringe abzuschätzen. Dabei wurde berücksichtigt, dass es durch thematische Fehler Koordinaten geben kann, die als „A“-Koordinaten geführt werden, obwohl sie außerhalb des Umrings liegen oder ihnen gar kein Umring zugeordnet werden kann. Die Validierung zeigte, dass der Anteil dieser Koordinaten an allen „A“-Koordinaten in den meisten Bundesländern bei unter 0,5 % liegt (Saarland: 2 % und Bremen: 1 %), was aber durch Einführung eines Suchradius behoben werden kann.

3.2.3 3D-Gebäudemodell LoD1 Deutschland (LoD1-DE)

Der 3D-Gebäudedatensatz ist eine Erweiterung des Datensatzes Hausumringe um die dritte Dimension, der Gebäudehöhe. Der Gebäudegrundriss wird aus ALKIS entnommen. Ersatzweise können Grundrisse von Gebäuden und Bauwerken auch aus ATKIS herangezogen werden. Die Gebäudedarstellung erfolgt als „Klötzchen“, d. h. alle Gebäude werden mit einer Gebäudehöhe, einem Flachdach, dargestellt. Die Lagegenauigkeit entspricht der des zugrunde liegenden Gebäudegrundrisses. Die Höhengenaugigkeit beträgt größtenteils 5 m. Grobe Abweichungen sind in Einzelfällen bei komplexen Dachformen möglich. Jedes Geoobjekt enthält neben der Geometrie auch die Höhe des Gebäudes, die Gebäudefunktion, die Qualitätsangaben, den Amtlichen Gemeindeschlüssel und den Namen. Das LoD1-DE wird derzeit für den Bund lizenziert und wird voraussichtlich ab 2016 im CityGML-Format bereit gestellt.

3.2.4 ATKIS Basis-DLM

Das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem beschreibt die Geotopographie Deutschlands. Für das aktuelle Vorhaben ist insbesondere das Basis-DLM von Bedeutung. Das Basis-DLM enthält unter anderem den Objektartenbereich Tatsächliche Nutzung (Gewässer, Siedlung, Vegetation und Verkehr) (vgl. Abbildung 4). Insbesondere sind die bebauten Flächen der Objektartengruppe *Siedlung* von Interesse. Die Objektarten *Wohnbaufläche*, *Industrie- und Gewerbefläche*, *Bergbaubetrieb*, *Fläche gemischter Nutzung*, *Fläche besonderer funktionaler Prägung*, *Sport-, Freizeit- und Erholungsfläche* und *Friedhof* sind ein Hinweis auf die Nutzungsart der Gebäude innerhalb der so jeweils beschriebenen Flächen hinsichtlich ihrer Hauptnutzung. Allerdings werden die Objektarten bei Mischnutzungen nach Dominanzprinzip vergeben, sodass daraus eine Gebäudenutzung nicht in jedem Fall mit hoher Sicherheit abgeleitet werden kann.



Abbildung 5: Beispiel Baublöcke des ATKIS Basis-DLM.

3.2.5 Gebäudedaten aus ALKIS

Im ALKIS sind alle Haupt- und Nebengebäude im Grundriss modelliert. Für die semantische Gebäudeklassifikation im Projekt ist es die wichtigste Datenquelle, da der Datenbestand die umfangreichste Informationsquelle amtlicher Geobasisdaten zum Gebäudebestand darstellt. Besondere Bedeutung kommt der Gebäudefunktion zu, welche ebenfalls nach dem Dominanzprinzip vergeben wird. ALKIS unterscheidet ca. 300 Gebäudefunktionen, wovon allerdings nur die Obergruppen Wohngebäude (1000), Gebäude für Wirtschaft und Gewerbe (2000) und Gebäude für öffentliche Zwecke (3000) zum Grunddatenbestand gehören und damit verpflichtend zu erheben sind.

Alle anderen Nutzungsarten sowie die Vergabe weiterer Attribute wie etwa Gebäudehöhe (HHO), Geschossfläche (GFL), Baujahr (BJA), Dachform (DAF), Betriebsbereitschaft (ZUS), Anzahl oberirdischer Geschosse (AOG) oder auch Bauweise (BAW) sind optionale Angaben der Länder (AdV, 2015a). Mit dem Attribut *Bauweise* ist beispielsweise auch eine Unterscheidung in freistehende Einzelgebäude, freistehender Gebäudeblock (Mehrfamilienhaus in der Regel 3- bis 8-geschossig), Einzelgarage, Doppelgarage, Sammelgarage, Doppelhaushälfte, Reihenhause, Haus in Reihe, Gruppenhaus, Gebäudeblock in geschlossener Bauweise, möglich. **Allerdings ist das Attribut Bauweise kein Grunddatenbestand und nicht pflichtmäßig zu führen!**

Zusätzlich besteht optional das Attribut *Zustand*, wobei hier in behelfsmäßiger Zustand, ungenutzter Zustand, außer Betrieb/stillgelegt/ verlassen, verfallen/zerstört, teilweise zerstört, geplant und beantragt und im Bau unterschieden wird. Gebäudegeschoss- und Gebäudegrundfläche werden aufgrund der fehlenden verpflichtenden Führung nur selten gegeben.

3.2.6 Flurstücke aus ALKIS

In ALKIS werden auch die geometrischen Grenzen aller Flurstücke beschrieben. Anhand dieser Information können Gebäudemodellierungsfehler bereinigt werden und Angaben zur Lage eine

wichtige Grundlage zur räumlichen Zuordnung von Nebengebäuden zu Anschriften, wenn diese keine eigene georeferenzierte Adresse besitzen, genutzt werden. Flurstücke als Teildatenprodukt des Liegenschaftskatasters werden aktuell noch nicht als flächendeckendes Geodatenprodukt für Deutschland angeboten

3.3 Nutzergenerierte Geodaten

Nutzergenerierte Geodaten, auch als *Volunteered Geographic Information* (VGI) bezeichnet (Goodchild, 2007), werden in vielen Bereichen bereits als alternative oder zusätzliche Datenquelle zur Beschreibung und Visualisierung der Topographie verwendet, da deren Nutzung auch für kommerzielle Zwecke kostenfrei ist. Die populärste VGI-Plattform ist OpenStreetMap (OSM), die ein breites Spektrum an Daten und Kartenanwendungen zu verschiedenen Themen anbietet. Dabei werden unter anderem auch Gebäude in ihrem Grundriss erfasst (vgl. Abbildung 6). In Form von OSM-Tags kann zusätzlich die Semantik der Gebäude beschrieben werden, wobei diese sowohl am modellierten Grundriss als auch an einem Point of Interest (POI) erfassbar ist.

Empirische Untersuchungen zur Datenqualität haben gezeigt, dass die Vollständigkeit für flächendeckende Anwendungen noch teilweise gering ist. Im Jahr 2012 betrug die Vollständigkeit in Nordrhein-Westfalen nur 25,5 %, in Sachsen etwa 15,3 % (Kunze, 2012; Hecht et al. 2013). Auffällig ist jedoch, dass die Vollständigkeit in urbanen Gebieten deutlich höher als in ländlichen Räumen ist und kontinuierlich steigt. Die OSM-Gebäudedaten können vor allem in dichter besiedelten Gebieten von großem Nutzen sein, wie etwa die Gebäudenutzung (Kunze und Hecht 2015). OSM-Daten werden in Zukunft vor allem wegen der kostenfreien Nutzung ein adäquates Konkurrenzprodukt gegenüber amtlichen Geobasisdaten darstellen.

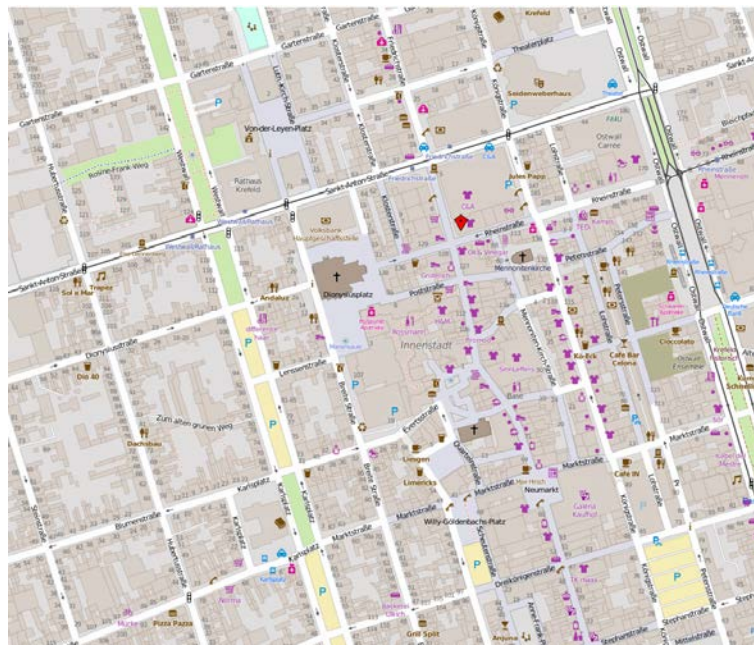


Abbildung 6: OpenStreetMap: Beispiel Innenstadtbereich von Krefeld.

4 Projektrealisierung

4.1 Auswahl und Beschreibung des Testgebietes

Dieser Arbeitsschritt beinhaltet die Festlegung der Kriterien, Sichtung des jeweils lokalen Datenbestandes und Abstimmung sowie die Auswahl des Testgebietes. Dabei wurden bereits bestehende Daten im Vorfeld erfasst und auf ihre Eignung untersucht. Die Auswahl des Testgebietes geschah unter Berücksichtigung von Vorarbeiten und vorhandener Daten im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und am Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR). In Anbetracht der kurzen Bearbeitungszeit konnte keine repräsentative räumliche Stichprobe für Deutschland angestrebt werden. Vielmehr soll jedoch eine generelle technische Übertragbarkeit der Methodik auf andere Gebiete Deutschlands demonstriert werden. Anhand des Testgebietes werden die Tätigkeiten und Verfahren dieser Phase getestet um zu prüfen, in welcher Form die Identifikation der Siedlungsveränderung und von Wohngebäuden auf Basis von Erdbeobachtungsdaten und Geobasisdaten möglich ist. Dabei müssen die auf der Basis des Testgebietes ausgewählten bzw. (weiter-)entwickelten Verfahren auf andere geographische Gebiete in Deutschland übertragbar sein. Das Testgebiet sollte somit idealerweise die folgenden Kriterien erfüllen:

- Es sollte ein der Fläche nach größeres Testgebiet sein, welches eine deutsche Großstadt inklusive historisch gewachsenen und somit stark verdichteten Kernbereich und peripheren, suburbanen bis ländlich geprägten Gebieten abdeckt. Dadurch sollen unterschiedliche städtische Strukturen im gesamten Stadtgebiet betrachtet werden, wodurch eine Übertragbarkeit auf andere geographische Gebiete in Deutschland gewährleistet werden soll, welche ähnliche siedlungsstrukturelle Charakteristiken aufweisen.
- Die Siedlungsgebiete sollen in dem untersuchten Zeitraum bauliche Veränderungen aufweisen.
- Für die untersuchten Zeiträume müssen hochaufgelöste, wolken- und schneefreie Satellitenbilder zur Verfügung stehen und gleichzeitig potentiell für eine deutschlandweite Analyse akquiriert werden können. Für die Simulation des Szenarios sollen dabei 2 Zeitstände analysiert werden.

Konkret wurde für das Vorhaben als Testgebiet die Stadt **Krefeld** in Nordrhein-Westfalen ausgewählt. Sie liegt am Rande des Ruhrgebiets, etwa 20 km nordwestlich der Landeshauptstadt Düsseldorf und etwa 30 km südwestlich der Ruhrgebietsstadt Duisburg (vgl. Abbildung 7), weist eine Fläche von 138 km² auf und beinhaltet ca. 100.000 Gebäude. Der Rhein bildet die östliche Grenze der Stadt und liegt in etwa 7 Kilometern Entfernung zum Stadtkern. Basierend auf dem kommunalen Melderegister wurde für den 31.12.2014 die Einwohnerzahl Krefelds mit 234.213 beziffert (Krefeld, 2015). Das Testgebiet umfasst sowohl den Kernbereich der Stadt als auch das dünner besiedelte Umland (vgl. Abbildung 1).

Die Stadt zeigt die ganze Bandbreite des deutschen Gebäudebestands von geschlossener städtischer Blockbebauung, über traditionelle Zeilenbebauung bis zur lockeren Ein- und Zweifamilienbebauung. Auch die Breite des Nichtwohngebäudebestands von Industrie- und Gewerbebebauung ist enthalten. Ausschlaggebend für die Wahl des Gebiets war zum einen, dass alle oben als relevant eingestuften Kriterien erfüllt sind und zum anderen, dass dem IÖR für das Gebiet die HU-DE aus dem Jahr 2012

und aus dem Referenzjahr 2009 vorliegen. Der Zeitraum 2009-2012 wurde gewählt, da für diesen Zeitstand alle für die Untersuchung relevanten Fernerkundungs- und Geobasisdaten zur Verfügung stehen. Für das gewählte Testgebiet Krefeld konnten die Hausumringe Deutschland (HU-DE), die Georeferenzierten Adressdaten (HK-DE), das ATKIS Basis-DLM und die RapidEye-Szenen akquiriert werden.

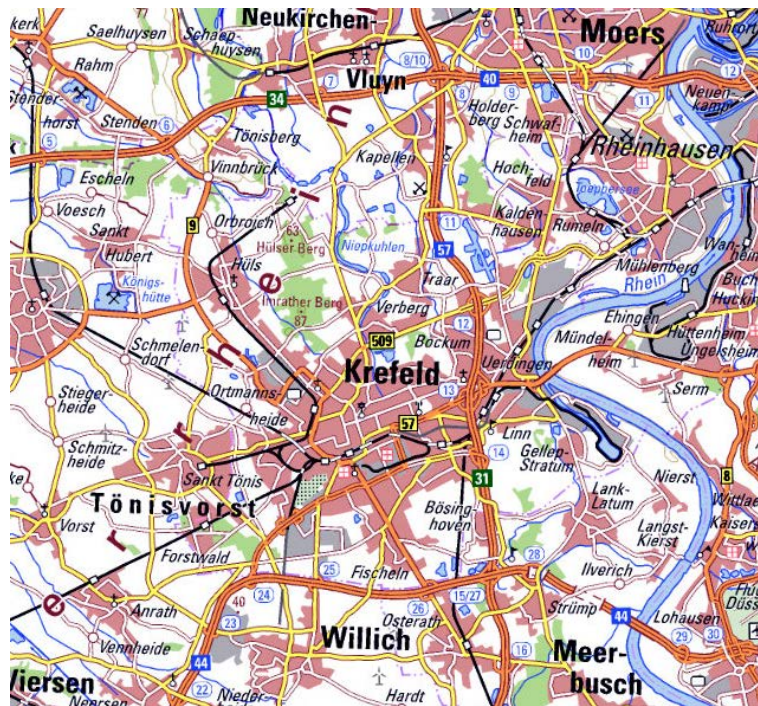


Abbildung 7: Übersichtskarte der Stadt Krefeld (© GeoBasis-DE /BKG 2015).

