

HOCHSCHULE MÜNCHEN

B A C H E L O R A R B E I T

Klassifizierung und Kategorisierung von Regionen in Europa

—
**Eine Analyse von Siedlungsmustern abgeleitet aus
Erdbeobachtungsdaten des Global Urban Footprint**

Verfasser:
Joachim Ferstl

Betreuer:

Dr. Hannes Taubenböck
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**

Prof. Dr. Peter Kammerer
Hochschule München
Fakultät für Geoinformation

Fakultät für
Geoinformation



München, 7. Oktober 2016

Sperrvermerk

Die vorgelegte Bachelorarbeit mit dem Titel „Klassifizierung und Kategorisierung von Regionen in Europa – eine Analyse von Siedlungsmustern abgeleitet aus Erdbeobachtungsdaten“ beinhaltet vertrauliche Informationen und Daten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und des Deutschen Fernerkundungsdatenzentrums (DFD). Diese Bachelorarbeit darf nur vom Erst- und Zweitgutachter sowie berechtigten Mitgliedern des Prüfungsausschusses eingesehen werden. Eine Vervielfältigung und Veröffentlichung der Bachelorarbeit ist auch auszugsweise nicht erlaubt. Dritten darf diese Arbeit nur mit der ausdrücklichen Genehmigung des Verfassers und Unternehmens zugänglich gemacht werden.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbst verfasst habe, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen verwende und alle Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Unterschrift

Ort, Datum

Danksagung

Ich danke Herrn Dr. Hannes Taubenböck vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt für die herausragende Unterstützung und problemlose Betreuung der Arbeit. Während der gesamten Zeit, die ich am DLR verbracht habe (Praktikum und Bachelorarbeit), habe ich mich sehr wohl gefühlt, da ich zu keinem Zeitpunkt unterfordert war, sondern mit sinnvollen Aufgaben bedacht wurde, wodurch ich nützliches Wissen generieren und wertvolle Erfahrungen sammeln konnte.

Außerdem möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die in irgendeiner Weise an der Erzeugung des Global Urban Footprint beteiligt waren und mir so die Datengrundlage geliefert haben, die diese Arbeit erst ermöglicht hat.

Abkürzungsverzeichnis

CLC	CORINE Land Cover
EEA	European Environmental Agency; dt. Europäische Umweltagentur
EFGS	Europäisches Forum für Geographie und Statistik
EU	Europäische Union
GIS	Geographisches Informationssystem
GHSL	Global Human Settlement Layer
GUF	Global Urban Footprint
HR	high resolution; dt. hohe Auflösung
INSPIRE	Infrastructure for Spatial Information in the European Community; dt. Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft
LAU	local administrative unit; dt. lokale Verwaltungseinheiten
LCP	least cost path; dt. Pfad geringster Kosten
LUMZ	Large Urban Morphological Zones; dt. große urban-morphologische Zone
MoC	Magnitude of spatial Connectivity; dt. Grad der räumlichen Konnektivität
MR	medium resolution; dt. mittlere Auflösung
NUTS	Nomenclature des unités territoriales statistiques; dt. Systematik der Gebietseinheiten für die Statistik
SAR	synthetic aperture radar; dt. Radar mit synthetischer Apertur
SAW	Standardabweichung
TIN	triangulated irregular network; dt. unregelmäßiges Dreiecksnetz
TSX	TerraSAR-X
TDX	TanDEM-X; TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement
UAS	Urban Audit Stadt
UFP	Urban Footprint Processor
UMZ	Urban Morphological Zones; dt. urban-morphologische Zone
URT	urban-rural typology; dt. Stadt-Land-Typologie
VHR	very high resolution; dt. sehr hohe Auflösung

Abbildungsverzeichnis

	Seite	
1.1	Urbane und ländliche Weltbevölkerung, 1950-2050 (Bildquelle: UN 2015b)	1
1.2	Urbane und ländliche Weltbevölkerung nach Großgebieten, 1950-2050 (Bildquelle: UN 2015b)	2
1.3	Das elektromagnetische Spektrum (Bildquelle: Wikimedia Commons 2009b)	4
2.1	Berlin und Umgebung im GUF (Bildquelle: DLR 2014)	8
2.2	Regionen in Deutschland – NUTS Level 1 bis 3	12
2.3	Das Untersuchungsgebiet sowie die Länder der EU	14
3.1	Übersicht über die wesentlichen Schritte des Workflows mit Verweisen auf korrespondierende Stellen in der Arbeit	16
3.1a	GUF als Ausgangsdatensatz (<i>Kap. 2.1</i>)	16
3.1b	Ableitung der Besiedlungsdichte aus dem GUF (INSPIRE-Grid) (<i>Kap. 3.2</i>)	16
3.1c	Unterstützende Einbindung externer Geodaten (<i>Kap. 2.2, 2.3 & 2.4</i>)	16
3.1d	Identifikation urbaner Knotenpunkte (<i>Kap. 3.3</i>)	16
3.1e	Triangulation eines Netzwerks zwischen urbanen Knotenpunkten (<i>Kap. 3.4.1.1</i>)	16
3.1f	Berechnung der Verknüpfungen (Grad der räumlichen Konnektivität) (<i>Kap. 3.4.2.1</i>)	16
3.1g	Klassifikation der Verknüpfungen (<i>Kap. 3.4.2.2</i>)	16
3.1h	Ausweisung von Stadtregionen mittels <i>Region Growing</i> (<i>Kap. 3.5.1</i>)	16
3.1i	Kategorisierung der Stadtregionen (<i>Kap. 3.5.2</i>)	16
3.1j	Plausibilisierung der Ergebnisse (<i>Kap. 5</i>)	16
3.2	Erstellung der Besiedlungsdichtekarte auf Basis des 1x1 km INSPIRE-Grids	17
3.3	Die Besiedlungsdichtekarte und das zugehörige Histogramm	18
3.4	Die russische Stadt Kasan auf der Besiedlungsdichtekarte (links) und im Satellitenbild (rechts)	19
3.5	Das topologische Netzwerk mit urbanen Knotenpunkten	21
3.6	Das Model zur Berechnung der LCPs	23
3.7	Übersicht über die Arten der räumlichen Verbindung mit je einem Beispiel	26
3.7a	Fünf Arten der räumlichen Verbindung zwischen zwei urbanen Knotenpunkten	26
3.7b	Beispieldiagramm für den Verlauf der Besiedlungsdichte (<i>verschmolzenen</i>)	26
3.7c	Beispieldiagramm für den Verlauf der Besiedlungsdichte (<i>stark verbundenen</i>)	26
3.7d	Beispieldiagramm für den Verlauf der Besiedlungsdichte (<i>gering verbundenen</i>)	26
3.7e	Beispieldiagramm für den Verlauf der Besiedlungsdichte (<i>sehr gering verbundenen</i>)	26

3.7f	Beispieldiagramm für den Verlauf der Besiedlungsdichte (<i>nicht verbundenen</i>)	26
3.8	Abbildung des Kostenpfades zwischen Bonn und Wuppertal mit verschiedenen Hintergrundkarten, sowie dem zugehörigen Diagramm	27
3.9	Veranschaulichung der Funktionsweise des <i>Region Growing</i> Verfahrens	28
3.10	Entwicklung des relativen Flächenwachstums bei zunehmend großzügiger Wachstumsbedingung	30
3.11	Visuelle Darstellung der Ergebnisse des <i>Region Growing</i> Verfahrens mit unterschiedlichen Wachstumsbedingungen	30
4.1	Die identifizierten urbanen Knotenpunkte sowie die klassifizierten Verbindungslinien dazwischen im Untersuchungsgebiet	36
4.2	Die identifizierten urbanen Knotenpunkte, die als <i>räumlich verbunden</i> klassifizierten Verbindungslinien sowie die ausgewiesenen Regionen im Untersuchungsgebiet	37
4.3	Die identifizierten urbanen Knotenpunkte, die als <i>räumlich verbunden</i> klassifizierten Verbindungslinien sowie die ausgewiesenen Regionen aus der Detailregion in Abbildung 4.2	38
4.4	links: Blaue Banane (Bildquelle: Wikimedia Commons 2009a); rechts: Blaue Banane und Sunbelt Banane (Bildquelle: Schätzl 1993)	40
4.5	European Blue Star (Bildquelle: JUGEM 2016)	40
5.1	Plausibilisierung der identifizierten urbanen Knotenpunkten mit der urban-rural typology und <i>Urban Audit Städten</i>	43
5.2	Plausibilisierung der Stadtregionen über den Vergleich der Bevölkerungsverteilung mit der Siedlungsfläche	44
5.3	Europas Megaregionen nach Florida u. a. 2008 (Bildquelle: Florida u. a. 2008, S. 471)	45
6.1	Urbanisierungsrate nach Großgebieten, 1950-2050 (Bildquelle: UN 2015a, S. 35)	46

Tabellenverzeichnis

2.1	Grenzwerte für die durchschnittliche Bevölkerungszahl auf den verschiedenen NUTS-Ebenen (Quelle: Eurostat 2015)	12
3.1	Detaillierte quantitative Charakterisierung und Kategorisierung der identifizierten territorialen Regionen (Kategorie A – D)	33
3.2	Detaillierte Liste der monozentrischen Regionen (Kategorie E) sowie der urbanen Knotenpunkte, die nicht Teil einer territorialen Region sind (Kategorie F)	34

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Motivation	1
1.1 Globale Urbanisierung	1
1.2 Urbane Fernerkundung	3
1.3 Ziel der Studie	4
2 Datengrundlage	6
2.1 Global Urban Footprint	6
2.2 INSPIRE-Grid	8
2.3 Urban Morphological Zones	9
2.4 Administrative Flächen in der Europäischen Union	11
2.4.1 Urban-rural typology der NUTS-3 Regionen	11
2.4.2 LAU-2 Regionen	13
2.5 Untersuchungsgebiet	13
3 Methodik	15
3.1 Überblick über den Workflow	15
3.2 Berechnung der Besiedlungsdichte	17
3.3 Identifikation urbaner Knotenpunkte	18
3.3.1 Bestimmung der Mindestdichte	19
3.3.2 Bestimmung der Mindestfläche	20
3.4 Räumliche Verknüpfung der urbanen Knotenpunkte	20
3.4.1 Vorbereitende Prozessierung der Daten	20
3.4.1.1 Triangulation des Netzwerks	20
3.4.1.2 Erstellung der Kostenoberfläche	21
3.4.2 Verknüpfung der urbanen Knotenpunkte durch Kostenpfade	22
3.4.2.1 Berechnung der Kostenpfade	22
3.4.2.2 Klassifikation der Verknüpfungen anhand der räumlichen Konnektivität	23
3.5 Räumliche Ausweisung und Kategorisierung von Regionen mit vernetzten Städten	28
3.5.1 Prinzip des Region Growing	28
3.5.2 Kategorisierung der identifizierten Regionen	30
4 Ergebnisanalyse	35
4.1 Urbane Knotenpunkte und nicht-territoriale Regionen	39
4.2 Charakterisierung der territorialen Regionen	41
5 Plausibilisierung der Ergebnisse	42
5.1 Urbane Knotenpunkte	42
5.2 Stadtregionen	43
6 Schlussbetrachtung und Ausblick	46