4.2 Erstellung von Referenzdatensätzen

In diesem Arbeitsschritt erfolgt die Erstellung von Referenzdatensätzen (Gebäude-21-Referenzdatensatz) für die im Projekt vorgesehenen Untersuchungen.

4.2.1 Referenz für die satellitenbildbasierte Veränderungsanalyse

Zur Erstellung eines Testdatensatzes haben zwei Fernerkundungsspezialisten anhand eines visuell-kognitiven Verfahrens zur Überprüfung der Veränderung in der Siedlungsstruktur in Krefeld die Geometrien des DLM in drei Klassen eingeteilt. Bereiche ohne signifikante Abweichung vom Grundrauschen in der Hauptkomponentenanalyse wurden hierbei mit dem Wert „0“ als „unverändert“ klassifiziert. Gebiete, die eine deutliche Abweichung beinhalten, wurden nach anschließendem kognitiven Vergleich der Satellitenbilder mit dem Wert „1“ für „verändert“ oder bei Unsicherheit bzw. geringen Veränderungen mit dem Wert „2“ für „wahrscheinlich verändert“ versehen. Einheiten, die zwar in der Hauptkomponentenanalyse auffällig waren, jedoch im Vergleich der Satellitenaufnahmen keine klare Veränderung aufwiesen, wurden ebenfalls als „0“ eingeordnet. Beispiele für die Zuordnung zu den einzelnen Klassen sind untenstehend in Abbildung 8 und Abbildung 11 dargestellt.

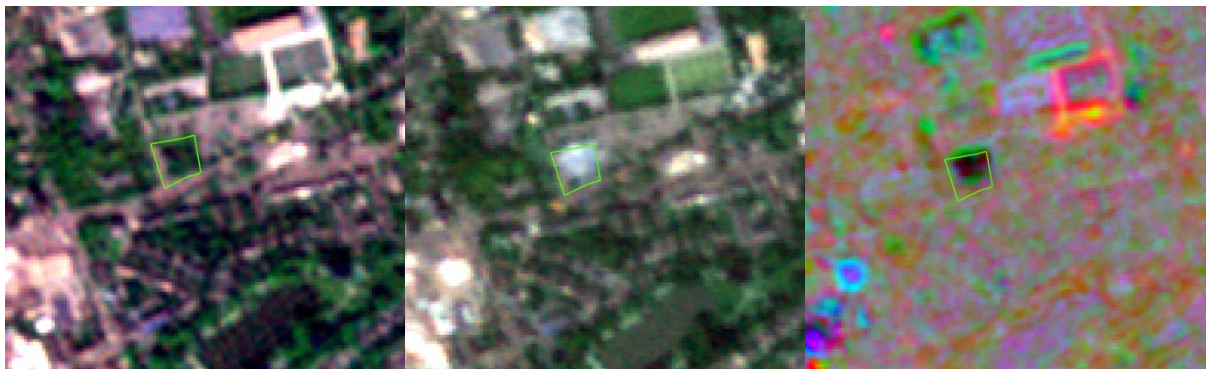


Abbildung 8: Gebiet mit Veränderung (grün umrandet). Der dunkle, signifikante Farbkontrast in der Hauptkomponentenanalyse (rechts) korreliert mit der eindeutigen Änderung der Bebauung, die im Vergleich von dem Satellitenbild aus dem Jahr 2009 (links) mit der Aufnahme von 2012 (Mitte) zu sehen ist.

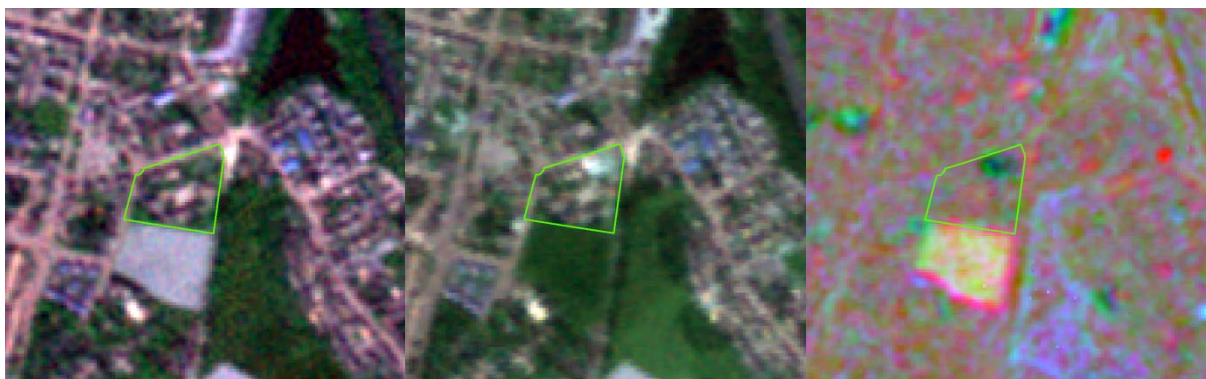


Abbildung 9: Gebiet mit geringer Veränderung (grün umrandet).

4.2.2 Gebäudereferenzdatensatz

Für das Testgebiet werden die Hausumringe mit zusätzlichen Informationen zur Gebäudefunktion und der Höhe angereichert. Auf eine im Projekt geplante Erfassung der Gebäudehöhen über fernerkundungsbasierte Methoden mittels stereoskopischen Satellitenbilddaten (vgl. Wurm et al. 2014) konnte verzichtet werden, da diese Gebäudehöhen und weitere Attribute zur Gebäudefunktion aus einem gegebenen 3D-Gebäudereferenzmodell von 2009 übernommen werden konnten. Tabelle 1 fasst die verwendeten Datenquellen zur Aufbereitung des GebäUDE-21-Referenzdatensatzes zusammen.

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Daten

Daten	Quelle / Einrichtung	Datum	Original- projektion	Anzahl der Gebäude
HU-DE 2012 Krefeld	BKG	Vertrieb durch BKG ab 07.11.2012	Gauß-Krüger	120.373
Georeferenzierte Adressdaten, ehemals (GAB) von 2012	BKG	Dez. 2012	Gauß-Krüger	49.638
LoD1	abgeleitet aus den 3D-Gebäudestrukturen (2009), Geobasis NRW	2009	ETRS89/UTM	115.218
Gebäudetypen	IÖR-Erhebung von 2009	2009	ETRS89/UTM	
RapidEye 2009	RapdiEye / Blackbridge	21.04.2009 (1 Kachel)	ETRS89/UTM	
RapidEye 2012	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG)	25.05.2012, 23.07.2012, 01.08.2012 (4 Kacheln)	ETRS89/UTM	

Bei der Erstellung des GebäUDE-21-Referenzdatensatzes wurden verschiedene Datensätze verwendet und dem Datensatz der Hausumringe 2012 angefügt. Bei den verschnittenen Daten handelt es sich um HU-DE 2012, die GA 2012, das vom IÖR um spezielle Attribute ergänzte LoD1 und zudem um einen Gebäudetypendatensatz. Zunächst wurden alle Datenbestände auf die administrativen Verwaltungsgrenzen des Stadtgebiets Krefeld zugeschnitten.

Um eine spätere Gebäudeklassifikation nach Wohn- und Nichtwohngebäuden im GebäUDE-21-Referenzdatensatz durchführen zu können, wurden die die Hausumringe entsprechend der Methodik von Meinel und Burckhardt (2013) sowie Hartmann (2015a,b) durch Verschneidung mit dem ATKIS Basis-DLM und der GA um zusätzliche Attribute angereichert, wie z. B. die Anzahl der Adressen in einem Polygon. Zunächst wurden die Attribute wie der Straßenname, die Hausnummer und die Qualität des Koordinatenpunktes der Georeferenzierten Adressdaten an den Datensatz HU 2012 angefügt. Gebäude, welche mehrere Adresskoordinaten innerhalb des Polygons aufwiesen, bekamen einen logisch hergeleiteten Attributwert zugewiesen. Durch das Attribut der Anzahl der Adressen in einem Polygon kann die entsprechende Koordinatenanzahl nachvollzogen werden.

Im weiteren Verlauf wurden ausgewählte Attribute des 3D-Gebäude-Referenzmodells Krefeld (2009) an den Datensatz der Hausumringe angefügt. Der Datensatz besitzt im Gegensatz zum Originaldatensatz der 3D-Gebäudestrukturen zusätzliche durch das IÖR angereicherte Attribute. Für die Übernahme relevant sind die Attribute Gebäudehöhe, absolute Gebäudehöhe, Nutzung, Katalognummer der Nutzung und der Gebäudetyp. Wegen des unterschiedlichen Zeitstandes (2012 vs. 2009) unterscheiden sich die beiden Datensätze, sodass es bei der Informationsübernahme zu Lücken oder Mehrfachausprägungen am jeweiligen Zielpolygon kommen konnte, die manuell bereinigt werden mussten. In einigen Fällen ist die Geometrie des HU-Polygons kleiner als die des 3D-Datensatz-Polygons. Da sich der Centroid somit außerhalb des Zielpolygons befindet, kann über die bisher verwendete Methodik in diesen Fällen zunächst keine Information übernommen werden (keine Daten innerhalb des HU-Polygons). Da sich dies mit „echten“ nicht vorhandenen Polygonen im 3D-Datensatz überschneidet (ca. 5,5 % des HU-2012-Datensatzes) wurden diese Informationen ebenfalls übernommen. Die Polygone mit falschen Fehlwert-Ausprägungen wurden daher selektiert und die gültigen Informationen ebenfalls an die HU-Polygone angeheftet.

Aus dem Datensatz zu den Gebäudetypen (2009) konnte der Gebäudetyp entsprechend der Typologie von Hecht (2014) übernommen werden. Als Resultat des Vorgangs ging der Datensatz für das Projekt GebäUDE-21 hervor, welcher im weiteren Projektverlauf um die Attribute der Klassifikation nach Wohn- oder Nichtwohnnutzung und die Klassifizierung nach gereihtem Gebäude oder freistehendem Einzelhaus ergänzt wurde. Eine graphische Übersicht über die einzelnen Schritte zur Erstellung des GebäUDE-21 Referenzdatensatzes ist in untenstehender Abbildung 10 dargestellt.

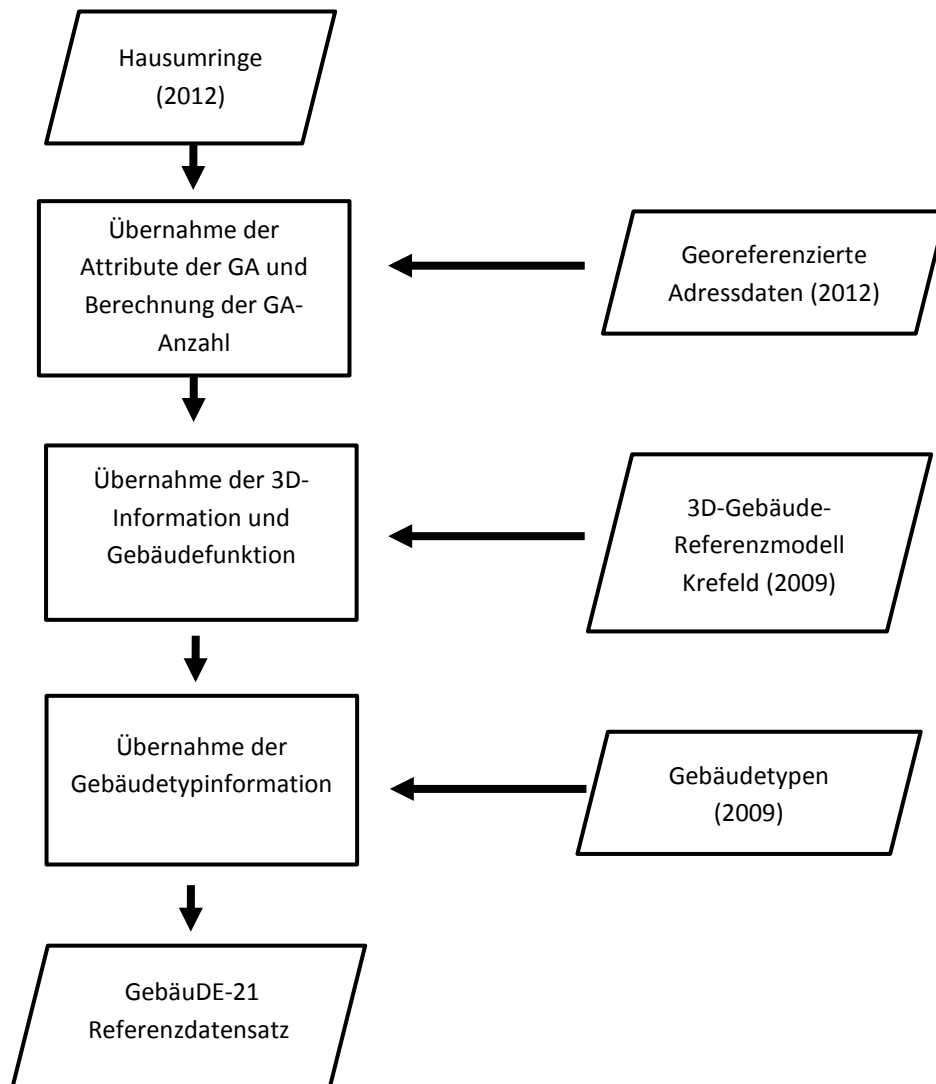


Abbildung 10: Workflow der Referenzdatenaufbereitung.

4.2.3 Differenzierung nach der Wohnnutzung

Für eine Differenzierung der Gebäude hinsichtlich der Nutzung wurde die Gebäudetypinformation des Referenzdatensatzes semantisch analysiert und die einzelnen Nutzungsarten identifiziert, die potenziell Wohnraum besitzen. Auf Basis der Nutzungstypen erfolgte eine Klassifikation nach Wohn- und Nichtwohnnutzung, welche in Tabelle 2 dargestellt sind.

Die Nutzungsinformation hat ihren Ursprung im Liegenschaftskataster und wurde entsprechend des Objektschlüsselkatalogs Liegenschaftskataster NRW interpretiert. In dem GebäuDE-21-Referenzdatensatz erhielten alle Gebäude mit einer Wohnnutzung in einem gesonderten Attribut eine binäre Kodierung über den Attributwert (1: Gebäude mit Wohnraum, 0: Gebäude ohne Wohnraum).

Tabelle 2 Gebäudenutzungsarten mit potenzieller Wohnfunktion

Objektschlüssel (OS Nutzung)	Bezeichnung	Objektanzahl
1373	Arbeitnehmerwohnheim, Schwesternwohnheim	5
1321	Doppelhaus	12438
1311	Einzelhaus	11735
2736	Forsthaus	1
1221	Freistehender Wohnblock	2461
1144	Gemeindehaus, Küsterei	36
2101	Gemischt genutztes Gebäude mit Wohnungen	16
1341	Gruppenhaus	173
1361	Hochhaus	83
1371	Kinderheim	20
2731	Landwirtschaftliches Wohn- und Betriebsgebäude	23
2711	Landwirtschaftliches Wohngebäude	1
2141	Öffentliches Gebäude mit Wohnungen	51
1331	Reihenhaus	11987
1372	Seniorenwohnhaus, Seniorenheim	87
1374	Studentenwohnheim, Schülerwohnheim	3
1231	Wohnblock in geschlossener Bauweise	8109
2131	Wohngebäude mit Gewerbe und Industrie	937
2121	Wohngebäude mit Handel und Dienstleistungen	5574
1301	Wohnhaus (allgemein)	448
1211	Wohnhaus in Reihe	3654
1378	Wohnheim (allgemein)	16

4.3 Berechnung von Gebäudemerkmalen

Für weitere Untersuchungen zur automatischen Klassifizierung nach Wohngebäudetypen als Basis für eine Abschätzung von Geschoss- und Wohnflächen werden objektbeschreibende Eigenschaften zu jedem Gebäude in Form numerischer Merkmale benötigt. Grundlage für die Merkmalsberechnung sind die Hausumringe, die Hauskoordinaten sowie die Geometrie und Nutzungsinformation der Siedlungsflächen aus dem ATKIS Basis-DLM.

Die Beschreibung erfolgt über geometrische, topologische, statistische und semantische Merkmale, die mit Methoden der digitalen Bildverarbeitung und der räumlichen Analyse berechnet werden. Unter den geometrischen (auch morphologischen) Merkmalen zählen vor allem Größen- und Formmerkmale. Größenmerkmale sind messbare, metrische Größen wie der Flächeninhalt, Radien oder Distanzen. Formmerkmale beschreiben hingegen die Form eines Objektes in Bezug zu einer idealen Gestalt und werden in der Regel durch eine Verhältniszahl ausgedrückt. Topologische Merkmale sind von der Größe, Form und Orientierung unabhängige Eigenschaften der Objekte, mit denen die topologische Struktur einer Geometrie, wie zum Beispiel die Anzahl von Knoten, Segmenten, Nachbarn und Löchern im Polygon oder eine topologische Beziehung zwischen Objekten beschrieben werden. Ein wichtiges topologisches Merkmal ist beispielsweise die Anzahl der Löcher einer Gebäuderegion. Statistische Merkmale sind kontinuierliche Größen und beziehen sich auf einen vorab definierten Bereich oder eine Objektgruppe, wie z. B. eine Gebäudegruppe, die sich in einem Baublock oder einer definierten Suchumgebung befindet. Mithilfe der räumlichen Analyse und der deskriptiven Statistik können Kenngrößen wie Mittelwert, Standardabweichung, Minimum, Maximum und Varianz eines Merkmales ausgewertet werden. Als Beispiel sei hier der mittlere Flächeninhalt oder die mittlere Distanz aller Gebäude in einem definierten Bereich (Puffer um Gebäude) genannt. Semantische Merkmale sind qualitative, meist explizit in den Daten modellierte

oder übernommene Attributinformationen, wie etwa die übernommene Flächennutzungsinformation aus dem ATKIS Basis-DLM.

Die Routinen für die Merkmalsberechnung wurden am IÖR erarbeitet und in Hecht (2014) näher erörtert. Dabei kommen Methoden der Bildverarbeitung und der räumlichen Analyse zum Einsatz. Insgesamt werden 86 Merkmale abgeleitet und in einer Datenbank gespeichert. Die Merkmale können Bezug zu verschiedenen Ebenen nehmen. Die Mikroebene ist die Ebene einzelner Gebäude bzw. Gebäuderegionen. Auf Mesoebene wird der räumliche Kontext eines Gebäudes mit Merkmalen beschrieben, die Bezug auf eine Umgebung, wie z. B. einem 100 m Suchbereich oder dem Baublock, in dem sich das Gebäude befindet, haben. Die Makroebene dient der Bereitstellung von Kontextinformationen auf höchster Ebene und spielt bei der Anwendung auf große Untersuchungsgebiete, die sich über mehrere Ortschaften und Städte erstrecken, eine wichtige Rolle, um beispielsweise die Urbanität über die geometrischen Merkmale (Größe, Kompaktheit des Siedlungskörpers) zu beschreiben.

4.4 Veränderungsanalyse von urbanen Strukturen auf Basis von Erdbeobachtungsdaten – „Change detection“

Für vor allem gering- (z. B. MODIS, AVHRR) und mittelaufgelöste Datensätze (z. B. Landsat, SPOT) der ersten Generation mit einer räumlichen Auflösung von etwa 1 km bis 30 m gibt es eine Reihe pixelbasierter Ansätze der Veränderungsanalyse (engl: *change detection*). Dabei werden die Veränderungen jedes einzelnen Bildpunktes zwischen verschiedenen Zeitpunkten aufgrund deren Unterschiede in der Intensität der Reflektanzen gemessen. Stärkere Veränderungen lassen sich daher durch größere Abweichungen der Bildpunktintensitäten – dies entspricht der Helligkeit der Grauwerte in den Bilddaten – erkennen. In geometrisch hoch aufgelösten Bilddaten, welche Maschenweiten zwischen den einzelnen Bildpunkten (= geometrische Auflösung) kleiner als 10 m aufweisen, spielen geometrische Eigenschaften wie die Lage der Bildpunkte eine höher geordnete Rolle, da durch kleinräumige Lageunterschiede der Bildpunkte auch vermeintliche Änderungen zwischen den Aufnahmen detektiert werden können. Geometrische Eigenschaften in Änderungsanalysen hoch aufgelöster Bilddaten spielen vor allem in unregelmäßigen und komplexen Landschaftsstrukturen wie urban geprägten Gebieten eine erhebliche Rolle, da die Auswertestrategie entsprechend der Bildeigenschaften und Informationsgehalte angepasst werden muss.

Für die Detektion von Veränderungen in hoch aufgelösten Bilddaten ist daher eine Kaskade an speziellen (Vor-)Verarbeitungsschritten notwendig, welche im Folgenden beschrieben werden. Eine Übersicht über die einzelnen Schritte ist in Abbildung 11 dargestellt.

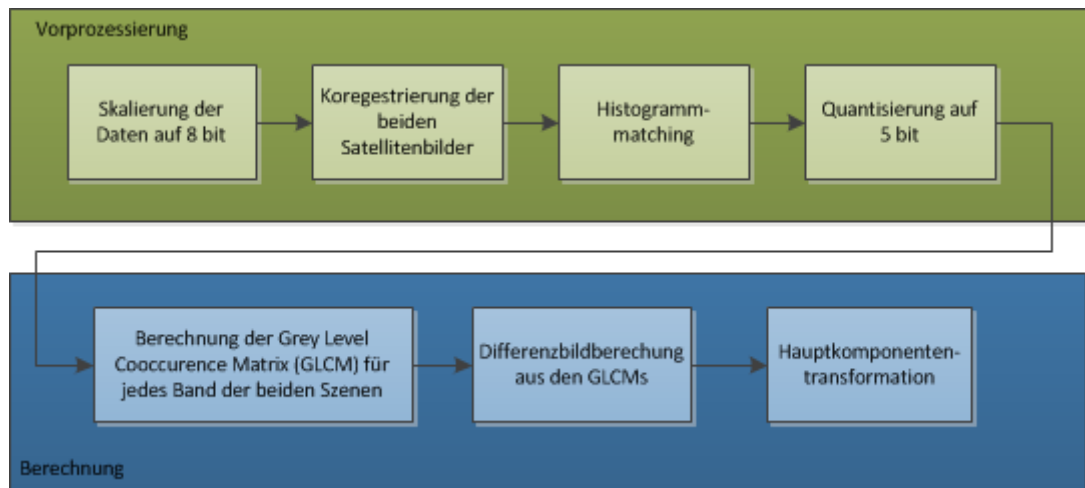


Abbildung 11: Schematische Darstellung der einzelnen Bearbeitungsschritte

4.4.1 Datenvorverarbeitung und Prozessierung

Die Vorverarbeitung von Datensätzen ist ein sehr wesentlicher Schritt in der Analyse fernerkundlich erhobener Bildmessungen, da aufgrund unterschiedlicher Aufnahmebedingungen (z. B. Sonnenlicht, Neigungswinkel des Sensors) und atmosphärischen Einflüssen (Dunst, Wolken) die Einzelmessungen der Bildpixel erhebliche Abweichungen untereinander aufweisen können. Vor diesem Hintergrund ist es notwendig, diese Bildpixel sowohl geometrisch (d. h. in ihrer Größe und Lage) als auch spektral (d. h. in ihrem Messwert) einander anzunähern, damit die identifizierten Änderungen zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten auch durch Landnutzungsveränderungen bzw. Änderungen in der Siedlungsstruktur sichtbar werden und nicht durch aufnahmebedingte Eigenschaften beeinträchtigt werden.

Elemente dieser Datenvorverarbeitung betreffen die Speicherung und Umwandlung der Daten in ein für das angewendete Softwarepaket lesbares Dateiformat sowie die Angleichung der Reihenfolge der einzelnen Bildkanäle und das räumliche Auswählen des geeigneten und zu verarbeitenden Bildausschnittes.

Nachdem die Daten in ein einheitliches Format überführt wurden ist es notwendig, eine Anpassung der in den Bilddaten gespeicherten Grauwerte durchzuführen, da die Intensitäten zwischen zwei Aufnahmen sehr stark voneinander abweichen können. Ein Vergleich der unterschiedlichen radiometrischen Eigenschaften der beiden Aufnahmen ist in Abbildung 12 dargestellt. Die Abbildung zeigt auf der linken Seite die Häufigkeitsverteilung der Grauwerte im ersten Bildkanal für die Aufnahme 2009 und auf der rechten Seite die Häufigkeitsverteilung der Grauwerte im ersten Bildkanal für die Aufnahme 2012. Die deskriptiven Statistiken der Bilddaten zeigen, dass die Grauwerte für 2009 einen Mindestwert von 773 und einen Maximalwert von 6818 bei einem Mittelwert von 1259 aufweisen. Für 2012 liegt diese Verteilung bei einem Minimalwert von 4084, einem Maximalwert von 55919 und einem Mittelwert von 5778.

Es ist also erkennbar, dass die beiden Bilddaten unterschiedliche radiometrische Eigenschaften aufweisen. Vor diesem Hintergrund werden die radiometrischen Eigenschaften der beiden Aufnahmezeitpunkte aneinander angepasst. Das geschieht zunächst über die Angleichung der radiometrischen Bandbreite beider Bilder auf 8 bit. Das bedeutet, dass dadurch der Wertebereich

der vorkommenden Grauwerte so transformiert wird, dass in beiden Bildern nur die Ausprägungen zwischen 0 und 255 vorkommen können.

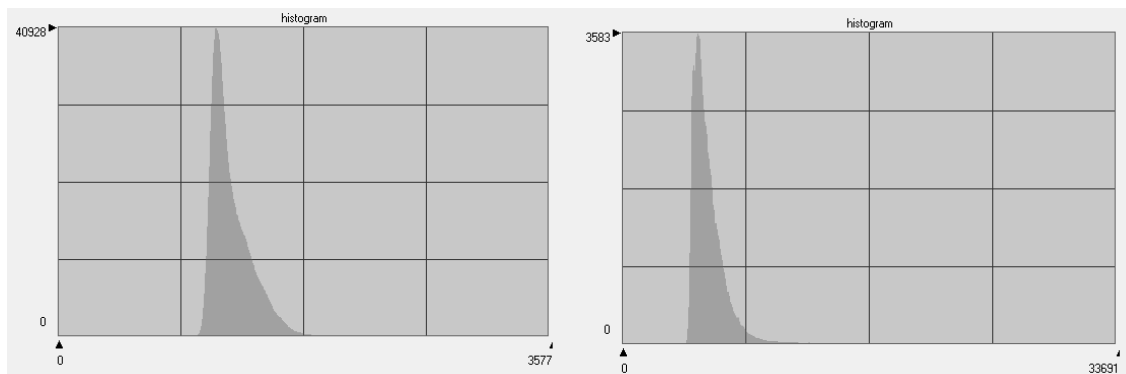


Abbildung 12: Unterschiedliche radiometrische Eigenschaften zwischen den Aufnahmen für die Aufnahme 2009 (links) und 2012 (rechts).

Nach der radiometrischen Anpassung müssen im zweiten Schritt die Bilder auch geometrisch aneinander angepasst werden, damit die sich in beiden Bilddaten überlagernden Bildpunkte auch in der Natur einander entsprechen. Für dieses Vorgehen wird eine Bild-zu-Bild-Koregistrierung durchgeführt. Sie sucht identische Bildpunkte in beiden Aufnahmen und passt die Szenen danach entsprechend aneinander an. Damit soll vermieden werden, dass erkannte Veränderungen auf Lageungenauigkeiten zurückzuführen sind. Die Anpassung wird auf Basis von Transinformation (engl.: *mutual information*) durchgeführt, welche ein Maß aus der Informationstheorie darstellt. Sie beschreibt die gemeinsame Information in zwei Datensätzen, wobei höhere Übereinstimmung der beiden Datensätze auch höhere Transinformation, z. B. Ähnlichkeit, darstellt. Wenn zwei Bilder exakt aufeinander koregistriert sind, ist ihre Transinformation maximal. Im konkreten Fall werden durch die Anwendung unterschiedlicher Bildverschiebungsparameter die besten Überlappungen gesucht, welche die Transinformation maximieren.

Wenn die Bilddaten sowohl im gleichen radiometrischen Raum liegen als auch geometrisch aneinander angepasst sind, können im nächsten Schritt die Histogramme aneinander angepasst werden. Dieses *Histogrammmatching* zielt darauf ab, eine Bild-zu-Bild-Kontrastanpassung durchzuführen, welche auf empirischen kumulativen Verteilungsfunktionen beider Bilddaten beruht. Dadurch werden Helligkeitsunterschiede der einzelnen Bilder, die durch verschiedene Grauwertebereiche der beiden Szenen entstehen, ausgeglichen. Dabei wurde die Szene des Jahres 2009 als Referenzbild genommen und die 4 Einzelszenen aus dem Jahr 2012 darauf angepasst.

Für die Berechnung der Bildmerkmale, welche die Änderungen in den Bilddaten erkennen lassen, ist eine weitere Quantisierung der Bilddaten auf den Wertebereich von 5 bit (= 32 Grauwerte) erforderlich. Nachdem alle verwendeten Bilddaten den gleichen Histogrammbereich und die gleiche Quantisierung aufweisen, können die kernelbasierten Berechnungen der Bildmerkmale, wie im folgenden Abschnitt beschrieben, berechnet werden.