1 Motivation

1.1 Globale Urbanisierung

Um das Jahr 2007 fand ein „heimlicher Wendepunkt in der Menschheitsgeschichte statt“ (Taubenböck und Wurm 2015) — es wohnten zum ersten Mal mehr Menschen in den Städten als auf dem Land. Waren es im Jahr 1950 noch weniger als 30% der Weltbevölkerung, die in Städten lebten, so sind es heute über 54%. Für das Jahr 2050 ist ein Anteil von 66% an urban lebenden Menschen prognostiziert (UN 2015a; Abbildung 1.1). Die Urbanisierung, die als Zuwachs des Anteils von in städtisch geprägten Siedlungsformen lebenden Menschen verstanden wird, ist dabei einer der wirkmächtigsten Prozesse, welche die Welt prägen (Siedentop 2015). Da es sich bei diesen Veränderungen nicht nur um in die Stadt ziehende Menschen handelt, sondern auch um ein enormes Wachstum des urbanen Raumes, wird aufgrund der damit einhergehenden physischen Veränderung der Erde bereits vom „Anthropozän“ als neues Erdzeitalter gesprochen (Crutzen 2002). Dabei ist die Stadtbevölkerung innerhalb der Kontinente sehr unterschiedlich verteilt. So sind es in Asien knapp 48% der Menschen, die in Städten leben, und in Afrika 40%. Im Gegensatz dazu sind es in Lateinamerika und der Karibik mit 80% und in den westlich geprägten Erdteilen wie Nordamerika (82%) und Europa (73%) wesentlich mehr, wobei sich die Werte für Asien und Afrika laut der Prognose der Vereinten Nationen bis 2050 auf 56% und 64% erhöhen werden (siehe Abbildung 1.2; UN 2015a). Bezogen auf die in urbanen Gebieten lebende Weltbevölkerung beheimatet Asien davon 53%, Europa folgt mit 14% an zweiter Stelle. Europa ist also nach Asien, wo die Urbanisierung mit einer ganz besonderen Dynamik stattfindet (etwa 90% des weltweiten Bevölkerungswachstums bis 2050 soll dort und in Afrika stattfinden), der Kontinent mit dem zweitgrößten Anteil an in Städten lebenden Menschen (UN 2015a).

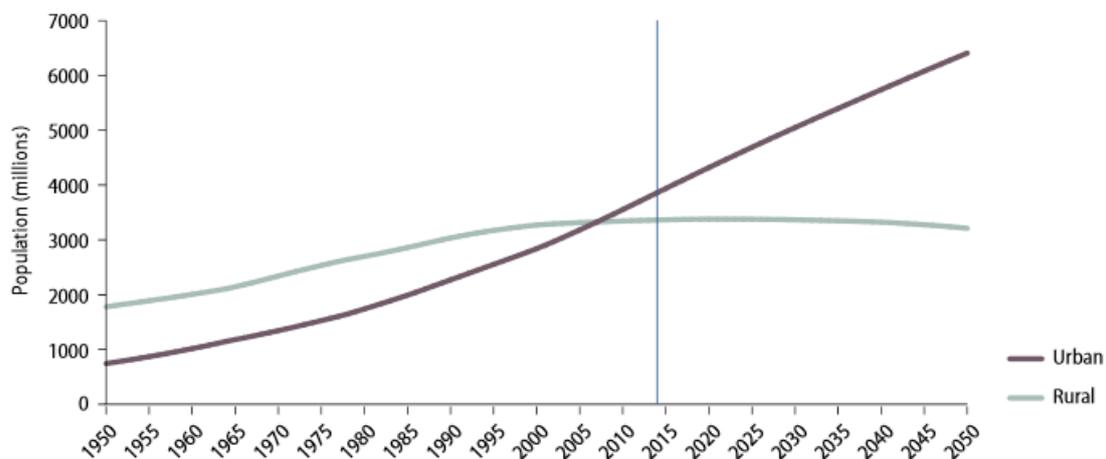


Abbildung 1.1: Urbane und ländliche Weltbevölkerung, 1950-2050 (Bildquelle: UN 2015b)

Diese Fakten und Entwicklungen zeigen die Notwendigkeit auf, mehr Daten zu generieren, um das Phänomen der Urbanisierung aus verschiedenen Perspektiven analysieren

und verstehen zu können. Dadurch lassen sich Entwicklungen erkennen und wenn möglich entsprechende Maßnahmen ergreifen. Die Folgen der voranschreitenden Urbanisierung sind dramatische Veränderungen in der Siedlungslandschaft – sowohl in Industrielandern als auch in Schwellenländern, wo Millionenstädte aus dem Nichts entstehen, Slums auf jede bebaubare Stadtfläche erweitert werden, und *mega-cities* unentwegt ihr Umland einnehmen (Taubenböck und Wurm 2015). Zunehmend bilden sich urbane „Megaregionen“ – räumlich teils extrem ausgedehnte Netzwerke von Städten und Stadtregionen, die nicht nur funktional, sondern auch verstärkt räumlich/physisch zusammenhängen, und – je nach Form und Ausprägung – als Megaregion, Megalopolis, *urban corridors* oder *urban galaxies* bezeichnet werden (Siedentop 2015; siehe auch Lang und Dhavale 2005; Schafraan 2014; Taubenböck, Wiesner u. a. 2014). Neue Konzepte wie die *mega-city* (mehr als 10 Millionen Einwohner), die *meta-city* (mehr als 20 Millionen Einwohner; UN-Habitat 2008) oder der Begriff der Megalopolis, welcher eine Stadt oder Agglomeration von Städten mit einer Bevölkerung von mehr als 10 Millionen Einwohnern bezeichnet (Unit 2012), versuchen urbane Siedlungsformen zum Beispiel über Populationsdaten neu zu definieren und gewinnen zunehmend an Bedeutung.

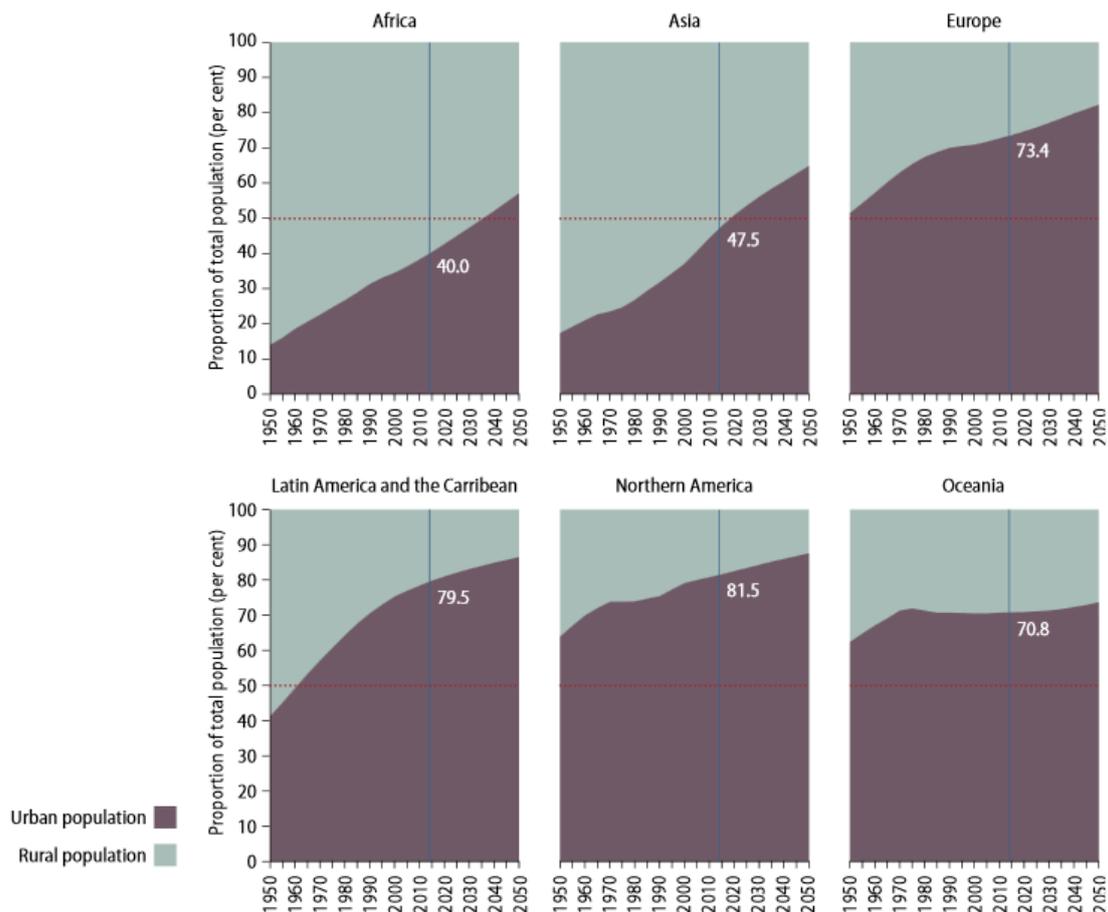


Abbildung 1.2: Urbane und ländliche Weltbevölkerung nach Großgebieten, 1950-2050 (Bildquelle: UN 2015b)

Im Gegensatz zu diesen Konzepten ist das Ziel dieser Arbeit die Ausweisung von Regionen anhand von Siedlungsstrukturen. Es werden sowohl territoriale als auch nicht-territoriale, räumlich eher vage definierte Regionen ermittelt und in ein bestehendes Portfolio aus ähnlichen Konzepten eingeordnet und damit verglichen.

1.2 Urbane Fernerkundung

Durch die eingangs beschriebenen Prozesse der Urbanisierung entsteht zwangsläufig eine „Dringlichkeit, urbane Flächen zu verstehen um dabei zu helfen, die Umweltverträglichkeit der Städte dieser Welt zu fördern und zu verbessern“ (Weng und Quattrochi 2006). Dabei kann die Fernerkundung mit ihren Möglichkeiten eine sehr wichtige Rolle spielen.

Die Fernerkundung – auch Erdbeobachtung genannt – nutzt Technologien, welche die von Objekten auf der Erdoberfläche reflektierte oder emittierte Energie erfassen. Diese wird von Sensoren in Form von elektromagnetischer Strahlung gemessen, wobei zwischen zwei Arten von Sensoren unterschieden wird. Ein passiver Sensor nutzt Strahlung natürlichen Ursprungs (z.B. Sonnenlicht), während aktive Sensoren selbst als Strahlungsquelle fungieren und die Reflexion dieser Strahlung messen (z.B. Radar). Radarstrahlung bietet den entscheidenden Vorteil der Unabhängigkeit von Umwelteinflüssen wie Wolkenbedeckung oder Tageslicht. Diese Faktoren wirken sich stark auf die Aufnahmeergebnisse passiver Aufnahmesysteme (z. B. optische Sensoren) aus, die den sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums (siehe Abbildung 1.3) bis hin zum mittleren Infrarot nutzen (0,3 bis 14 Mikrometer Wellenlänge). Je nach dem von welcher Plattform (z.B. Satellit, Flugzeug) und mit welchem Sensor gemessen wird, ermöglicht die Fernerkundung eine Datenerfassung in regelmäßigen zeitlichen Abständen sowie verschiedenen räumlichen Auflösungen. Die gewonnenen Informationen werden heutzutage zu digitalen Bilddaten verarbeitet. Die wichtigsten Kriterien solcher Daten sind die räumliche oder geometrische Auflösung – also die Fläche auf der Erdoberfläche, die von einem einzelnen Bildelement (Pixel) repräsentiert wird –, die spektrale Auflösung – die Bandbreite auf dem elektromagnetischen Spektrum, die vom Sensor abgedeckt wird –, die radiometrische Auflösung, welche die Sensibilität des Sensors charakterisiert, also wie klein die Energieunterschiede sind, die unterschieden werden können, und die temporale Auflösung als zeitliches Maß für das kleinste Zeitintervall, in dem ein Punkt auf der Erdoberfläche zweimal aufgenommen werden kann. Aus diesen Eigenschaften ergibt sich das Potenzial der Bilddaten. Um beispielsweise die Ausbreitung eines Waldbrandes detailliert zu überwachen, sind Bilder mit einem zeitlichen Abstand (temporale Auflösung) von höchstens einem Tag oder sogar im Stundenbereich notwendig, also temporal sehr hoch aufgelöste Daten. Genauso eignen sich Daten mit einer räumlichen Auflösung von einem Kilometer nicht für regionale Analysen auf einem Untersuchungsgebiet, das nur einige Quadratkilometer abdeckt.

Lag der Schwerpunkt in der fernerkundungsgestützten Forschung bis vor einigen Jahren noch auf der Untersuchung des Naturraums, so wurde in letzter Zeit urbanen Flächen mehr und mehr an Bedeutung beigemessen. Dies ist auf die gestiegene Verfügbarkeit hoch aufgelöster Daten, sowie immer besser werdende Technologien zurückzuführen, die das Interesse der Erdbeobachtungsgemeinde an urbaner Fernerkundung weckten (Weng und Quattrochi 2006). Klagte man vor etwa 15 Jahren noch über die mangelnde Verfügbarkeit von hochaufgelösten Daten (Donnay u. a. 2001), ist der Nutzer heute gefordert, die richtigen Daten und Methoden aus der breiten Palette der Produkte für sein Anliegen passend auszuwählen. Die urbane Fernerkundung ist dennoch relativ jung (Weng und Quattrochi 2006) und im Begriff, alle ihr zur Verfügung stehenden Möglichkeiten kennenzulernen und auszuschöpfen.

Ein Anwendungsbeispiel der Fernerkundung ist die Abschätzung der Vulnerabilität urbanisierter Gebiete bezüglich Flutereignissen mittels multi-sensoralen Erdbeobachtungsdaten. Taubenböck, Wurm u. a. 2011 nutzen solche Daten, um die Fernerkundungskomponente dieser multidisziplinären Fragestellung (Klimatologie, Meteorologie, Hydrologie,

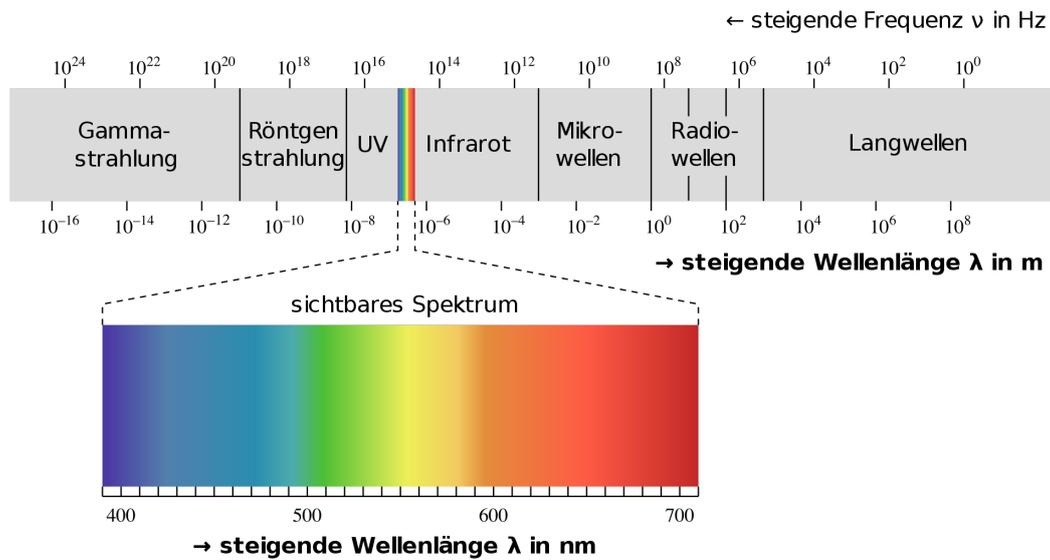


Abbildung 1.3: Das elektromagnetische Spektrum (Bildquelle: Wikimedia Commons 2009b)

Statistik etc.) zu ergründen. Es wird eine Verwundbarkeitsanalyse urbaner Gebiete vor einer Flut durchgeführt, das räumliche Ausmaß während und nach eines solchen Ereignisses kartiert und das Ausmaß eines potentiell entstandenen Schadens analysiert. Ein weiteres Beispiel ist die Nutzung optischer, multispektraler Satellitendaten mit einer räumlichen Auflösung von einem Meter oder weniger (VHR-Daten) zur Erfassung von Gebäuden in Flüchtlingslagern um so die Gesamtzahl und Verteilung der dort lebenden Menschen abschätzen zu können. In diesem Fall sind Bilddaten mit einer entsprechend hohen räumlichen Auflösung nötig, um einzelne Zelte detektieren zu können. Mit den gewonnenen Informationen können lokale Helfer unterstützt werden, wenn der Andrang der Flüchtlinge in ein Lager zu groß ist und die Menschen sich in der Folge unkoordiniert ansiedeln (Schöpfer u. a. 2015). In einer weiteren Studie stellen Taubenböck, Wiesner u. a. 2014 eine neue Methode vor, um urbane Landschaften, die von den Vereinten Nationen als Megaregion kategorisiert werden, nicht nur qualitativ sondern auch räumlich-quantitativ zu erfassen. Dazu wurden multitemporale, optische Satellitendaten der Landsat-Reihe mit einer mittleren bis hohen räumlichen Auflösung in Kombination mit dem Global Urban Footprint (GUF), der aus hochaufgelösten Radardaten der TerraSAR-X (TSX) und TanDEM-X (TDX) Missionen abgeleitet wurde (siehe Kapitel 2.1), verwendet, um die Entwicklung einer Megaregion in China über einen Zeitraum von etwa 35 Jahren auf drei verschiedenen räumlichen Ebenen zu untersuchen (Taubenböck, Wiesner u. a. 2014).

Die Anwendungsmöglichkeiten und Produkte sind sehr vielfältig und wachsen mit besseren Technologien und somit immer genaueren Daten in ihrer Zahl weiter an. Die Erdbeobachtung ist ein mächtiges Werkzeug zur Untersuchung von verschiedensten Fragestellungen aus allen möglichen Bereichen, das stetig besser wird und somit immer genauere Analysen zulässt.

1.3 Ziel der Studie

Auf den meisten Karten dienen politische oder andere administrative Räume zur Unterteilung der Erdoberfläche in einzelne Raumeinheiten. Diese repräsentieren allerdings nicht zwangsläufig Gebiete ähnlicher Charakteristik (z. B. wirtschaftlich, kulturell, phy-

sisch etc.). Vermehrt entstehen deshalb Konzepte wie Megaregionen, (länderübergreifende) Stadt- oder Metropolregionen, urbane Korridore oder große urbanmorphologische Zonen (EEA 2014, S. 17), die ein Sammelsurium von regionalen Karten bilden, welche diese künstlich geschaffenen Grenzen ignorieren und – in diesem Fall – in einem urbanen Zusammenhang in sich räumlich verbundene Regionen repräsentieren (z.B. Florida 2014; Hall und Pain 2006; Harrison und Hoyler 2015; Scott 2001 und Taubenböck und Wiesner 2015). Mit Bezug zu einer ökonomischen Thematik wurden neben vielen anderen mit der Blauen (RECLUS 1989), der Gelben oder der Sunbelt Banane (z.B. Dicken 1998) und dem European Blue Star (IAURIF 1991) räumliche Regionen geschaffen, die die tragenden Säulen der europäischen Wirtschaft repräsentieren (Hospers 2002). Allerdings sind diese aufgrund der konzeptionellen Komplexität, welche es erschwert diese Regionen eindeutigen Territorien zuzuweisen, räumlich nur sehr vage definiert.

Das Ziel der Studie ist es, Regionen mit ähnlicher Charakteristik bezüglich ihrer Besiedlungsdichte (Siedlungsdichte, Bebauungsdichte), ihrer urbanen Knotenpunkte und deren Interkonnektivität eindeutig territorial abzugrenzen. Die Datengrundlage hierfür bildet der GUF – ein aktueller Fernerkundungsdatensatz zur konsistenten, von administrativen Grenzen unabhängigen und weltweiten Kartierung von Siedlungsflächen (siehe Kapitel 2.1). Über die Siedlungsflächen wird zunächst die Besiedlungsdichte bestimmt, die wiederum dazu dient, urbane Knotenpunkte zu identifizieren und deren räumliche Verbundenheit (oder auch die Konvergenz ihrer Siedlungsmuster) zu messen. Diese Informationen bilden die Grundlage zur Ausweisung der finalen Regionen.

Des Weiteren ist die Modifizierung beziehungsweise Erweiterung der Methodik, die bereits von Taubenböck und Wiesner 2015 und Taubenböck, Wiesner u. a. 2014 angewendet wurde, Gegenstand der Arbeit. In beiden dieser vorangegangenen Untersuchungen war die Quantifizierung der räumlichen Verbundenheit von Städten mit Hilfe eines Netzwerks aus Verbindungslinien, die basierend auf Besiedlungsdichtewerten erzeugt wurden, das zentrale Element. Nachdem dieses Netzwerk bereits relevante Gebiete erahnen lässt, soll hier nun ein weiterer Schritt gemacht werden, indem aus dem Netzwerk, welches in den Vorgängerstudien das „Endergebnis“ der Methodik darstellt, konkrete Territorien, die sich in ihrer Charakteristik ähneln, abgeleitet werden. Zusätzlich liegt ein weiterer Unterschied darin, dass urbane Knotenpunkte über Siedlungsdichte und -größe ermittelt werden, was den entscheidenden Vorteil birgt, dass alle Ergebnisse aus nur einem Datensatz (GUF) abgeleitet werden können. In den Vorgängerstudien wurden Städte nach Populationsdaten, welche aufgrund von Unterschieden bei der Datenerhebung in verschiedenen Ländern oft nicht konsistent sind, als Knotenpunkte ausgewählt. Dadurch, dass die Untersuchung auf einer methodischen Logik aufbaut, die auf einen einzigen und in sich konsistenten Eingangsdatensatz angewendet wird, können Inkonsistenzen ausgeschlossen werden, die oft zu Problemen führen, wenn mehrere unterschiedliche Datensätze zusammengeführt werden.