4.4.2 Berechnung der Bildmerkmale

Die Ausweisung der Veränderungen in den beiden Aufnahmezeitpunkten basiert auf der Grundlage der kernelbasierten Berechnung von Bildmerkmalen, welche über ein Texturmodell, nämlich der *grey level cooccurrence matrix* (GLCM), berechnet werden (Haralick et al., 1973). Die Textur beschreibt nicht nur die einfache Grauwertverteilung von Bildpunkten in einem bestimmten Bereich, sondern

betrachtet ebenfalls die räumliche Verteilung und ihre relative Anordnung im Sinne einer Abfolge. Es können dadurch also bestimmte Muster in den Bildern erkannt und auf Basis eines Texturmodells beschrieben werden, welche in weiterer Folge für die Ausweisung von Veränderungen herangezogen werden. Das Texturmodell wird für ein gleitendes Fenster (engl.: *moving window*) benachbarter Bildpunkte im gesamten Bilddatensatz berechnet. Dabei wird folgendermaßen vorgegangen: für jeden Bildpunkt werden die 8 direkt umliegenden Bildpunkte betrachtet (entspricht einer Nachbarschaft = 1). Dafür werden auch unterschiedliche Richtungen der Nachbarschaft berechnet. Es können auf diese Art nämlich Nachbarschaften in den 4 Hauptrichtungen 0°, 45°, 90° und 135° ausgewiesen werden, wobei sich dies auf die Anordnung entweder horizontal oder vertikal nebeneinander sowie diagonal bezieht. Für die Erstellung der Matrix werden die Häufigkeiten der vorkommenden Bildpunktanordnungen pro Fenster gezählt und bilden somit die Grundlage für die Berechnung der eigentlichen Bildmerkmale. Diese stellen weitere Ableitungen auf Basis der Matrix dar. Insgesamt werden 8 verschiedene Texturmaße berechnet:

Contrast: ist ein Maß zur Berechnung der lokalen Variationen innerhalb des Bildes. Je höher der Wert, desto höher ist der Kontrast des Bildes.

Angular Second Moment (ASM): beschreibt die Homogenität des Bildes, mit kleinen Werten für homogene Bilder bzw. Bildbereiche. Homogen bedeutet in diesem Fall, dass die Textur einem kleinen Maßstab folgt.

Correlation: beschreibt die linearen Grauwertabhängigkeiten.

Homogenität: nimmt höhere Werte an, wenn geringere Unterschiede in den Grauwertpaaren identifiziert werden.

Dissimilarity: beschreibt mit hohen Werten einen hohen lokalen Kontrast.

Entropy: ist ein Maß zur Ordnung innerhalb eines Bildes und beschreibt die texturale Homogenität. Hohe Entropiewerte sind gegeben, wenn alle Einträge der Matrix sehr ähnlich sind und das Bild nicht zu stark texturiert ist. Kleine Werte treten hingegen bei stark strukturiertem Bildinhalt auf.

Mean: Mittelwert der GLCM.

Standard Deviation: Standardabweichung der GLCM.

Diese 8 Texturmaße werden für jedes einzelne der 5 Kanäle der Bilddaten berechnet, wodurch eine Gesamtanzahl von 40 Bildmerkmalen berechnet wird.

4.4.3 Change detection

Die Ausweisung der Veränderung zwischen den beiden Zeitpunkten 2009 und 2012 geschieht über die Differenzbildung der berechneten Bildmerkmale, sodass mit lediglich einem Bilddatensatz weitergearbeitet wird, welcher ausschließlich die Differenzen enthält, die *change Vektoren*. Dabei werden die berechneten Texturmaße für das Jahr 2009 von den Texturmaßen für das Jahr 2012 bildpunktweise voneinander subtrahiert. Eine Zunahme des Wertes des jeweiligen Texturmaßes wird entsprechend als positiver Wert dargestellt, eine Abnahme als negativer Wert. Die Streuung der Werte um den Nullpunkt, was keiner Änderung zwischen den beiden Aufnahmezeitpunkten entspricht, ist in Abbildung 13 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die größten Häufigkeiten in der Nähe des Wertes „0“ auftreten.

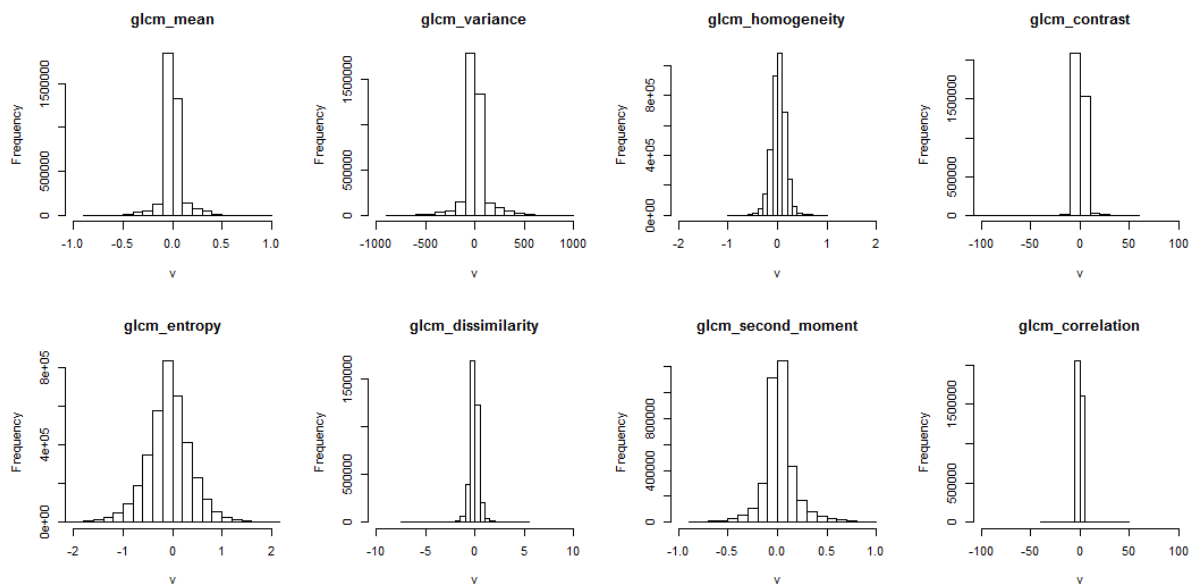


Abbildung 13: Histogramme der Change Vektoren der berechneten Texturmaße für den ersten Bildkanal zwischen 2009 und 2012.

Wie bereits oben dargestellt, ergeben sich aus den 8 Texturmaßdifferenzen und für jeden der 5 Bildkanäle insgesamt 40 *change Vektoren*. Um diese hohe Dimensionalität der Information zu reduzieren, wird eine Hauptkomponententransformation durchgeführt (PCA, engl.: *principal component analysis*). Als Ergebnis der PCA werden die ursprünglichen Variablen orthogonal transformiert, um neue, unkorrelierte Variablen zu erzeugen. Sie stellen jedoch eine Linearkombination der ursprünglichen Variablen dar. Dabei enthält die erste Variable den höchsten Informationsgehalt und die nachgeschalteten Variablen einen zunehmend geringeren Informationsgehalt. Dies stellt eine Erleichterung bei der Auswertung hochdimensionaler Merkmalsräume dar, da in der Regel einige wenige höhere Hauptkomponenten ausreichen, um den Großteil des Informationsgehaltes abzudecken.

4.5 Identifikation potentieller Wohngebäude

Das Anschriftenregister im Zensus ist ein zentrales Element zur Verknüpfung verschiedener Erhebungsteile. Für dessen Aufbau und Aktualisierung könnten unterstützende Geoinformationen zur Nutzung eines Gebäudes eingesetzt werden, um den manuellen Aufwand zu reduzieren. In Ansätzen wurden Geodaten bereits im Zensus 2011 bei Plausibilitätsprüfungen und der Vervollständigungen von Ortsteilangaben eingesetzt (Stepien, 2012). Die Prüfung, ob an einer Anschrift Wohnraum vorhanden ist, bildet einen wesentlichen Schwerpunkt der manuellen Arbeit. Im Rahmen des Projektes sollte deshalb geprüft werden, ob mit Hilfe von aus Geobasisdaten abgeleiteten Merkmalen Wahrscheinlichkeiten zur Wohnraumeigenschaft von Anschriften ermittelt werden können. Entsprechend den Aussagen des Statistischen Bundesamtes (siehe Anforderungen im Anhang) sind sowohl die Information „Anschrift mit Wohnraum“ als auch die Information „Anschrift ohne Wohnraum“ relevant und hilfreich.

Die Beschreibung der Gebäude mit Informationen zu einer möglichen Wohnnutzung erfolgt in einem zweistufigen Prozess. In der Projektphase I werden zunächst alle Hausumringe mit einer potenziellen Wohnnutzung identifiziert (d. h. irrelevante Gebäude ohne Wohnnutzung durch Analyse der

Gebäudegrundfläche und ATKIS-Nutzungsart ausgeschlossen). Für die restliche Gruppe der Gebäude erfolgt in Projektphase II die Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten hinsichtlich einer potenziellen Wohnnutzung. Die Wahrscheinlichkeit wird auf Basis geeigneter Gebäudemerkmale und unter Nutzung statistischer Methoden (u. a. mittels binärer logistische Regressionsanalyse) und maschinellen Lernverfahren. Die Erkenntnisse der Analyse sollen Aufschluss darüber geben, ob derartige Prozesse den Zensus 21 unterstützen können (z. B. zur Qualitätssicherung beim Aufbau des Anschriftenregisters).

4.5.1 Identifikation irrelevanter Gebäude

In einem ersten Schritt werden zunächst jene Gebäude identifiziert, die mit extrem hoher Wahrscheinlichkeit keine Wohnnutzung besitzen. Als erstes Kriterium kann dabei die Existenz einer Adresse verwendet werden, wobei dies voraussetzt, dass auch bewohnte Nebengebäude oder Hinterhäuser eine eigenständige georeferenzierte Adresse besitzen. Ein weiteres wichtiges Kriterium für die Erkennung ist die Gebäudegrundfläche, da eine Wohnnutzung immer eine Mindestausstattung impliziert, die sich wiederum in einer gewissen Mindestgrundfläche widerspiegelt.

Ein geeigneter Schwellwert kann über verschiedene Wege bestimmt werden. Einerseits kann dieser logisch abgeleitet und durch Literatur begründet werden. So besitzt das kleinste bekannte Haus Deutschlands in Wernigerode¹ in dem Hausumringdatensatz eine Grundfläche von etwa 22 m². Es ist heute jedoch ein Museum. Die in den USA beliebten und auch in Deutschland einhaltenden Mikrohäuser sind in der Regel über 25 m². Gartenlauben dürfen hingegen nach Bundeskleingartengesetz 24 m² Grundfläche nicht überschreiten.

Eine andere Form ist die statistische Ermittlung eines Schwellwertes zum Beispiel mit Hilfe einer Grenzwertoptimierungskurve (*Receiver Operating Characteristic*, ROC). In vorangegangenen Arbeiten konnten damit beispielsweise Schwellwerte zur Erkennung von Gebäuden ohne Wohnnutzung differenziert für freistehende Gebäude (Schwellenwert 56,8 m²) und für nichtfreistehendes Gebäude einen (Schwellenwert 39,7 m²) erarbeitet werden (Hecht 2014). Ausgangsbasis dieser Analyse war die bekannte Nutzungsinformation aus dem Liegenschaftskataster und die Auswertung der Grundrissfläche.

4.5.2 Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten einer Wohnnutzung

Eine Differenzierung des Gebäudemodells nach Wohngebäuden und Nicht-Wohngebäuden ist ohne konkreter Nutzungsinformation aus dem Liegenschaftskataster (ALKIS) alleine auf Basis der Hausumringe nicht möglich, da diese aktuell keine Informationen dazu besitzen. Ein Ziel wäre darum die Identifizierung von Hausumringen und Anschriften mit potentieller Wohnnutzung allein auf Basis quantitativer Merkmale zur Gebäudephysiognomie und räumlich übergeordneter thematischer Informationen zur Siedlungsstruktur aus dem ATKIS DLM-DE. Hierbei muss deshalb vorab eine räumliche Verschneidung der Gebäude mit den DLM-DE-Blockinformationen „Wohngebäude“ und „Flächen gemischter Nutzung“, „Industrie und Gewerbe“ und „Flächen besonderer funktionaler Prägung“ erfolgen. Aus diesem Datensatz werden in weiterer Folge Gebäude identifiziert, welche aufgrund ihrer Geometrie in Kombination mit der zugrundeliegenden Flächennutzungsinformation

¹ <http://kleinstes-haus.de/>

keine Wohnnutzung vermuten lassen. Diese Aufgabe ist in der Phase II des Projektes vorgesehen, solange unklar ist, ob der Bund die Lizenz für das 3D-Gebäudemodell LoD1-DE bekommen wird.

5 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die zentralen Erkenntnisse aus Phase I des Vorhabens zusammengefasst dargestellt.

5.1 Veränderungsanalyse – „Change Detection“

Eingang in die Detektion von Veränderungen finden die Hauptkomponenten (PCA) der *Change Vektoren* aus den aufbereiteten Satellitendaten, wie in Abschnitt 4.4 ausführlich dargestellt ist, und die räumlichen Abgrenzungen der Geometrien des DLM. Die im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte und angewendete Verfahrenskette reagiert auf Änderungen in den Bilddaten jeglicher Art. Sehr starken Änderungen der Oberflächenbeschaffenheit unterlegen sind vor allem Landbedeckungstypen, welche durch Vegetationsstadien beeinträchtigt werden. Das Rückstreuverhalten von Vegetation in den Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums gängiger Erdbeobachtungssysteme (red edge bei Rapid Eye: 690-730 nm) reagiert hochgradig sensibel auf den Chlorophyllgehalt von Pflanzen, welches für den Prozess der Photosynthese benötigt wird. Vor diesem Hintergrund treten diese in fernerkundungsbasierten Änderungsanalysen, welche das spektrale Rückstreuverhalten der Elemente auf der Erdoberfläche zur Grundlage haben, auch besonders verstärkt hervor. Im Falle der im Rahmen des aktuellen Vorhabens adressierten Anwendung bzw. Zielklasse der *change detection* sind jedoch weniger die Änderungen im agrarisch geprägten Bereich von Interesse, welche in der Tat den größten Anteil der identifizierten Änderungen darstellen, sondern jene Bereiche, welche grundsätzlich der urbanen Siedlungslandschaft zugeordnet werden können. Vor diesem Hintergrund werden die Geometrien des DLM der Objektart *Siedlung* als zusätzliches räumliches Kriterium in die Analyse aufgenommen (vgl. Abschnitt 3.2.4) und dadurch das zu betrachtende Gebiet auf die Bereiche des DLM eingeschränkt. Abbildung 14 unten zeigt für einen Ausschnitt des Testgebietes sowohl den Zustand der Flächen vor (2009) und nach (2012) der Veränderungen und die Überlagerung mit den Geometrien der Objektart *Siedlung* aus dem DLM sowie die Visualisierung der Change Vektoren der Hauptkomponenten im unteren Teil der Abbildung. Deutlich durch die intensive Farbgebung treten die Veränderungen in den landwirtschaftlich genutzten Bereichen hervor, welche durch die Überlagerung mit dem DLM in der weiteren Analyse unberücksichtigt bleiben.

Anhand der Darstellung der Change Vektoren der Hauptkomponenten ist zu erkennen, dass die Bereiche, in denen Änderungen aufgetreten sind, vor allem durch die Intensität der Farbgebung besonders deutlich hervortreten wie anhand der landwirtschaftlich genutzten Gebiete erkannt werden kann. Gebiete mit geringen oder keinen Veränderungen, wie für den Ausschnitt in der unteren Abbildung vor allem in den urbanen Gebieten, sind durch einheitliche Farbgebung repräsentiert.



Abbildung 14: Darstellung des Rückstreuverhaltens von landwirtschaftlich genutzten Flächen und ihre Änderung im Zeitraum 2009 (links) und 2012 (rechts) mit Überlagerung der Objektart *Siedlung* des DLM und Darstellung der veränderten Bildpunkte in den Change Vektoren der Hauptkomponenten (unten).

5.1.1 Änderungen der urbanen Struktur

In diesem Abschnitt werden detektierte Änderungen der urbanen Struktur dargestellt und diskutiert. In untenstehender Abbildung 15 ist das direkte Umfeld der Helios Klinik in Krefeld dargestellt, welche als deutliche und in der Farbgebung intensiv dargestellte Änderung der Change Vektoren der Hauptkomponenten hervortritt (Change Vektoren in der Mitte der Abbildung). Im Laufe des Jahres 2009 wurden im Umfeld des Klinikums umfassende Veränderungen und Baumaßnahmen durchgeführt, welche in der *Change Detection* deutlich hervortreten. Die Änderung ist auch deutlich in den RapidEye-Aufnahmen aus dem Jahr 2009 und 2012 zu erkennen. Sehr deutlich treten die Veränderungen auch in den Change Vektoren hervor, welche für diesen Bildbereich besonders intensiv dargestellt sind. Anhand von zusätzlichen Erdbeobachtungsdaten für das Jahr 2009 (links unten) und 2015 (rechts unten), welche eine deutlich höhere geometrische Auflösung aufweisen (im Dezimeterbereich), können die Änderungen auch noch einmal verdeutlicht werden.

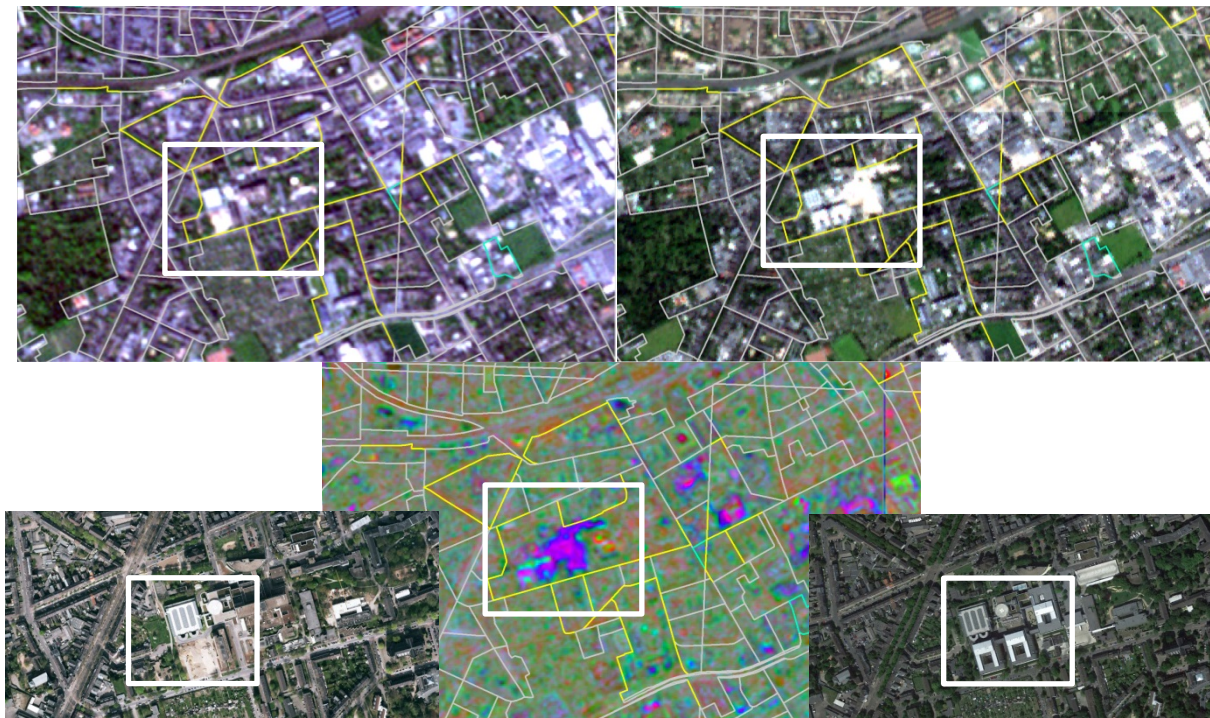


Abbildung 15: Darstellung der Veränderung im Umfeld der Helios Klinik in Krefeld und die Darstellung in der RapidEye-Aufnahme im Jahr 2009 (links oben), RapidEye 2012 (rechts oben), die Change Vektoren (Mitte) und zwei höher aufgelöste Datensätze aus der Zeit vor dem Umbau 2009 (links unten; © Google Earth) und nach dem Umbau 2015 (rechts unten; © Google Earth).

Weitere Fälle von Veränderungen unterschiedlichen Ausmaßes sind in untenstehender Abbildung 16 dargestellt. Das Gebiet zeigt einen Bereich eines Industrie- und Gewerbegebietes nordwestlich vom Stadtzentrum von Krefeld. Zu erkennen ist in den Change Vektoren abermals wie im vorhergehenden Beispiel ein Bereich im unteren Teil des Bildausschnittes, welcher dunkel und intensiv hervortritt (der Bereich ist im Bild durch den Kreis markiert). Im Vergleich mit der RapidEye-Aufnahme von 2009 und 2012 zeigt sich, dass hier eine größere bauliche Tätigkeit stattgefunden hat. Das wird auch durch die geometrisch hoch aufgelösten Aufnahmen links unten und rechts unten in der Abbildung bestätigt.

Neben dieser Baumaßnahme sind in den Change Vektoren auch Bereiche zu erkennen, welche aus dem Grundrauschen durch deutlichere Farben hervortreten, aber flächenmäßig nicht auf eine größere bauliche Tätigkeit schließen lassen. Als Beispiel dafür ist ein Bereich in der Abbildung mit dem Rechteck markiert, welcher zeigt, dass das Gebäude sowohl im Jahr 2009 als auch im Jahr 2012 stand. Dasselbe wird durch die hoch aufgelösten Daten bestätigt. Als Begründung für diese vermeintliche Änderung können geometrische Bedingungen der beiden Satellitenbildaufnahmen genannt werden, die durch Schwenkung des auf dem Satelliten angebrachten Sensors hervorgerufen werden können (vgl. Abschnitt 3.1), wodurch eine minimale Lageverschiebung entsteht, welche den Eindruck des „Kippens“ von Gebäuden entstehen lässt. Diese Effekte können über das Anwenden von Größen- bzw. Formkriterien bei der Analyse reduziert werden.



Abbildung 16: Darstellung der Veränderung im Umfeld der Helios Klinik in Krefeld und die Darstellung in der RapidEye-Aufnahme im Jahr 2009 (links oben), RapidEye 2012 (rechts oben), die Change Vektoren der Hauptkomponenten (Mitte) und zwei höher aufgelöste Datensätze aus der Zeit vor dem Umbau 2009 (links unten; © Google Earth) und nach dem Umbau 2015 (rechts unten; © Google Earth).

5.1.2 Bewertung

Für das Testgebiet der Stadt Krefeld wurden insgesamt 3026 Baublöcke aus dem DLM überprüft, wovon für 178 Baublöcke größere und deutliche Veränderungen identifiziert wurden für 103 Baublöcke kleinere bzw. weniger deutliche Veränderungen identifiziert wurden. Für die Detektion von größeren Veränderungen im Siedlungsbereich ist die geometrische Auflösung von 5 m x 5 m (entspricht 25 m²) der RapidEye-Daten ausreichend, wenn die Änderungen allerdings nur sehr kleinräumige Bereiche in hochstrukturierten Gebieten betreffen, kann die Auflösung durchaus an die Grenzen der Möglichkeit der Objektidentifikation treffen. Die Daten des Sensors RapidEye stellen derzeit allerdings durch die zeitliche Wiederholungsrate, welche durch die Anzahl der Satelliten in der Konstellation bedingt ist (5 Satelliten), die flächenmäßige Abdeckung mit einer Aufnahme (77 km Schwadbreite) und die trotzdem verhältnismäßig hohe geometrische Auflösung (5 m) eine besonders günstige Datengrundlage dar. Kleinere Details in der Änderungsanalyse können durch die Verwendung von deutlich höher aufgelösten Daten identifiziert werden.

5.2 Identifikation potentieller Wohngebäude auf Basis von HU und ATKIS

An dieser Stelle werden die Ergebnisse der Analyse der Hausumringe und der Referenzdaten hinsichtlich einer Erkennung potentieller Wohngebäude dargestellt.

5.2.1 Beschreibung der Struktur der Daten

Nach der Datenaufbereitung können einige Rückschlüsse auf die Gebäudestruktur gezogen werden. Die folgende Tabelle 3 zeigt die Anzahl der Gebäude differenziert nach ihrer Nutzung. Nur knapp die Hälfte aller Gebäude und Bauwerke der Hausumringe sind Gebäude mit Wohnnutzung. Eine visuelle Darstellung der Hausumringe findet sich in Abbildung 17 (rot=Gebäude mit Wohnraum).

Tabelle 3: Hausumringe.

	Objektanzahl
Gesamtanzahl HU	120.373
Hausumringe mit Wohnnutzung	57.858
... davon mit GA im HU	43.302
... davon ohne GA im HU	14.556
Hausumringe ohne Wohnnutzung	62.515
... davon mit GA im HU	2.937
... davon ohne GA im HU	59.578

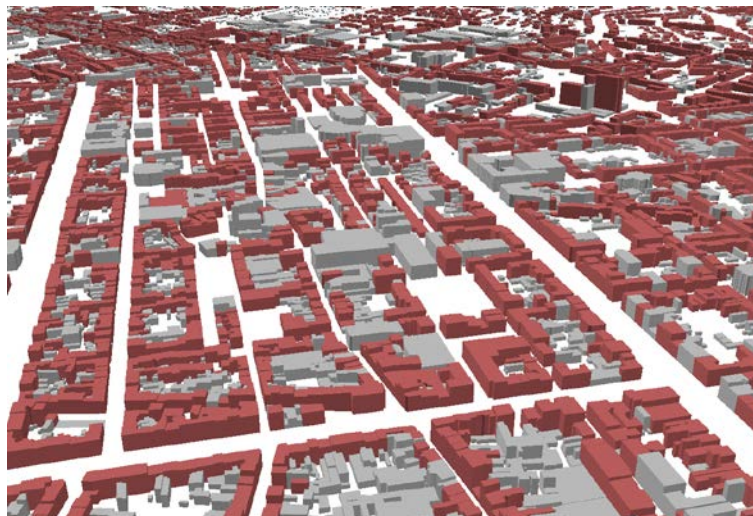


Abbildung 17: 3D-Gebäude differenziert nach Hausumringe mit und ohne Wohnung am Beispiel von Krefeld.

Die Betrachtung der Gebäudegrundflächen der Hausumringe für Gebäude mit und ohne Wohnnutzung offenbart in dem Hausumring-Datensatz die Existenz von Objekten, die keine eigenständigen Gebäude bzw. Gebäude mit Wohnraum sind. So existieren beispielsweise 2.434 (2 %) Hausumringpolygone kleiner als 10 m² (vgl. Tabelle 4) mit einer Wohnnutzung. Aufgrund ihrer geringen Größe können diese jedoch ausgeschlossen werden, da es sich um offensichtlich nur um Bauteile (Balkone etc.) und kleine Nebengebäude (Schuppen etc.) eines Wohngebäudes handelt. Es ist daher sinnvoll, einen geeigneten Schwellenwert zur Gebäudegrundrissfläche einzuführen, mit dem ein Ausschluss dieser irrelevanten Gebäude erfolgen kann, da aufgrund der zu kleinen Grundfläche eine Wohnnutzung nicht in Frage kommt.

Tabelle 4: Gebäudegrundflächen der Hausumringe für Gebäude mit und ohne Wohnnutzung.

	Wohnnutzung	Nichtwohnnutzung	Gesamt
Hausumringe < 10 m ²	2434 (2%)	4223 (4%)	6657 (6%)
Gebäude 10 m ² - > 15 m ²	1525 (1%)	5466 (5%)	6991 (6%)
Gebäude 15 m ² - > 20 m ²	1486 (1%)	16518 (14%)	18004 (15%)
Gebäude 20 m ² - > 25 m ²	1246 (1%)	6892 (6%)	8138 (7%)
Gebäude 25 m ² - > 30 m ²	1071 (1%)	4639 (4%)	5710 (5%)
Gebäude 30 m ² - > 35 m ²	1043 (1%)	3367 (3%)	4410 (4%)
Gebäude 35 m ² - > 40 m ²	1100 (1%)	2736 (2%)	3836 (3%)
Gebäude 40 m ² - > 45 m ²	1267 (1%)	1824 (2%)	3091 (3%)
Gebäude 45 m ² - > 50 m ²	1436(1%)	1447 (1%)	2883(2%)
Gebäude >= 50 m ²	45250 (38%)	15403 (13%)	60653 (50%)
Gesamt	57858 (48%)	62515 (52%)	120373

5.2.2 Adressierte Wohngebäude (GA im HU)

Unter der Annahme, dass jedes Gebäude mit Wohnnutzung eine Georeferenzierte Adresse besitzt, so können diese durch Verschneidung der Hausumringe mit den Adresskoordinaten bestimmt werden. Dabei wird die Existenz einer Koordinate innerhalb eines Polygons überprüft. Ein adressiertes Gebäude kann dabei als Hauptgebäude aufgefasst werden.

Mit Blick auf die Referenznutzung sind im Fall von Krefeld (vgl. Abbildung 18) von den 57.858 Hausumringen mit Wohnnutzung nur 43.302 Hausumringe tatsächlich adressiert. Dies macht erneut die Notwendigkeit der Einführung eines Schwellenwertes zur Eliminierung irrelevanter Hausumringe deutlich. Allerdings sollte hier auch beachtet werden, dass Hinterhäuser und Nebengebäude mit Wohnraum teilweise keine eigenständige Georeferenzierte Adresse besitzen können.