Zuletzt soll die Untersuchung zu einem besseren empirischen Verständnis von Stadtnetzwerken und den damit zusammenhängenden Siedlungsmustern beitragen und aufzeigen, dass urbane Fernerkundung einen relevanten Beitrag dazu leisten kann.

2 Datengrundlage

In diesem Kapitel werden Raumeinheiten, Klassifikationen und andere Datensätze vorgestellt, die für die spätere Methodenentwicklung relevant sein werden. Außerdem wird das Untersuchungsgebiet der Studie beschrieben.

2.1 Global Urban Footprint

Der Global Urban Footprint (GUF) ist ein binärer Datensatz, der urbane Flächen auf der Erdoberfläche abbildet. Dabei wird zwischen zwei Klassen – *Siedlung* und *nicht-Siedlung* – unterschieden. Abgeleitet wurde der GUF aus Radardaten der TSX- und TDX-Satelliten (Krieger u. a. 2007). In dieser Studie dient er als Ausgangsdatsatz. Im Folgenden wird auf die Definition der klassifizierten Siedlungsgebiete eingegangen. Danach folgt zur Einordnung des Datensatzes ein kurzer Überblick über aktuelle Datensätze und Vorgängerprodukte des GUF. Der letzte Abschnitt in diesem Kapitel befasst sich mit den TSX- und TDX-Missionen und der Prozessierung der gewonnenen Daten zum finalen Produkt.

Siedlungsgebiete sind durch viele Landnutzungs- bzw. Landbedeckungsklassen beschriebene und kleinräumig, heterogen strukturierte Gebiete. Daher kann die Klasse *Siedlung* auch sehr unterschiedlich definiert werden (Esch, Taubenböck u. a. 2012). Neben anderen Disziplinen werden in der Raumplanung urbane Flächen meist über die Landnutzung beschrieben, wobei immer auch funktionale Aspekte einfließen (Esch, Taubenböck u. a. 2012). Aus Sicht der Fernerkundung macht eine Definition über Landbedeckungstypen jedoch mehr Sinn, da hier die physische Beschaffenheit der Erdoberfläche untersucht wird (Esch, Taubenböck u. a. 2012). So definieren Potere, Schneider u. a. 2009 „urbane Flächen als Orte, die von Bebauung dominiert werden, wobei »Bebauung«alle nicht-vegetativen, vom Mensch gebauten Elemente beinhaltet, [...] und »dominiert«eine Bedeckung von 50% oder mehr der gegebenen Flächeneinheit [...] impliziert.“ Dies führt dazu, dass ein von Vegetation dominiertes Pixel (z.B. Stadtpark) bezüglich der Landbedeckung als nicht urban betrachtet wird, obwohl es hinsichtlich seiner Funktionalität (Landnutzung) als Stadtfäche gewertet wird (Potere, Schneider u. a. 2009). Der Ausgangsdatsatz in dieser Studie (GUF) hat diese Definition (Landbedeckung über Landnutzung) adaptiert, da der Algorithmus in erster Linie vertikal gebaute Strukturen ableitet.

Die Auswahl der Produkte, die Siedlungsgebiete auf globaler Ebene zu erfassen versuchten, beschränkte sich bis zum Jahr 2000 auf ein einziges (Klotz, Wurm u. a. 2015). Dabei handelt es sich um die digitale Weltkarte *digital chart of the world*, welche hauptsächlich durch die Digitalisierung einer großen Sammlung topographischer Karten der United States Defense Mapping Agency im Maßstab 1:1.000.000 erzeugt wurde und – neben anderen – auch eine Klasse *populated places* (Danko 1992) enthält (Esch, Taubenböck u. a. 2012). Das Aufkommen neuer, leistungsfähigerer Technologien ermöglichte dann die Produktion zahlreicher weiterer globaler Datensätze in unterschiedlichsten räumlichen Auflösungen, die heute oft kostenlos verfügbar sind. Diese bewegen sich aber eher im MR-Bereich. Beispiele hierfür sind das Global Rural-Urban Mapping Project (GRUMP; 1km), MODIS Urban Land Cover (MOD500; ca. 500m) und GlobCover (GLOBC; ca.

300m). Während die GRUMP und MOD500 Datensätze in ihrer thematischen Tiefe dem GUF gleichen (binäre Datensätze), bietet GLOBEC 22 thematische Landbedeckungsklassen (Klotz, Wurm u. a. 2015). Außerdem lassen die oben genannten Produkte eine räumliche und/oder thematische Auflösung vermissen, die nötig wäre, um detailliertere, globale Analysen hinsichtlich der Charakteristiken und Auswirkungen urbaner Landschaften effektiv zu unterstützen (Esch, Taubenböck u. a. 2012). Ein Datensatz, der räumliche Informationen – unter anderem auch zu urbanen Gebieten – mit einer höheren geometrischen und thematischen Detailtiefe aufweisen kann, ist CORINE Land Cover (CLC; Büttner u. a. 2004; DLR 2016). Allerdings beschränkt sich dessen Abdeckung ausschließlich auf Europa. Ein Produkt, das dem GUF in Bezug auf räumliche Ausdehnung und Auflösung sehr ähnlich ist, ist der Global Human Settlement Layer (GHSL). Dieser wird aktuell am Joint Research Center der Europäischen Kommission produziert und hat dank der Nutzung von optischen HR- und VHR-Bildern verschiedener Sensoren und Plattformen (Satellit, Flugzeug etc.) eine Auflösung von zehn Metern, die es ermöglicht Siedlungsstrukturen konsistent auf globaler Ebene zu kartieren (Klotz, Kemper u. a. 2016). Bisher herrschte aufgrund von Begrenzungen hinsichtlich der Bildbeschaffung, Datenkosten und voll funktionsfähiger Datenprozessierungs- und Bildanalysetechniken ein Mangel an Karten mit globaler Abdeckung, die aus Daten von HR- bzw. VHR-Sensoren wie zum Beispiel WorldView, GeoEye, Ikonos, Quickbird, SPOT oder RapidEye abgeleitet wurden (Esch, Taubenböck u. a. 2012). Mit dem GHSL ist eine genau solche Initiative gestartet worden, wohingegen der GUF auf Basis von VHR-Radardaten erstellt wurde. Beide Produkte sind momentan die einzigen, die Siedlungsstrukturen auf globaler Ebene mit einer so hohen, bisher unerreichten Genauigkeit abbilden.

Die zur Erzeugung des GUF genutzten Daten wurden im Rahmen der beiden Missionen TSX und TDX aufgenommen. Beide Missionen wurden in öffentlich-privater Kooperation zwischen dem DLR und der EADS Astrium GmbH geplant und durchgeführt. Nach dem Start von TSX im Jahr 2007 folgte drei Jahre später der fast baugleiche Satellit TDX. Bei den Instrumenten auf beiden Satelliten handelt es sich um hochauflösende SAR-Antennen (synthetic aperture radar), die in verschiedenen Modi betrieben werden können (Huber u. a. 2010). Das Hauptziel dieser Missionen ist die Erzeugung eines digitalen Höhenmodells mit zuvor unerreichter Genauigkeit. Die Datenaufnahme hierfür ist während der Zeit im Parallelbetrieb beider Satelliten im sogenannten Helix-Formationsflug umgesetzt und Mitte September 2014 abgeschlossen worden (Huber u. a. 2010; Ohndorf 2014). Mit dem Aufkommen der neuesten SAR-Sensoren, wie TSX und TDX, hat sich auch die Meinung, dass derartige Sensoren nicht zur genauen Charakterisierung von urbanen Gebieten eignen, geändert (Esch, Marconcini u. a. 2013). Solch ein Datensatz an SAR-Bildern bietet also auch aktuelle Geoinformation zur Verteilung und Entwicklung von Siedlungsgebieten (Potere und Schneider 2009). Das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des DLR hat deshalb ein Bildverarbeitungsverfahren entwickelt – den sogenannten Urban Footprint Processor (UFP; Esch, Marconcini u. a. 2013) –, das es ermöglicht, bebautes Gebiet durch Nutzung des globalen TDX-Datensatzes darzustellen, und das so die Erstellung des GUF möglich gemacht hat (Felbier u. a. 2014). Der UFP extrahiert zunächst für jedes Bild eine Texturinformation (speckle divergence; Esch, Schenk u. a. 2011), die für urbane Gebiete unter anderem aufgrund der heterogenen Radarrückstreuung an vertikalen Strukturen (z. B. Gebäude) charakteristisch ist. Diese und weitere Informationen werden danach in einem vollautomatischen Klassifikationsverfahren genutzt, um für jede Szene eine binäre Siedlungsmaske zu erzeugen, welche im letzten Schritt nachbearbeitet und zusammengesetzt (mosaikiert) werden (Esch, Marconcini u. a. 2013).

Im Jahr 2011 wurde dieser Prozessor erfolgreich implementiert und im Juni 2014 konnte

ein globaler Urban Footprint aus 180.000 TDX-Szenen abgeleitet werden. Der GUF liegt in einer HR- (etwa 12 Meter räumliche Auflösung) und einer MR-Version (etwa 75 Meter räumliche Auflösung) vor (Felbier u. a. 2014), welche der Öffentlichkeit für wissenschaftliche Zwecke zugänglich gemacht werden soll (Esch, Marconcini u. a. 2013). Im Vergleich zu Produkten aus dem MR-Bereich, deren Genauigkeit durch die grobe Auflösung limitiert ist, liefern der GUF und der GHSL eine detailliertere Abbildung von Siedlungsgebieten. Vor allem aber in dünn und mittelmäßig dicht besiedelten, sowie ländlichen und Stadtrandgebieten bringen die beiden neuen Datensätze einen Mehrwert, den bisherige globale Produkte nicht bieten konnten (Klotz, Kemper u. a. 2016). Abbildung 2.1 zeigt den Ausschnitt des GUF um Berlin und soll einen visuellen Eindruck des Produktes vermitteln.

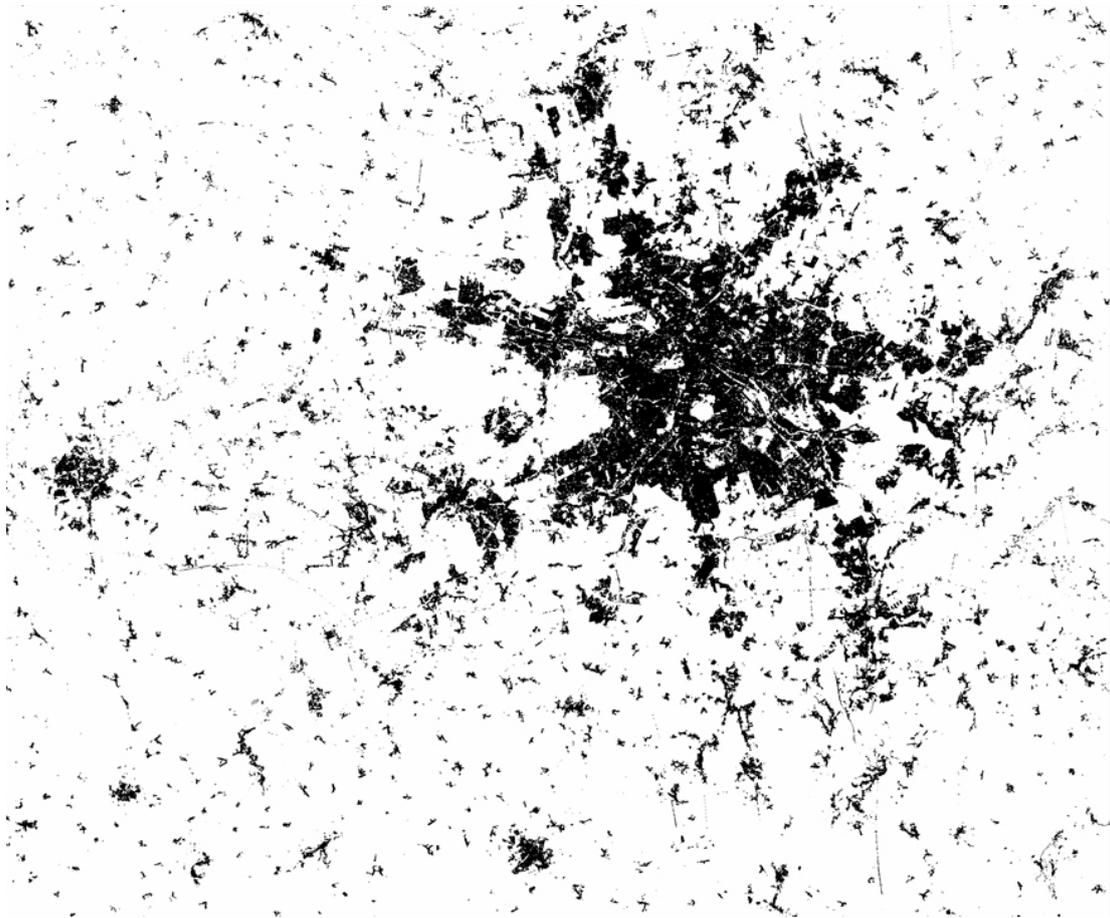


Abbildung 2.1: Berlin und Umgebung im GUF (Bildquelle: DLR 2014)

2.2 INSPIRE-Grid

Im ersten Schritt der Methodik dieser Studie wird der GUF-Datensatz (siehe Kapitel 2.1) in eine Besiedlungsdichtekarte umgerechnet. Die genaue Vorgehensweise ist in Kapitel 3.2 beschrieben. Dabei werden die Dichtewerte auf die Zellen eines nach den INSPIRE-Datenspezifikationen (**I**nfrastructure for **S**patial **I**nformation in the **E**uropean Community) erstellten geographischen Gitternetzsystems übertragen. Die INSPIRE-Richtlinie trat am 15. Mai 2007 in Kraft und soll bis zum Jahr 2019 stufenweise eine Infrastruktur

für raumbezogene Daten in der Europäischen Union (EU) schaffen und so den Datenaustausch zwischen Organisationen aus dem öffentlichen Sektor und den Zugang zu diesen Daten für EU-Bürger erleichtern (INSPIRE 2016). In der Datenspezifikation geographische Gitternetze in Annex I der INSPIRE-Richtlinie heißt es:

„Geographical grids are an agreed defined and harmonised grid net for Pan Europe with standardised location and size of grid cells. [...]” (INSPIRE 2014)

Es werden zwei Arten von geographischen Gitternetzen angeboten. Neben dem hier verwendeten *Equal Area Grid* spezifiziert INSPIRE 2014 auch ein *Zoned Geographic Grid*. Während Letzteres als Georeferenzierungsrahmen für Rasterdaten mit geodätischen Koordinaten dienen soll, ist das *Equal Area Grid* hauptsächlich für räumliche Analysen oder zur Darstellung von statistischen Informationen (z.B. aus dem Meldewesen) geeignet (INSPIRE 2014, S. 6), weshalb sich die Anwendung für diese Untersuchung anbietet. Es basiert auf dem ETRS89 Lambert Azimuthal Equal Area Koordinatenreferenzsystem (ETRS89-LAEA; INSPIRE 2014).

Das Gitternetz wird neben der Europäischen Umweltagentur (EEA) auch vom Europäischen Forum für Geographie und Statistik (EFGS) für alle 28 Mitgliedsstaaten (EU28), sowie für Länder der Europäischen Freihandelszone und EU-Beitrittskandidaten als separater Download im Shape-Format zur Verfügung gestellt (EEA 2013; EFGS 2016). Alternativ bietet das EFGS ein Add-On für die Geoinformationssoftware ArcGIS der Firma ESRI an, das ein INSPIRE-konformes Gitternetz für ein individuell wählbares Gebiet mit der gewünschten Rastergröße erstellt (EFGS 2016). Das Ergebnis kann als Shape-Datei (Polygon oder Linie) oder als Raster ausgegeben werden und enthält pro Rasterzelle eine eindeutige, individuelle Kodierung.

Die INSPIRE-Richtlinie gibt nicht ein einziges fest definiertes geographisches Gitternetz vor, sondern lediglich Vorschriften mit denen Gitternetze mit verschiedenen räumlichen Auflösungen (Zellengrößen) erstellt werden können. Für diese Untersuchung wurde eine Auflösung von einem Kilometer gewählt, was einer Zellengröße von einem Quadratmeter entspricht.

Anstatt hier eine der vielen möglichen Raumeinheiten zu verwenden, wurde eine standardisierte gewählt, da die Nutzung dieses vordefinierten Gitternetzes für raumbezogene, statistische Daten einen entscheidenden Vorteil bietet. Sie gewährleistet Vergleichbarkeit und Interoperabilität für Datensätze auf paneuropäischer Ebene (INSPIRE 2014). Daten zu verschiedenen Themen, die auf demselben Netz basieren, können dementsprechend räumlich miteinander verglichen, verschnitten und weiterverarbeitet werden. So können Informationen unterschiedlicher Themenbereiche verknüpft werden, was wiederum die Voraussetzung zur Analyse komplexerer Sachverhalte darstellt. Dies wird durch die einheitliche Kodierung ermöglicht, da jede Zelle im Gitternetz eindeutig identifiziert werden kann. Beispielsweise können die Daten zur Bebauung, die in dieser Studie verwendet werden, mit demographischen Informationen kombiniert werden. Das bedeutet, dass es zu jeder Zelle eine Information über die Bebauungsdichte und eine zur Bevölkerungsanzahl auf dieser Fläche gibt, was wiederum die Möglichkeit zu weiterführenden Analysen schafft.

2.3 Urban Morphological Zones

Um die Städte zu identifizieren, deren Netzwerk Hauptgegenstand dieser Studie ist, müssen Bereiche mit hoher Bebauungsdichte ermittelt werden. Dies geschieht, indem alle

Pixel extrahiert werden, die eine Bebauungsdichte über einem gewissen Schwellwert aufweisen (siehe Kapitel 3.3.1). Da jeder hier mögliche Schwellwert der Subjektivität ausgesetzt ist, wird zur Findung dieses Grenzwertes ein externer Datensatz der EEA genutzt. Dabei handelt es sich um sogenannte Large Urban Morphological Zones (LUMZ) – ein Subprodukt der Urban Morphological Zones (UMZ).

„An Urban Morphological Zone can be defined as »a set of urban areas laying less than 200m apart«. Those urban areas are defined from land cover classes contributing to the urban tissue and function.“ (EEA 2014, S. 6)

Diese kurze Definition der EEA dient zum leichten Verständnis der UMZ. Dabei handelt es sich um urban geprägte oder genutzte Flächen, die weniger als 200 m voneinander entfernt sind (EEA 2014, S. 6). Diese Flächen werden aus bestimmten Landbedeckungsklassen des CLC-Projekts abgeleitet (EEA 2014). CLC ist ein europaweiter, multitemporaler und aus Satellitendaten erfasster Datensatz zur Landnutzung und Bodenbedeckung (Büttner u. a. 2004; siehe auch Kapitel 2.1). Für die Erfassung der UMZ sind neben anderen, weniger relevanten Klassen folgende CORINE-Landnutzungsklassen (sog. core classes) relevant (EEA 2014, S. 6):

- 111 – Continuous urban fabric
- 112 – Discontinuous urban fabric
- 121 – Industrial or commercial units
- 141 – Green urban areas

Neben den UMZ liefert der Datensatz zusätzlich noch die LUMZ, welche ferner unter Einbeziehung von Bevölkerungsdaten ermittelt wurden und „über einen Bevölkerungsschwellwert von 50.000 Einwohnern definiert sind“ (EEA 2014, S. 17). Ein Areal, das nach der Klassifikation der EEA als LUMZ gilt, beheimatet also mindestens so viele Menschen. Um diese Information zu erhalten, werden die UMZ mit Bevölkerungsdaten verschnitten, die in einem Bevölkerungsraster (EFGS 2013) enthalten sind. Dabei handelt es sich um ein nach der INSPIRE-Richtlinie (siehe Kapitel 2.2) erstelltes geographisches Gitternetz, dessen Zellen die jeweilige Bevölkerungszahl auf diesem Gebiet enthalten (EEA 2014). Auf diese Weise kann die Höhe der Bevölkerung für jede UMZ ermittelt und im Folgenden der Grenzwert von 50.000 Einwohnern angewendet werden.

Mit den LUMZ liegt ein aus bewährten Datengrundlagen (CLC, Bevölkerungsraster) geschaffener Datensatz vor, der urban geprägte Gebiete mit einer zugleich bedeutend hohen Bevölkerung repräsentiert. Er kombiniert dicht aneinander liegende, für Stadtgebiete relevante Landnutzungsflächen des CLC – die UMZ – mit Bevölkerungsdaten, was eine legitime Grundlage zur Schwellwertfindung für diese Studie schafft (genaue Erläuterung in Kapitel 3.3.1). Da der Grenzwert zur Identifizierung von Stadtzentren, also Gebieten mit hoher Bebauungsdichte und vielen Bewohnern, dienen soll, wäre der UMZ-Datensatz, bei dem auch dünn besiedelte und kleinere Ortschaften in ländlichen Regionen und im peri-urbanen Raum inbegriffen sind, nicht geeignet. Aus diesem naheliegenden Grund werden an dieser Stelle der Untersuchung die LUMZ genutzt.

Die hier verwendeten Daten zur den UMZ 2000 wurden auf der Seite der EEA heruntergeladen (Download: EEA 2011). Der Datensatz dient zur Ermittlung eines Dichteschwellwerts zur Identifizierung urbane Knotenpunkte (siehe Kapitel 3.3.1).