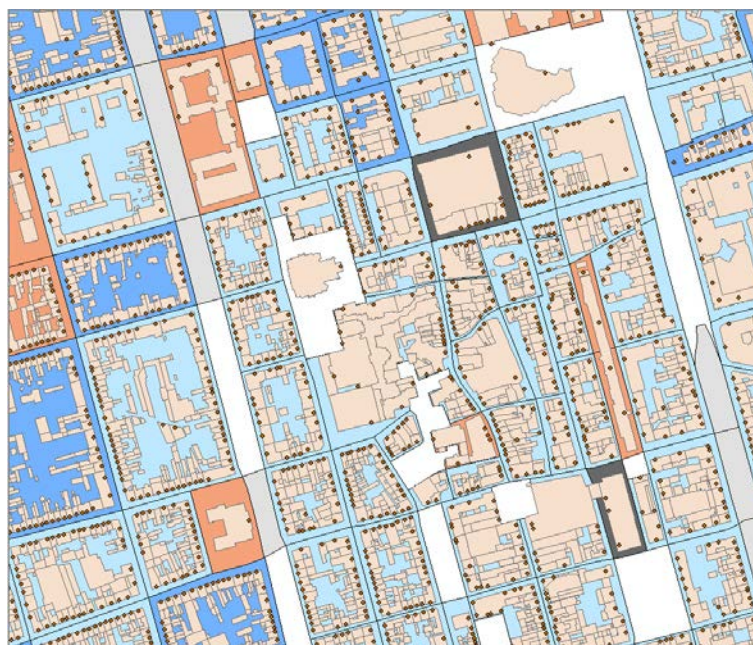


Abbildung 18: Adressierte Hausumringe (Hauptgebäude) mit Wohnraumnutzung.

5.2.3 Ermittlung von Größenschwellwerten für den Ausschluss irrelevanter Gebäude

Es hat sich gezeigt, dass Hausumringe von kleinen irrelevanten Objekten bereinigt werden sollten. Für die Ermittlung von geeigneten Schwellwerten wurde die Referenzinformation zur Gebäudefunktion hinzugezogen. Die Histogramme in Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen eine gute Trennbarkeit zwischen den Gebäuden mit Wohnraum und dem Rest der Hausumringe. Der Schwellenwert kann entweder analytisch oder manuell durch visuelle Interpretation bestimmt werden.

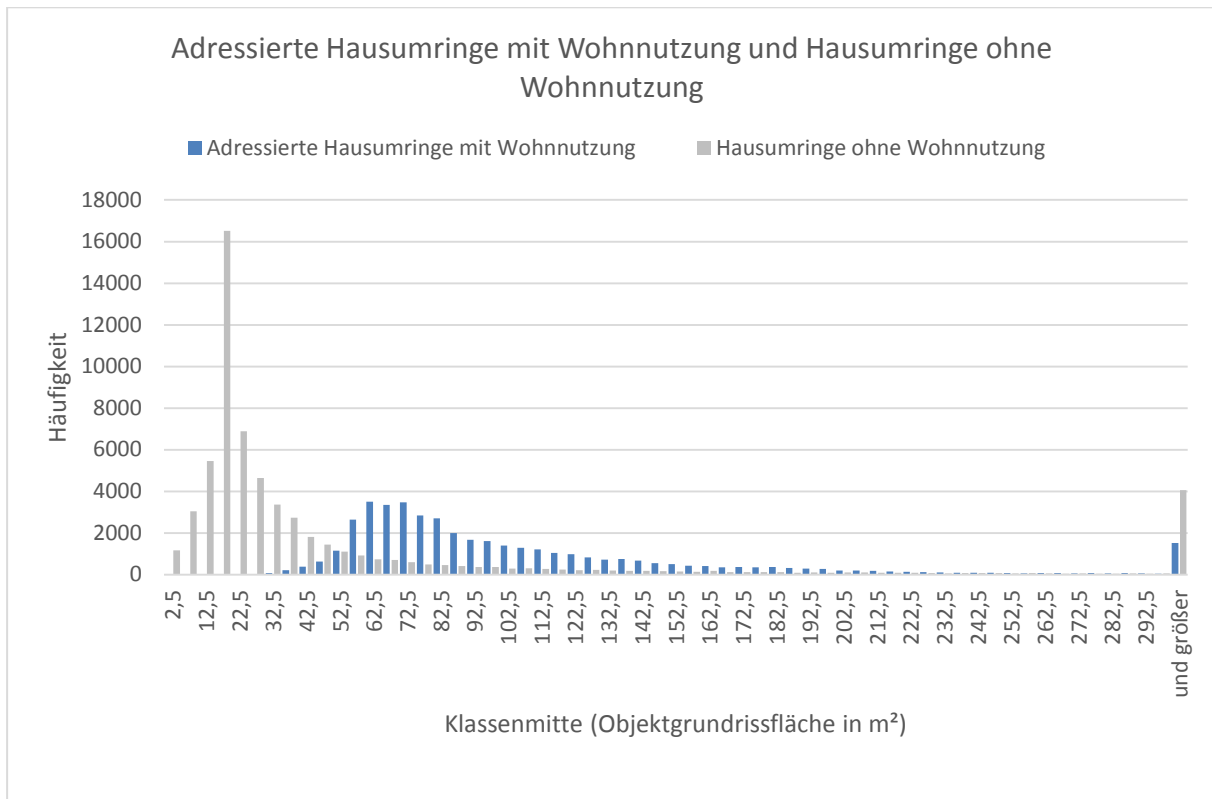


Abbildung 19: Histogramm der adressierten Hausumringe mit Wohnraum und Hausumringe ohne Wohnraum bezogen auf die Gebäudegrundrissfläche (in 5 m² Abständen, bis 300 m²).

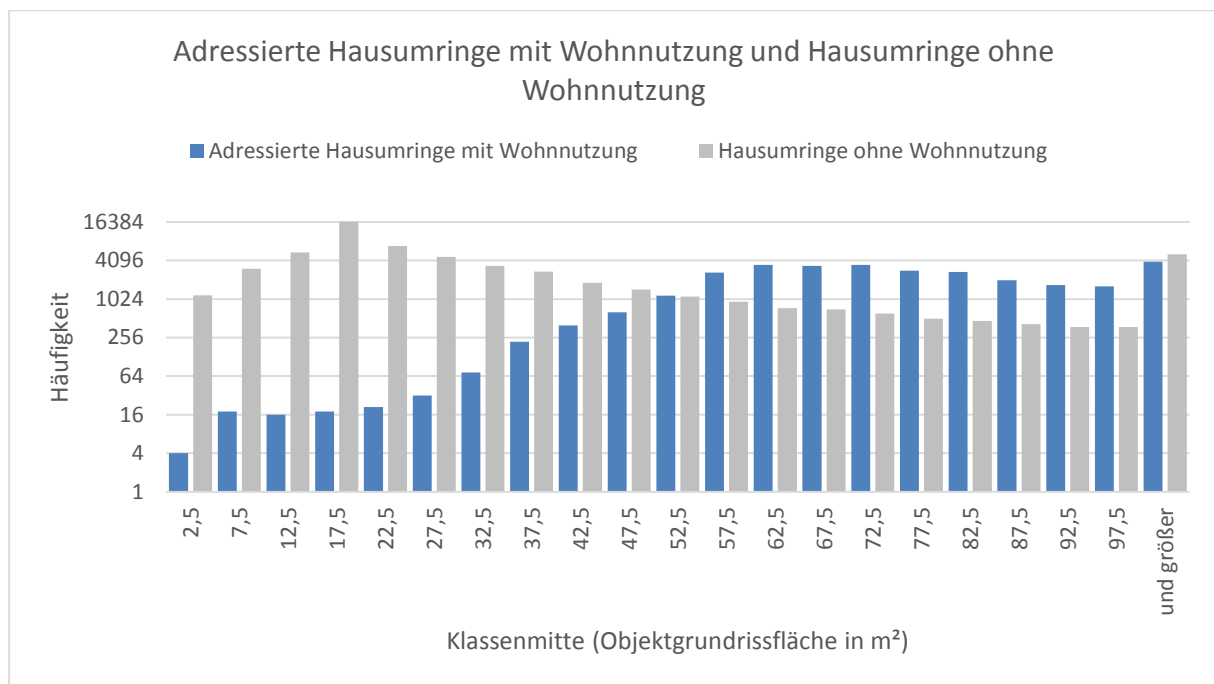


Abbildung 20: Histogramm im 2er-Logarithmus der adressierten Hausumringe mit Wohnraum und Hausumringe ohne Wohnraum bezogen auf die Gebäudegrundrissfläche (in 5 m² Abständen, bis 100 m²).

Eine Eliminierung dieser offensichtlich irrelevanten Objekte sollte darum vorab über Größenschwellwerte erfolgen. In einem GIS kann das kleinste Wohngebäude durch Auswertung der Gebäudefunktion und der Gebäudegröße bestimmt werden. In diesem Fall ist jedoch zu beachten, dass datenbedingt einige kleine Gebäudeteile in den Hausumringen eine Wohnnutzungsausprägung der ALK besitzen können, weshalb hier eine Sortierung nach der Größe eine visuelle Inspektion durch Überlagerung mit Luftbild- und Schrägluftbilddiensten nötig ist, um das kleinste Gebäude mit Wohnraum zu identifizieren.

In einer Analyse wurden zunächst alle Hausumringe nach Grundrissflächengröße in aufsteigender Reihenfolge geordnet. Der Datensatz enthält 120.373 Gebäude, bis zum festgestellten kleinsten Wohngebäude entsprach dies schlussendlich einer zu prüfenden Menge von 41.006 Gebäuden, was ca. 34 % der Gesamtgebäudeanzahl entspricht. Um sich dem kleinsten Wohngebäude anzunähern, wurden 243 Gebäude (0,2 % der Gesamtgebäudeanzahl und 0,6 % der zu prüfenden Menge), welche entweder mindestens eine Adresse besitzen, oder vom Typ Hauptgebäude (adressiert) sind und Wohngebäudenutzung aufweisen, ausgewählt und einzeln überprüft. Für die Einzelfallüberprüfung muss ein entsprechender Zeitaufwand einkalkuliert werden. Als allgemein kleinstes Wohngebäude wurde die Margaretenstrasse 2 mit einer Grundrissfläche von 25,95 m² identifiziert.

In Krefeld besitzt das kleinste Haus eine Gebäudegrundfläche von 25,95 m², weshalb wir für diese Studie zunächst einen Schwellwert von 25 m² ansetzen. Allerdings sind freistehende Gebäude in der Regel größer als halb-freistehende oder gereichte (vgl. Hecht 2014). Die folgende Abbildung 22 zeigt in einem Histogramm die Gebäudegröße der Wohnnutzung für freistehende und halbfreistehende Gebäude.

Anschließend sollte das kleinste freistehende Wohnhaus identifiziert werden. Der Prüfprozess verhält sich hierbei analog zu der allgemeinen Prüfung. Zunächst wurden jedoch alle Gebäude mit einer

Gebäudegrundrissfläche $<25 \text{ m}^2$ ausgeschlossen, da dies den Schwellwert für ein reguläres Wohngebäude darstellt und somit kein Gebäude eine kleinere Grundfläche aufweisen kann. Außerdem wurden noch ein Attribut der Nachbarschaft der Gebäude berechnet, welches alle Gebäude $<25 \text{ m}^2$ ausblendet, wodurch das kleinste Wohnhaus ohne Nachbar ermittelbar wird. Die Gesamtgebäudeanzahl $>25 \text{ m}^2$ Gebäudegrundrissfläche beträgt 14.756, was 12,25 % aus der Gesamtmasse entspricht. Die schlussendlich zu prüfende Menge beträgt 453 Gebäude (0,38 % der Gesamtmenge und 3,1 % der selektierten Daten). Um das kleinste freistehende Wohngebäude zu identifizieren, mussten nur zwei Gebäude in Augenschein genommen werden. Die Einzelfallüberprüfung war somit in diesem Fall sehr schnell umzusetzen. Als kleinstes freistehendes Wohngebäude wurde Kullpfad 98 mit einer Grundrissfläche von $26,22 \text{ m}^2$ identifiziert.

Die folgenden drei Histogramme (Abbildung 21 bis Abbildung 23) zeigen noch einmal die Verteilung der Grundrissfläche für adressierte Gebäude mit Wohnraum sowohl gesamt, nur für freistehende und nur für nichtfreistehende Gebäude. Die Muster zeigen generell eine größere Grundfläche für die freistehenden Gebäude. Es ist daher sinnvoll zwei Schwellwerte, sowohl für freistehende als auch nichtfreistehende Gebäude, einzuführen.

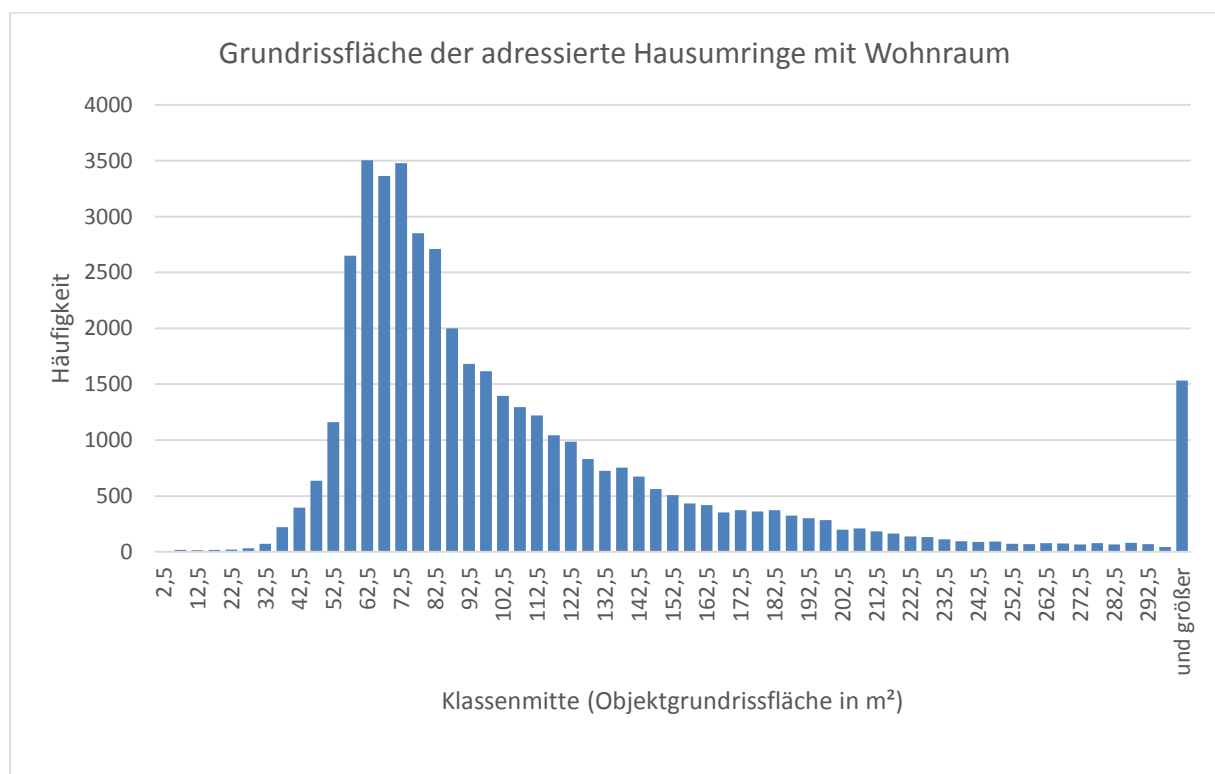


Abbildung 21: Histogramm der adressierten Hausumringe mit Wohnraum bezogen auf die Gebäudegrundrissfläche (in 5 m^2 Abständen, bis 300 m^2).