2.4 Administrative Flächen in der Europäischen Union

Das statistische Amt der EU (Eurostat) hat vor über 30 Jahren den europäischen Wirtschaftsraum der EU-Mitgliedsstaaten in territoriale Untereinheiten unterteilt, um die Erstellung regionaler Statistiken zu ermöglichen und auf diese Weise die Regionalpolitik zu unterstützen. Die NUTS-Klassifikation (franz. *Nomenclature des unités territoriales statistiques*) gewährleistet Standards bei der Erhebung und Übermittlung regionaler Daten und stellt so Vergleichbarkeit her. Des Weiteren ermöglicht sie die Analyse und den Vergleich der sozioökonomischen Situation der Regionen und bietet so die Grundlage für gezielte politische Maßnahmen (Eurostat 2015). Es gelten folgende Prinzipien:

- (1) NUTS beinhaltet drei hierarchische Ebenen
- (2) NUTS berücksichtigt bereits vorhandene administrative Einheiten der Mitgliedsstaaten
- (3) NUTS schreibt minimale und maximale Begrenzungen für die Bevölkerungszahl der Regionen vor
- (4) NUTS wird auf lokaler Ebene von local administrative units (LAU) ergänzt

Zu (1):

Jeder Mitgliedsstaat wird zunächst in sogenannte NUTS-1-Regionen aufgeteilt, welche wiederum in NUTS2-Regionen gegliedert werden. Die dritte hierarchische Ebene wird über die NUTS-3-Regionen definiert. Jede dieser Regionen hat einen speziellen Code und einen Namen. Abbildung 2.2 veranschaulicht diese Dreigliederung am Beispiel der NUTS-Regionen in Deutschland.

Zu (2):

Der Hauptgrund für die Verwendung bereits vorhandener administrativer Einheiten, ist die Tatsache, dass in den meisten Fällen schon Daten für diese Regionen vorliegen, was wiederum die Datenerhebung für NUTS-Regionen erleichtert. In Deutschland entspricht die NUTS-Hierarchie der der Bundesländer (NUTS-1), der Regierungsbezirke (NUTS-2) und der Kreise und Kreisfreien Städten (NUTS-3).

Zu (3):

Die durchschnittliche Bevölkerungszahl auf der jeweiligen Ebene soll den in Tabelle 2.1 dargestellten Grenzwerten entsprechen.

Zu (4):

Die Erläuterung der LAU-Regionen folgt in Kapitel 2.4.2.

2.4.1 Urban-rural typology der NUTS-3 Regionen

Die EU hat mit der sogenannten urban-rural typology (URT) eine dreistufige Klassifikation der NUTS-3 Regionen eingeführt, um eine konsistente Grundlage zur Beschreibung dieser Regionen für jegliche Kommunikation, Berichte und Veröffentlichungen der Europäischen Kommission zu schaffen (Eurostat 2016d). Sie stellt eine Variation einer ähnlichen Klassifizierungsmethode der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD; Brezzi u. a. 2011) dar (Eurostat 2016d), bei der die Einteilung

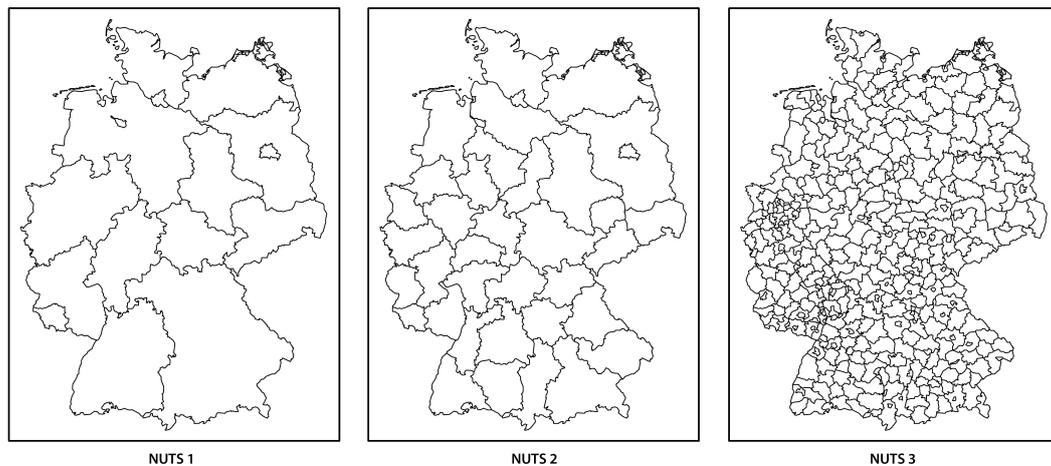


Abbildung 2.2: Regionen in Deutschland – NUTS Level 1 bis 3

Tabelle 2.1: Grenzwerte für die durchschnittliche Bevölkerungszahl auf den verschiedenen NUTS-Ebenen (Quelle: Eurostat 2015)

Level	Minimum	Maximum
NUTS 1	3 million	7 million
NUTS 2	800 000	3 million
NUTS 3	150 000	800 000

über den Anteil der ländlichen Bevölkerung in der jeweiligen Region erfolgt. Diese Information wird aus dem GEOSTAT 1 km² Bevölkerungsraster (GEOSTAT 2011) gewonnen. Die genaue Klassifizierungsmethode ist in Eurostat 2012 beschrieben. Am Ende wird jede NUTS-3 Region einer der folgenden Klassen zugeordnet (Eurostat 2012, S. 198):

- **vorwiegend urban / urban**
Anteil der ländlichen Bevölkerung ist geringer als 20% der Gesamtbevölkerung
- **Zwischenregionen**
Anteil der ländlichen Bevölkerung ist zwischen 20% und 50% der Gesamtbevölkerung
- **vorwiegend ländlich / ländlich**
Anteil der ländlichen Bevölkerung macht mehr als 50% der Gesamtbevölkerung aus

Allerdings müssen unter Beachtung der Relevanz einzelner Städte in den Regionen nachfolgende Regeln beachtet werden:

- Eine nach den oben genannten Kriterien als *vorwiegend ländlich / ländlich* klassifizierte Region wird zur *Zwischenregion*, falls sich dort eine Stadt mit über 200.000 Einwohnern befindet, die zugleich mindestens 25% der regionalen Bevölkerung repräsentiert.

- Eine nach den oben genannten Kriterien als *Zwischenregion* klassifizierte Region wird zur *vorwiegend urbanen / urbanen* Region, falls sich dort eine Stadt mit über 500.000 Einwohnern befindet, die zugleich mindestens 25% der regionalen Bevölkerung repräsentiert.

Die URT fließt bei der Klassifikation des Grades der Konnektivität zwischen urbanen Knotenpunkten (MoC; genaue Erläuterung siehe Kapitel 3.4.2.2) und außerdem bei der Plausibilisierung der Ergebnisse in Kapitel 5.1 ein.

2.4.2 LAU-2 Regionen

Um eine feinere territoriale Gliederung auch unter dem NUTS-3 Level zu erhalten und so den Bedarf an lokalen Statistiken zu decken, wurde von Eurostat ein System lokaler Verwaltungseinheiten (local administrative units – LAU) eingeführt. Diese erweitern die NUTS-Klassifikation um zwei zusätzliche Ebenen. Die zugehörigen Statistiken können auf der Homepage von Eurostat (Eurostat 2016b) heruntergeladen werden, wobei beachtet werden muss, dass die untere Ebene (LAU-2) für alle Mitgliedsstaaten, jedoch LAU-1 nur für einen Großteil definiert ist und bei vereinzelt Ländern nicht alle Informationen vorhanden sind. Die Daten beinhalten Fläche, Bevölkerungszahl und eine Information zum Grad der Urbanisierung (degree of urbanization – DEGURBA), die mit der URT (siehe Kapitel 2.4.1) vergleichbar ist (Dijkstra und Poelmann 2014; Eurostat 2016b).

Die LAU werden in Kapitel 3.3.2 zur Ermittlung eines Flächenschwellwertes in die Untersuchung miteinbezogen.

2.5 Untersuchungsgebiet

Die Urbanisierung lässt sich kaum mit regionalmaßstäblichen Modellen thematisieren, sondern ist vielmehr ein globales Phänomen, welches auch als solches analytisch behandelt werden muss (Brenner und Schmid 2014). Diese Arbeit ist zwar keine Analyse, die in ihrem geographischen Ausmaß die ganze Welt umfasst, trotzdem beläuft sich das Untersuchungsgebiet auf einen Maßstab, der der Untersuchung eines global stattfindenden Prozesses gerecht wird.

Der Ausschnitt des GUF, der vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für diese Studie zur Verfügung gestellt wurde, stellt die Basisdaten für die Untersuchung dar und gibt somit zugleich die Ausdehnung des Untersuchungsgebiets vor. Wie in Abbildung 2.3 zu erkennen, schließt der Ausschnitt – mit Ausnahme von Zypern – das administrative Europa mit ein, welches über die Grenzen der EU definiert ist, geht zudem weit darüber hinaus und repräsentiert Europa als Kontinent. Neben offensichtlichen Abgrenzungen durch den Atlantik, das Mittel- und das Europäische Nordmeer grenzt sich das Untersuchungsgebiet bei der Meerenge von Gibraltar sowie den Dardanellen und dem Bosphorus von Afrika und Asien ab. Nach Osten hin erstreckt sich der Ausschnitt bis zum Uralgebirge, das in Nord-Süd-Richtung durch den mittleren Westen Russlands verläuft. Im Süden dieses Landes zwischen dem Schwarzen und dem Kaspischen Meer endet der Ausschnitt beim Kaukasus, der eine natürliche Grenze zu Georgien und Aserbaidschan bildet.

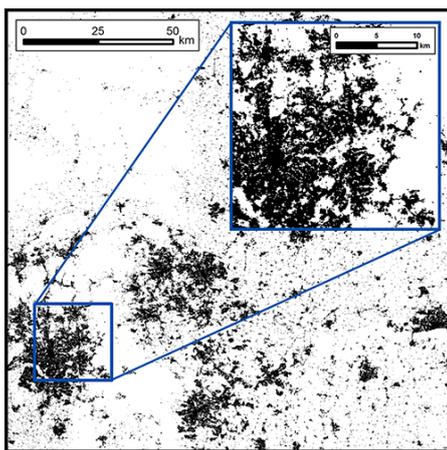


Abbildung 2.3: Das Untersuchungsgebiet sowie die Länder der EU

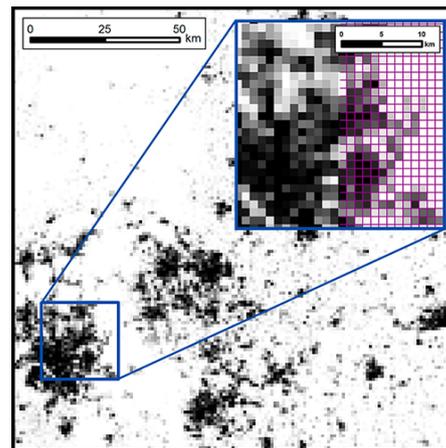
3 Methodik

3.1 Überblick über den Workflow

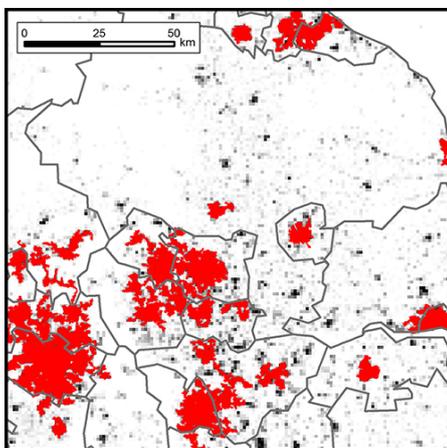
Im Rahmen dieser Arbeit werden im Untersuchungsgebiet (siehe Kapitel 2.5) urbane Knotenpunkte lokalisiert und auf ihre räumliche Konnektivität (Konvergenz ihrer Siedlungsmuster) untereinander vergleichend analysiert. Des Weiteren werden über die gewonnenen Informationen Regionen ausgewiesen, die sich durch eine starke räumliche Verbundenheit ihrer urbanen Knotenpunkte und eine hohe Besiedelungsdichte auszeichnen. Die alleinige Datenbasis der Methode ist der GUF. Um einen Überblick über die Methodik zu gewähren, werden im Folgenden die wesentlichen Schritte des Workflows anhand einer Abbildung illustriert und mit Verweisen zu den jeweils relevanten Stellen in der Arbeit ergänzt (siehe Abbildung 3.1).



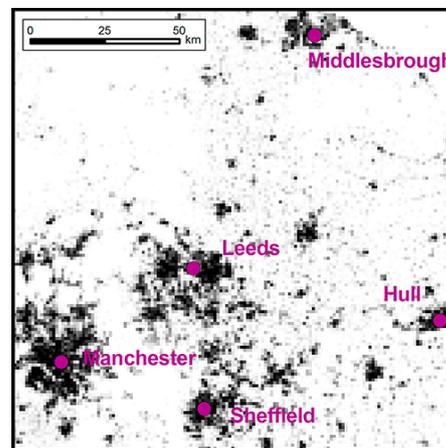
(a) GUF als Ausgangsdatensatz (Kap. 2.1)



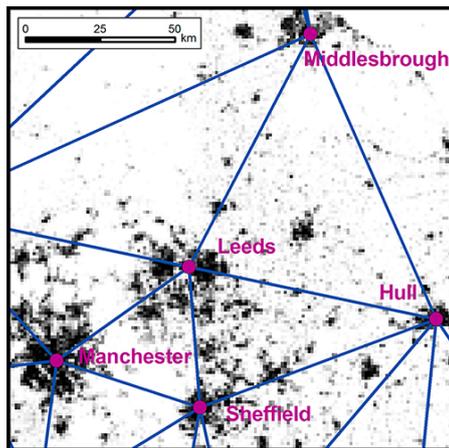
(b) Ableitung der Besiedelungsdichte aus dem GUF (INSPIRE-Grid) (Kap. 3.2)



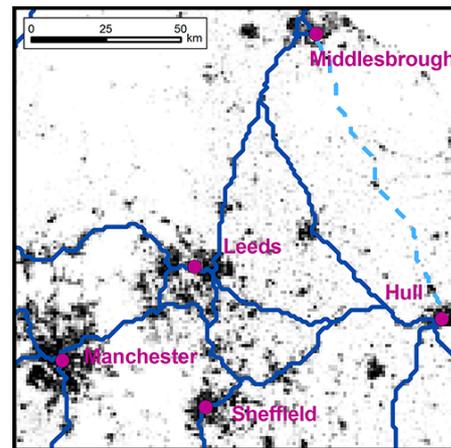
(c) Unterstützende Einbindung externer Geodaten (Kap. 2.2, 2.3 & 2.4)



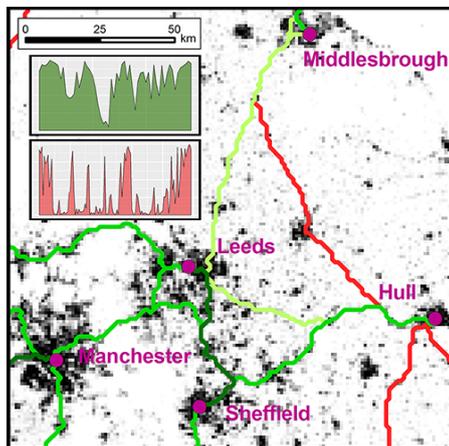
(d) Identifikation urbaner Knotenpunkte (Kap. 3.3)



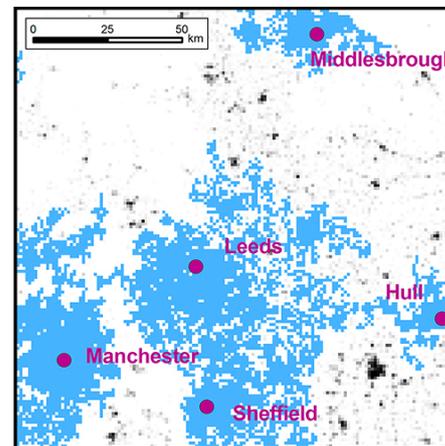
(e) Triangulation eines Netzwerks zwischen urbanen Knotenpunkten (Kap. 3.4.1.1)



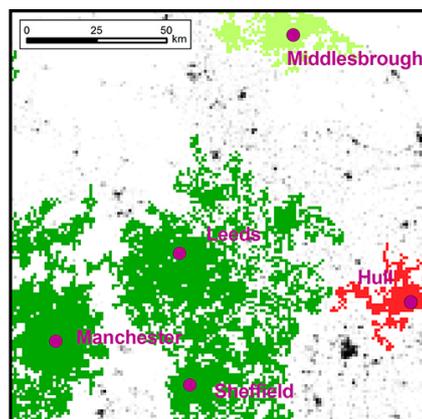
(f) Berechnung der Verknüpfungen (Grad der räumlichen Konnektivität) (Kap. 3.4.2.1)



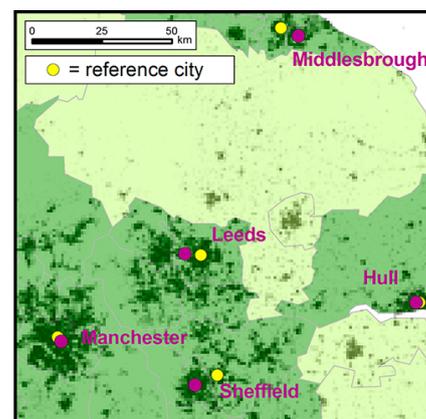
(g) Klassifikation der Verknüpfungen (Kap. 3.4.2.2)



(h) Ausweisung von Stadtregionen mittels Region Growing (Kap. 3.5.1)



(i) Kategorisierung der Stadtregionen (Kap. 3.5.2)



(j) Plausibilisierung der Ergebnisse (Kap. 5)

Abbildung 3.1: Übersicht über die wesentlichen Schritte des Workflows mit Verweisen auf korrespondierende Stellen in der Arbeit

3.2 Berechnung der Besiedelungsdichte

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Methode angewendet, die auf Pfaden geringster Kosten basiert (siehe Kapitel 3.4.2.1) und bereits in der Vergangenheit mehrfach bei urbanen Konnektivitätsanalysen Verwendung gefunden hat (z.B. Taubenböck, Wiesner u. a. 2014 oder Taubenböck und Wiesner 2015). Hierfür wird eine sogenannte Kostenoberfläche benötigt auf deren Grundlage der Verlauf der Pfade berechnet wird (siehe Kapitel 3.4.1.2). Dabei handelt es sich in diesem Fall um ein Rasterbild mit Werten zur Besiedelungsdichte. Weil die Klassifikation des GUF lediglich binäre, räumliche Information hinsichtlich der Siedlungsverteilung liefert, kann der Aspekt der Konnektivität höchstens visuell und somit ungenau und subjektiv analysiert werden. Um jedoch eine objektive Untersuchung durchführen und die Verbundenheit von Städten quantifizieren zu können, ist die Berechnung der Besiedelungsdichte notwendig (Taubenböck und Wiesner 2015).

Für die Erstellung der Dichtekarte wird der GUF mit einem INSPIRE-konformen geographischen Gitternetz (siehe Kapitel 2.2) verschnitten. Pro Zelle des Gitternetzes wird im Folgenden der Flächenanteil der Klasse *Siedlung* errechnet und als Dichtewert für die jeweilige Zelle gespeichert (siehe Abbildung 3.2). Die so errechnete Dichtekarte stellt die Basis aller weiteren Arbeitsschritte dar. Abbildung 3.3 zeigt die Besiedelungsdichtekarte sowie das zugehörige Histogramm, das die Verteilung der Dichtewerte im gesamten Untersuchungsgebiet visualisiert.

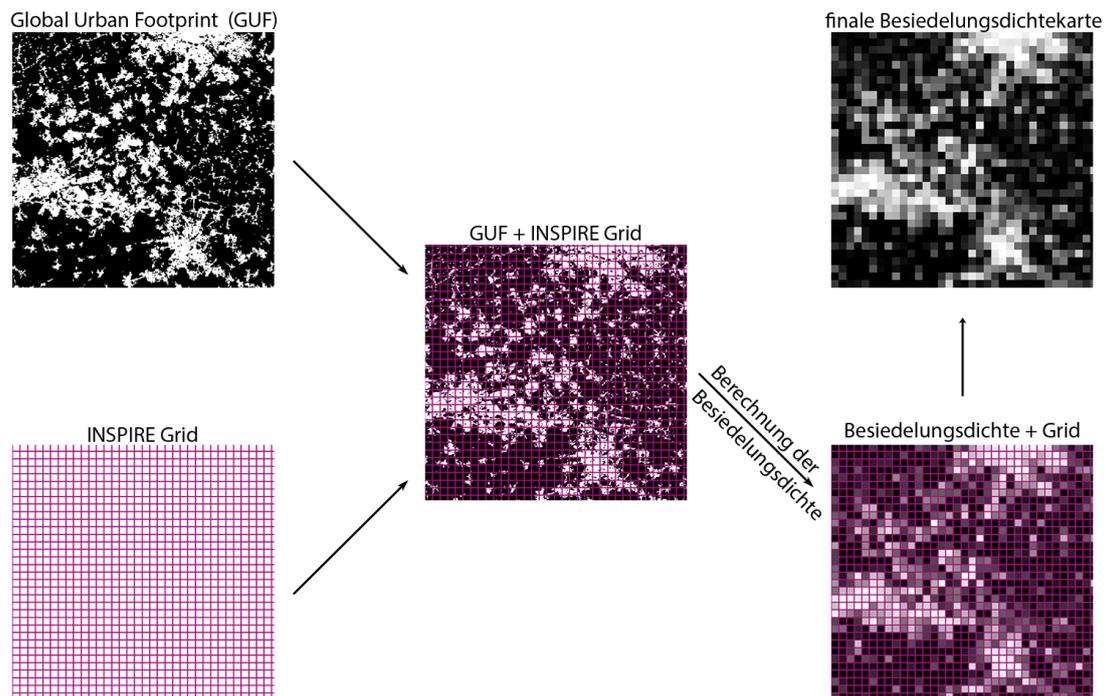


Abbildung 3.2: Erstellung der Besiedelungsdichtekarte auf Basis des 1x1 km INSPIRE-Grids