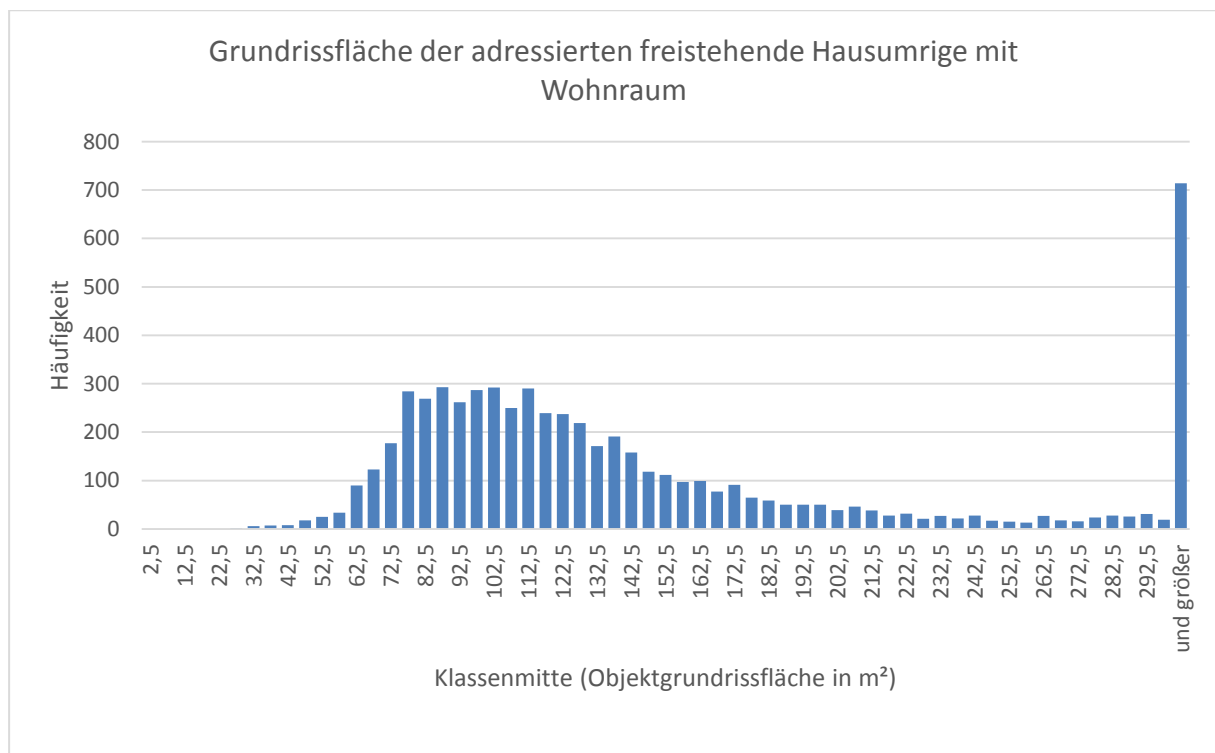


Abbildung 22: Histogramm der adressierten freistehenden Hausumringe mit Wohnraum bezogen auf die Gebäudegrundrissfläche (in 5 m² Abständen, bis 300 m²).

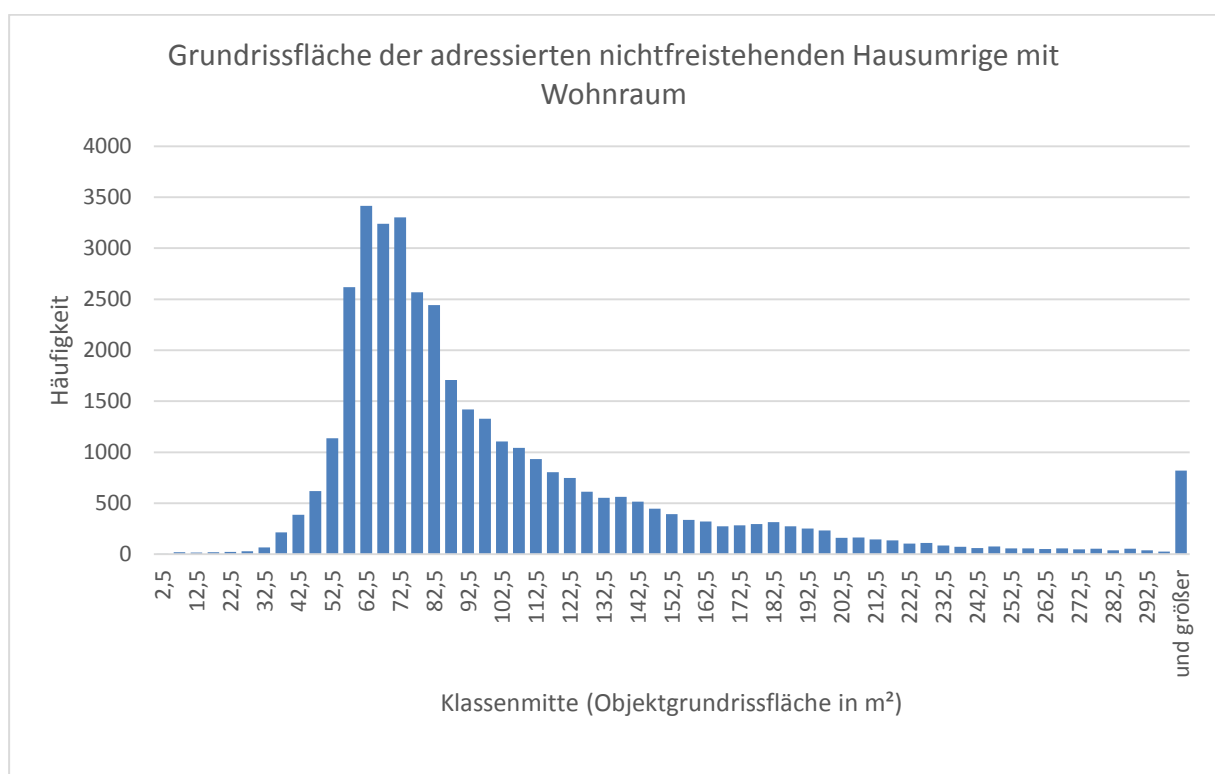


Abbildung 23: Histogramm der adressierten freistehenden Hausumringe mit Wohnraum bezogen auf die Gebäudegrundrissfläche (in 5 m² Abständen, bis 300 m²).

5.2.4 Anwendung der Schwellwerte

Nach Anwendung der Schwellwerte auf die Daten des Testgebietes ergibt sich folgendes Bild (Abbildung 24 und Tabelle 5).



Abbildung 24: Hausumringe nach Anwendung des Schwellwertes: Hausumringe schwarz umrandet und rot markiert die irrelevanten Hausumringe sowie grün die adressierten Hausumringe (Hauptgebäude) mit Wohnraum mit einer Gebäudegrundrissfläche größer 25m².

Tabelle 5: Zentrale Ergebnistabelle.

	Anzahl der Hausumringe	Bezogen auf Gesamtbestand	Bezogen auf die Klasse
Hausumringe Gesamtanzahl	120373		
davon mit Wohnraum	57858	48%	
davon ohne Wohnraum	62515	52%	
Hausumringe mit Adresse	46239*	38%	
davon mit Wohnraum	43302	36%	94%
davon ohne Wohnraum	2937	2%	6%
Hausumringe ohne Adresse	74134	62%	
davon mit Wohnraum	14556	12%	20%
davon ohne Wohnraum	59578	49%	80%
Hausumringe <25 m² mit Adresse	189	0,157%	
davon mit Wohnraum	77	0,064%	41%
davon ohne Wohnraum	112	0,093%	59%
Hausumringe <25 m² ohne Adresse	39601	33%	
davon mit Wohnraum	6614	5%	17%
davon ohne Wohnraum	32987	27%	83%
Hausumringe freistehender Einzelhäuser (>25m²)	14756	12%	
davon mit Wohnraum	6274	5%	43%
davon ohne Wohnraum	8482	7%	57%

*(Mehrfachadressbelegungen an Polygonen führen zu einer Differenz zur Zahl der Eingangselemente von GA 2012)

Die ca. 120.000 Hausumringe sind im Verhältnis nahezu ausgeglichen auf Hausumringe mit Wohnraum und ohne Wohnraum verteilt. Mindestens eine Adresskoordinate besitzen 46.239 Hausumringe (38 %), dabei bilden die Hausumringe mit Wohnraum den dominanten Anteil (ca. 94%). Die meisten Hausumringe ohne Adresse, insgesamt 74.134 (62 %), entfallen auf Hausumringe ohne Wohnraum 59.578 (ca. 80 % Anteil an adresslosen Hausumringen), entsprechend entfallen ca. 20 % der adresslosen Hausumringe auf solche mit Wohnraum. Nach der Feststellung des kleinsten Wohnhauses und der daraus resultierenden Festlegung des Schwellwertes für ein Wohnhaus von 25 m² Gebäudegrundrissfläche dürften sich unterhalb der Grenze keine regulären Wohnhäuser mehr befinden und diese Hausumringe somit auch keine Adresskoordinate tragen. Bei 189 Hausumringen treffen diese Eigenschaften dennoch zu, in 112 Fällen (0,093 % im Verhältnis zu der Gesamtanzahl der Hausumringe) kann die Wohnnutzung definitiv ausgeschlossen werden. Bei 77 Objekten (0,064 %) besteht noch die theoretische Möglichkeit eine reguläre Wohnnutzung innezuhaben, daher können diese Objekte per se nicht ausgeschlossen werden. Zudem können 39.601 (33 %) Objekte, welche kleiner als 25 m² Gebäudegrundrissfläche und unadressiert sind direkt ausgeschlossen werden. Dabei entfallen 83 % auf die Klassen ohne Wohnraum und ca. 17 % auf die Klasse mit Wohnraum. Würden zusätzliche Adresspunkte, welche sich von den GA unterscheiden, auf solchen Gebäuden verortet sein, so könnte eine Wohnnutzung direkt ausgeschlossen werden. Somit könnte im Hinblick auf das AGR und den Ausschluss falsch adressierter Gebäude ein erheblicher Mehrwert an Information in dieser Klasse verborgen sein. Ohne die genaue Kenntnis der Informationen aus dem AGR ist eine Quantifizierung allerdings nicht möglich. Der Anteil der freistehenden Einzelhäuser (nach Anwendung des Schwellwertes von 25 m² Gebäudegrundrissfläche) beträgt 6.274, was 5 % an allen Hausumringen und 43 % innerhalb der Klasse entspricht. Dementsprechend entfallen mit 57 % und 7 % an allen Hausumringen 8.482 Objekte auf jene ohne Wohnraum.

5.2.5 Nutzung der Flächennutzung aus ATKIS für die Gebäudebeschreibung

Im ATKIS Basis-DLM wird die Flächennutzung auf Baublockebene beschrieben. Anhand dieser Information können den Gebäuden Wahrscheinlichkeiten einer Wohnnutzung zugeschrieben werden, in dem das statistische Auftreten einer Wohnnutzung jedes Hauptgebäudes empirisch bestimmt wird. Die Tabellen fassen die Ergebnisse der Analyse zusammen.

Bei den Kategorien Wohnnutzung und Mischnutzung ist die Korrelation der Werte von Hausumringen in diesen Kategorien und dem Anteil der Wohnnutzung der Hausumringe nach ALK entsprechend hoch. Für Wohnnutzung 97 % und für Mischnutzung 92 %. Von 1.391 Hausumringen auf den Gewerbe- und Industrieflächen (ATKIS) sind 503 Objekte (36 %) dennoch der Wohnnutzung nach ALK zuzuschreiben. Ähnlich verhält es sich bei der Kategorie der funktionalen Prägung, hierbei sind von 534 Hausumringen auf der entsprechenden ATKIS-Nutzung 302 Objekte (57 %) der Wohnnutzung nach ALK zuzuschreiben. Bei Industrie- und Gewerbe lässt sich der relativ hohe Wert über auf diesen Flächen befindlichen Wohngebäuden erklären. Da ATKIS die dominante Nutzungsart innerhalb eines Gebietes beschreibt ist dieser Wert somit logisch erklärbar. Bei der Klasse der Besonderen Funktionalen Prägung ist der Anteil der Wohnnutzung noch einmal höher als bei Industrie- und Gewerbe. Hierbei zählen z. B. auch Seniorenwohnheime in die entsprechende Klasse, welche eine reguläre Wohnnutzung besitzen. Somit ist auch dieser Wert logisch erklärbar.

Es ist festzuhalten, dass der Informationsgehalt der mit ALK-Informationen bestückten Daten der 3D-Gebäudemodelle grundsätzlich detaillierter und aussagekräftiger ist als jener der ATKIS-Daten.

Tabelle 6: Gegenüberstellung der Anzahl der Hausumringe nach ATKIS-Funktion und der Klassifizierung nach Wohnnutzung laut ALK.

ATKIS-Funktion	Anzahl adressierter Hausumringe nach Anwendung der Schwellwerte (potenzielle Wohnnutzung*)	Irrelevante Hausumringe	Anteil derer mit Wohnnutzung (nach ALK)
Wohnnutzung	38.243	51.580	37.149 (97%)
Mischnutzung	5.724	11.168	5.249 (92%)
Gewerbe und Industrie	1.391	7.032	503 (36%)
Besondere funktionale Prägung	534	1.689	302 (57%)

Tabelle 7: allgemeine Gegenüberstellung der Anzahl der Hausumringe nach ATKIS-Funktion und der Klassifizierung nach Wohnnutzung laut ALK.

ATKIS-Funktion	Anzahl Gebäude auf den Flächen	Anteil derer mit Wohnnutzung (nach ALK)
Wohnnutzung	88.729	47.884 (54%)
Mischnutzung	16.417	8.699 (53%)
Gewerbe und Industrie	7.535	747 (10%)
Besondere funktionale Prägung	1.991	499 (25%)

Tabelle 7 zeigt die allgemeine Gegenüberstellung von Hausumringen auf der jeweiligen ATKIS-Nutzung und dem Anteil der Wohngebäude nach ALK. Festzustellen ist, dass bei den Klassen Wohnnutzung und Mischnutzung der Anteil der Wohngebäude nach ALK mit 54 % respektive 53 % recht gering ausfällt. Grund hierfür sind hauptsächlich Hausumringe kleiner Größe wie Garagen oder Schuppen, welche sich ebenfalls auf den jeweiligen ATKIS-Flächen befinden und somit der entsprechenden Kategorie zugeordnet werden. Bei den Kategorien Gewerbe- und Industrie (10 % Wohnanteil) und Besondere Funktionale Prägung (25 % Wohnanteil) entfallen prozentual gesehen weniger Hausumringe mit Wohnraum auf die entsprechende Kategorie. Hauptsächlicher Grund hierfür sind wiederum die kleineren Objekte, welche sich auf den entsprechenden Flächen der ATKIS-Kategorie befinden. Zu bemerken ist noch, dass die Werte der Wohnnutzung nach ALK und den ATKIS-Nutzungskategorien in der allgemeinen Betrachtung stets absolut gesehen höher sind als in der speziellen Betrachtung, was sich in der Einführung der Schwellwerte und Spezifizierung der Hausumringattribute (mit Adresse) in der speziellen Betrachtung begründet.

Die Analyse hat gezeigt, dass mit der Flächennutzung aus dem ATKIS die identifizierten Gebäude mit Wohnraum auf Flächen der „Wohnnutzung“ und „Mischnutzung“ mit hoher Wahrscheinlichkeit (>90 %) auch tatsächlich Wohnraum besitzen. Eine Herausforderung ist es nun, die Gebäude mit Wohnraum auf den Flächen „Gewerbe und Industrie“ und „Besondere funktionale Prägung“ zu identifizieren. Geometrische Eigenschaften (Gebäudemerkmale) könnten dabei helfen, eine Wahrscheinlichkeit zu ermitteln.

5.3 Identifikation potentieller Wohngebäude auf Basis des 3D-Gebäudemodells (LoD1-DE)

Es deutet sich an, dass der Bund in naher Zukunft Zugriff auf das 3D-Gebäudemodell Deutschland LoD1-DE haben wird. Für diesen Fall wurde anhand des Referenzdatensatzes Krefeld simuliert, welcher Mehrwert und welches Potenzial die Nutzung der Daten für die Unterstützung beim Aufbau des Anschriftenregisters haben kann. Die Tabelle 8 zeigt die Übersicht der im Datensatz der 3D-Gebäudemodelle enthaltenen Objekte (115.218), aufgeschlüsselt nach diesen mit Adresse 106.213 (92 %) und jenen ohne Adresse 9.005 (8%). Die Tabelle offenbart, dass für Krefeld nur 1/3 der adressierten Gebäude wirklich relevant im Sinne des Anschriftenregisters sind.

Tabelle 8: Übersicht der Objekte im Datensatz des 3D Gebäudemodells aufgeschlüsselt nach adressierten Objekten und denen mit Wohnraum.

Gesamt	115.218
Adressierte Gebäude	106.213 (92%)
davon mit Wohnraum	9.005 (8%)

Eine Erkennung irrelevanter Gebäude ist bei Nutzung des 3D-Gebäudemodells LoD1-DE genauer möglich, da der Informationsgehalt mit der gegebenen Gebäudefunktion deutlich höher ist. Für den Fall, dass der Bund die Lizenz für eine Nutzung dieser Daten besitzt, wäre eine detaillierte Genauigkeitsbetrachtung in Phase II des Projektes nötig.

6 Ausblick

Das Forschungsvorhaben ist, wie im Abschnitt 2.1 beschrieben in zwei Phasen gegliedert, wovon der Teil von Phase I im vorliegenden Bericht dokumentiert ist. Für die Phase II wurden im Verlauf der Gespräche mit beteiligten Einrichtungen weitere Ziele formuliert, welche die Rahmenbedingungen entsprechend ändern:

- Das Statistische Bundesamt hat im Nachgang des Kickoff am 29.10.2015 einige Fragen formuliert, welche unten noch einmal dargestellt sind.
- Der Bund hat voraussichtlich ab 2016 Zugriff auf den amtlichen Datensatz 3D-Gebäudemodelle, einem gemeinsamen Datenprodukt der Länder (zusammengeführt in der ZSHH). Der Datensatz enthält neben dem Grundriss und der Höhe der Gebäude auch die aus ALKIS abgeleitete Information zur Gebäudenutzung (Gebäudefunktion). Eine zusätzliche Ableitung von Gebäudehöhen aus stereoskopischen Satellitenbilddaten erscheint vor diesem Hintergrund als irrelevant, da der Vorteil der Bereitstellung von Gebäudehöhen für Gebiete ohne diese Informationen dann nicht mehr gegeben sein wird.

Der Bund hat bereits Zugriff auf die amtlichen Hausumringe (HU-DE) und Hauskoordinaten (HK-DE bzw. GA), die einen Beitrag bei der Plausibilisierung von Anschriften von Wohngebäuden liefern können. Die amtlichen Hausumringe und Hauskoordinaten wurden inzwischen wiederholt deutschlandweit hinsichtlich ihrer Qualität untersucht (Burckhardt 2012, Meinel und Burckhardt 2013, Hartmann 2015a,b). Auch konnten erste Erkenntnisse zur Qualität und Potentiale von 3D-Gebäudedaten für die Anwendung in der Raumwissenschaft und Planung gewonnen werden (Jahn

2014, Jahn et al. 2015). Mit dem ab 2016 für den Bund lizenzierten 3D-Gebäudemodell steht jedoch nun der Datensatz auch für Aufgaben des Statistischen Bundesamtes zur Verfügung. Ein Ziel der Phase II des Projektes sollte darum die Validierung des 3D-Gebäudemodells hinsichtlich einer Nutzbarkeit im ZENSUS-Verfahren entsprechend den Anforderungen des Statistischen Bundesamtes sein.

Das Statistische Bundesamt hat in einem Schreiben vom 4.11.2015 die folgenden Fragen aufgeworfen, die für den Forschungsteil II des Projekts GebäuDE-21 Bedeutung haben:

Sind unter den Anschriften des Anschriften- und Gebäuderegisters (AGR) die tatsächlichen Wohnungen vorhanden?

Diese Prüfung war im alten Zensus mit erheblicher manueller Arbeit verbunden. Jegliche Antwort auf diese Fragen durch fernerkundliche Daten oder amtlicher Geobasisdaten ist hilfreich und aufwandsreduzierend.

Forschungsbedarf: Semantische Analyse und Entwicklung einer Zuordnungsvorschrift auf Basis des *ALKIS®-Objektartenkatalogs* für eine Unterscheidung von Gebäude mit und ohne Wohnraum. Untersuchungen zur Datenqualität des 3D-Gebäudemodells (Vollständigkeit, Korrektheit, Konsistenz und Genauigkeit) durch Vergleich mit Referenzdaten (originären Zensusdaten), Vergleich der Anschriften mit Gebäudenutzung aus 3D-Gebäudemodell

Datenbedarf: 3D-Gebäudemodell, Georeferenzierte Adressdaten, Anschriftenregister

Wie kann das Anschriftenregister aus fernerkundlichen oder anderen Datenquellen aktualisiert werden?

Flächendeckende Erkennung neuer oder abgerissener Gebäude aus einer aktuellen Fernerkundungsdatenquelle durch Abgleich mit dem Anschriftenregister bzw. den Hausumringen und Hauskoordinaten.

Forschungsbedarf: Können neue Wohngebäude bzw. abgerissene Wohngebäude im Vergleich mit einem erfassten Wohngebäudebestand (Anschriftenregister, Hausumringe HU-DE, Gebäudeadresse GA) genügend schnell aktualisiert werden?

Datenbedarf: optische Satellitenbilddaten hoher Auflösung

Wie kann durch fernerkundliche Datenquellen oder amtlicher Geobasisdaten eine Plausibilisierung der Gebäude- und Wohnungszählung hinsichtlich der Anzahl der Gebäude und der Anzahl der Wohnungen an einer Anschrift erfolgen?

Forschungsbedarf: Entwicklung und Testung eines Modells zur anschriftenscharfen Abschätzung der Gebäudeanzahl, der Wohnflächen und der Wohnungsanzahl. Diese Frage kann ohne den punktscharfen Einzeldaten der Zensuserhebung nicht beantwortet werden.

Datenbedarf: 3D-Gebäudemodell, Anschriftenregister, punktscharfe Einzeldaten (Anzahl der Wohnungen, Wohnungsgröße etc.)

7 Quellen

AdV (2015a): ALKIS-Objektartenkatalog DLKM, Version 7.0.2.

AdV (2015b) ATKIS-Objektartenkatalog Basis-DLM, Version 7.0.2.

Burkhardt, M. (2012): Analyse des Gebäudebestandes in Deutschland auf Grundlage der Hausumringe (HU) und georeferenzierter Adressdaten, Diplomarbeit, TU Dresden.

BlackBridge (2015): Satellite Imagery Product Specifications, Version 6.1, April 2015
http://www.blackbridge.com/rapideye/upload/RE_Product_Specifications_ENG.pdf

Crick, S. (2014): Maintaining an address register with administrative data. International Conference on Census Methods 2014,
http://sites.nationalacademies.org/cs/groups/dbassesite/documents/webpage/dbasse_088807.pdf

da Silva Barbuda, M. (2014): The Brazilian experience in updating geographic databases for surveys and census. International Conference on Census Methods 2014,
http://sites.nationalacademies.org/cs/groups/dbassesite/documents/webpage/dbasse_088804.pdf

Dygaszewicz, J. (2014): Statistical Data assignment – from area to address point. International Conference on Census Methods 2014,
http://sites.nationalacademies.org/cs/groups/dbassesite/documents/webpage/dbasse_088809.pdf

Haralick, R.M., Shanmugam, K. und Dinstein, I. (1973): Textural Features for Image Classification, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 3 (6), S. 610-621.

Hartmann, A. (2015a): Analyse der Gebäudebestandsentwicklung in Deutschland aus Grundriss-bezogenen amtlichen Geobasisdaten, Diplomarbeit, TU Dresden.

Hartmann, A. (2015b): Qualitätsuntersuchung und automatische Aufbereitung der Geobasisdaten HU und HK für ein Monitoring des Gebäudebestandes Deutschlands, Studienarbeit, TU Dresden.

Hecht, R. (2014): Automatische Klassifizierung von Gebäudegrundrissen – Ein Beitrag zur kleinräumigen Beschreibung der Siedlungsstruktur, Berlin : Rhombos-Verlag IÖR-Schriften; 63,
http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/15160/IOER_Schrift_63.pdf

Hecht, R; Kunze, C.; Hahmann, S. (2013): Measuring Completeness of Building Footprints in OpenStreetMap over Space and Time, In: ISPRS International Journal of Geo-Information 2 (4), S.1066-1091.

Jahn, A.; Hecht, R., Meinel, G. (2015): 3D-Gebäudemodelle – Grundlage siedlungsstruktureller Analysen am Beispiel Sachsen, In: Flächennutzungsmonitoring VII – Boden – Flächenmanagement – Analysen und Szenarien, Meinel, G.; Schumacher, U.; Behnisch, M.; Krüger, T. (Hrsg.), IÖR-Schriften 67, Rhombos-Verlag Berlin.

Jahn, A. (2014): Bilanzierung des sächsischen Gebäudebestandes anhand neuester 3D-Gebäudedaten, Masterarbeit, TU Dresden.

Kleber, B., Maldonado, A., Scheuregger, D., Ziprik, K. (2009): Aufbau des Anschriften- und Gebäuderegisters für den Zensus 2011. Wirtschaft und Statistik 7, S. 639-640.

https://www.destatis.de/DE/Publikationen/WirtschaftStatistik/Zensus/Zensus.pdf?__blob=publicationFile

Meinel, G.; Burckhardt, M. (2013): Die Geobasisprodukte Hausumringe und Hauskoordinaten - Charakterisierung und Aufbereitung für Gebäudebestandsanalysen, In: Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation (6), S.575-588.

Mervis, J. (2014): Building a cheaper, better census. *Science* 345 (6197), S. 608

Schumacher, U.; Krüger, T.; Kaden, M. (2013): Gebietsreformen und Verwaltungsgrenzen: Zum Aufbau einer Verwaltungsgebietsgeometrie VG25 aus dem ATKIS-Basis-Landschaftsmodell. In: Kartographische Nachrichten 63 (5), S.276-282.

Stadt Krefeld, (2015): Offizielle Homepage der Stadt, [https://www.krefeld.de/c125765d003d65ce/files/aktuelle_einwohnerzahlen.pdf/\\$file/aktuelle_einwohnerzahlen.pdf?openelement](https://www.krefeld.de/c125765d003d65ce/files/aktuelle_einwohnerzahlen.pdf/$file/aktuelle_einwohnerzahlen.pdf?openelement) (Letzter Zugriff: 03.12.2015)

Statistisches Bundesamt (2011): Das registergestützte Verfahren beim Zensus 2011. https://www.destatis.de/DE/Methoden/Zensus/ZensusMethodenDownload.pdf?__blob=publicationFile

Stepien, H. (2012): Nutzung von Geoinformationssystemen im Anschriften- und Gebäuderegister für den Zensus 2011, In: Wirtschaft und Statistik (11), S. 964-976.

Thompson, J. (2014): Welcome: Looking Towards 2020. International Conference on Census Methods 2014, http://sites.nationalacademies.org/cs/groups/dbassesite/documents/webpage/dbasse_088855.pdf

Trainor, T. (2014): The 2020 Census Address Canvassing: An alternative approach to a full address list verification. International Conference on Census Methods 2014, http://sites.nationalacademies.org/cs/groups/dbassesite/documents/webpage/dbasse_088806.pdf

Westenberg, G.; Will, K. (2013): Geometrieinformationen zum Gebäudebestand – die Produkte Hauskoordinaten, Hausumringe und 3D-Gebäudemodelle, In: Flächennutzungsmonitoring V. Methodik – Analyseergebnisse – Flächenmanagement, Berlin: Rhombos, IÖR Schriften 61, S. 147-154.

Wurm, M; d'Angelo, P.; Reinartz, P.; Taubenböck, H. (2014): Investigating the Applicability of Cartosat-1 DEMs and Topographic Maps to Localize Large-Area Urban Mass Concentrations, In: Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation & Remote Sensing, 7 (11), S. 4138-4152.

Zensus 2011: Zensus 2011, www.zensus2011.de

Ziprik, K. (2012): Qualitätsaspekte des Anschriften- und Gebäuderegisters im Zensus 2011, In: Wirtschaft und Statistik (11), S. 947-956.