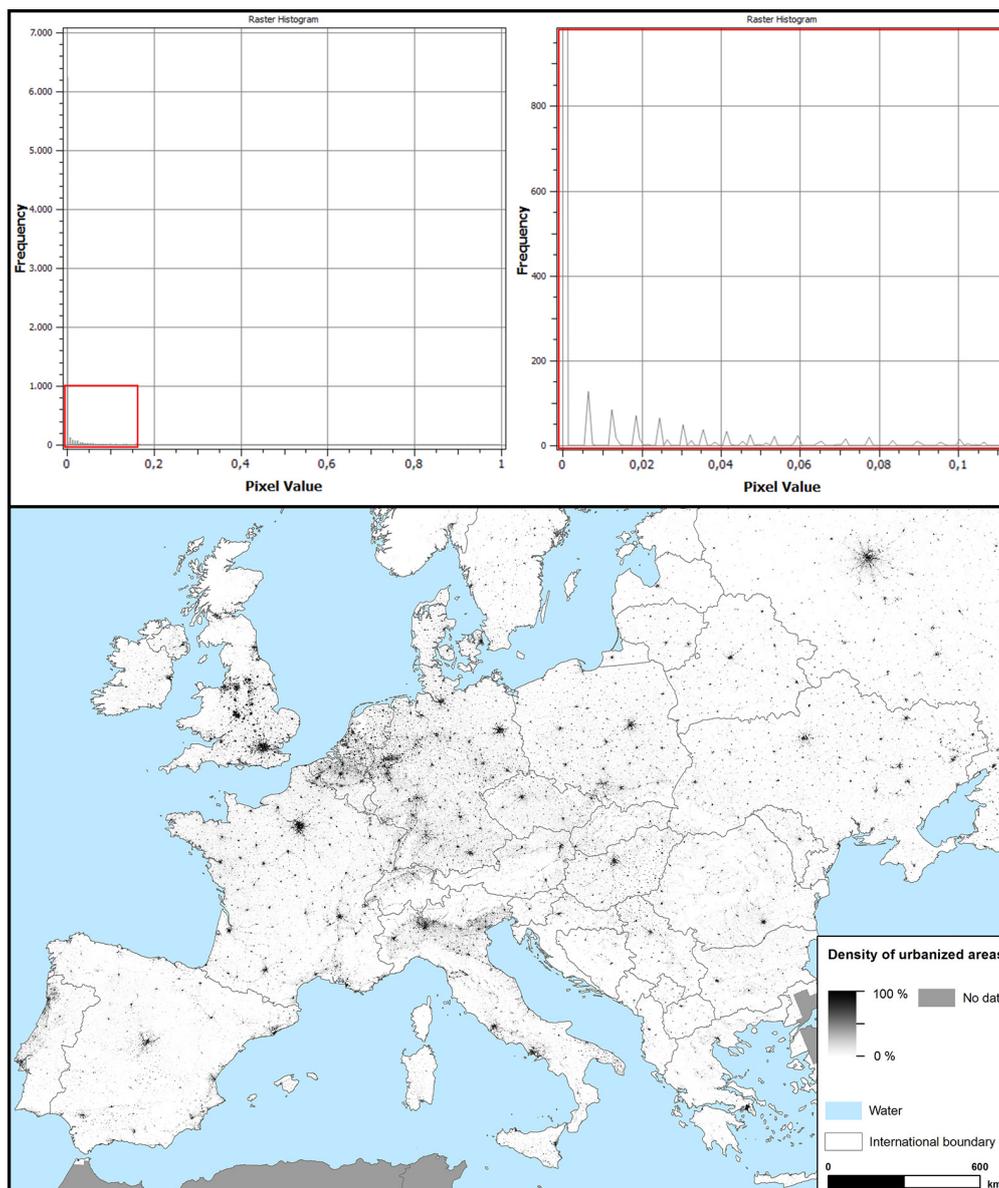


Abbildung 3.3: Die Besiedlungsdichtekarte und das zugehörige Histogramm

3.3 Identifikation urbaner Knotenpunkte

Um den interurbanen Raum zwischen zwei Städten beziehungsweise urbanen Knotenpunkten analysieren und so eine quantitative Aussage über deren räumliche Verbundenheit treffen zu können, müssen diese vorher eindeutig definiert werden. Neben Ansätzen, die wirtschaftliche Kriterien oder die Konzentration bestimmter Aktivitäten nutzen (Cheng u. a. 2013; Dijkstra und Poelmann 2014), kann die Auswahl der Städte, die als Knotenpunkte des Kostenpfadnetzwerkes dienen, auch manuell (Taubenböck, Wiesner u. a. 2014) oder nach demographischen Kriterien (Taubenböck und Wiesner 2015) erfolgen. Bei letztgenannter Studie wurden nur Städte mit mehr als 100.000 Einwohnern als urbane Knotenpunkte berücksichtigt. Um räumliche Lücken im Netzwerk zu füllen, wurden vereinzelt auch Städte mit kleinerer Einwohnerzahl herangezogen. Während sich die Methodik dieser Bachelorarbeit in weiten Teilen mit derjenigen von Taubenböck und

Wiesner 2015 und Taubenböck, Wiesner u. a. 2014 deckt, ist in diesem Punkt (Auswahl/Identifikation der urbanen Knotenpunkte) der wohl signifikanteste Unterschied zu sehen. Dieser besteht darin, dass zur Bestimmung der urbanen Knotenpunkte keine externen Daten (z.B. Bevölkerungsdaten) herangezogen werden. Stattdessen werden diese über ein Filterverfahren aus den Daten zur Besiedelungsdichte bestimmt. Dadurch können Gebiete auf der Dichtekarte zu lokalisiert werden, die eine vergleichsweise große Fläche und zugleich eine durchgehend hohe Besiedelungsdichte aufweisen. Dafür werden aus der Dichtekarte zunächst alle Pixel mit einer Dichte über 61,3% (siehe Kapitel 3.3.1) herausgefiltert. Das Resultat sind einzelne Pixel oder Pixelgruppen – sogenannte Patches. Um den Patches eine eindeutige Position (X- und Y- Koordinate) zuzuordnen zu können und solche auszuschließen, die nur aus einzelnen oder wenigen Pixeln bestehen, wird für all jene, die eine Fläche von mindestens 30 km² (siehe Kapitel 3.3.2) aufweisen, der geometrische Schwerpunkt als eindeutige Positionsinformation berechnet. Der GUF erlaubt also eine von anderen Daten ungebundene, rein physische Herangehensweise zur Identifizierung urbaner Knotenpunkte.

Vereinzelt müssen Punkte manuell entfernt werden, da bei dem Filterverfahren in einigen wenigen Fällen Städte mehrfach identifiziert werden. Wenn beispielsweise eine Stadt von einem breiten Fluss durchzogen ist, entstehen möglicherweise zwei (durch den Fluss) räumlich getrennte Patches, die letztendlich in zwei Punkten resultieren. In einem solchen Fall beide Punkte, die im Endeffekt ein und dieselbe Stadt repräsentieren, in ein paneuropäisches Netzwerk aus urbanen Knotenpunkten aufzunehmen, wäre unlogisch und nicht sachdienlich. Abbildung 3.4 veranschaulicht diesen Fall am Beispiel der russischen Stadt Kasan. Auf dem rechten Bild ist zu erkennen, dass die Stadt durch die Bucht der Wolga räumlich in zwei große Teile getrennt ist. Diese Zweiteilung spiegelt sich auch auf der Besiedelungsdichtekarte (linkes Bild) wieder. Die rot umrandete Fläche zeigt das Ergebnis des oben erklärten Filterverfahrens, das in diesem Fall für eine einzelne Stadt in zwei räumlich eigenständigen Patches und somit zwei urbanen Knotenpunkten resultiert, von denen einer manuell entfernt wird.

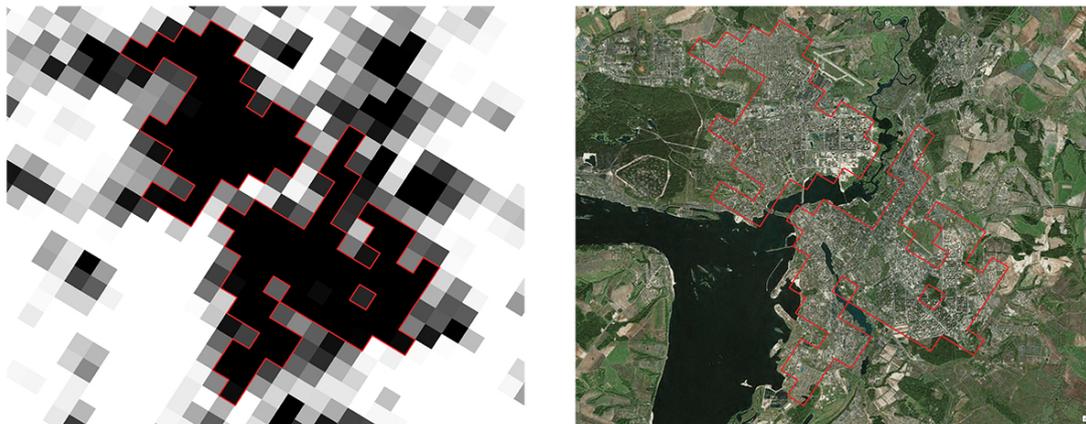


Abbildung 3.4: Die russische Stadt Kasan auf der Besiedelungsdichtekarte (links) und im Satellitenbild (rechts)

3.3.1 Bestimmung der Mindestdichte

Welche Besiedelungsdichte sollte ein Pixel mindestens aufweisen, um zur Identifizierung von urbanen Knotenpunkten herangezogen zu werden? Da diese Frage nicht objektiv

beantwortet werden kann, wird mit Hilfe eines externen Datensatzes ein Schwellwert bestimmt, um keine subjektive Entscheidung fällen zu müssen, sondern vielmehr eine plausible sach-logische Analyse zu gewährleisten. Mit den LUMZ (siehe Kapitel 2.3) liegt ein solcher vor, der ausschließlich stärker urban geprägte Gebiete umfasst. Außerdem enthalten die LUMZ nur Gebiete, die eine Einwohnerzahl von mindestens 50.000 Bewohnern aufweisen. Diese Eigenschaften legitimieren die Verwendung dieses Datensatz zur Bestimmung urbaner Knotenpunkte. Der eigentliche Grenzwert wird ermittelt, indem die LUMZ mit der Besiedlungsdichtekarte verschnitten werden. Die mittlere Dichte aller Pixel, die innerhalb dieser urbanen Flächen lokalisiert sind, bildet den Dichteschwellwert (61,3%).

3.3.2 Bestimmung der Mindestfläche

Die Anwendung des Dichteschwellwerts (siehe Kapitel 3.3.1) resultiert in Pixelagglomerationen (Patches) verschiedenster Größen. Unter der Annahme, dass im paneuropäischen Kontext überregionale, in der Regel flächenmäßig relativ große Städte relevante Knotenpunkte darstellen, wird ein zweiter Grenzwert eingeführt. Eine Mindestfläche als Kriterium für die minimale räumliche Ausdehnung dient dazu, Patches herauszufiltern, welche sehr kleine Ortschaften und kleinere bebaute Flächen repräsentieren. Wie groß muss ein Patch mindestens sein, um als urbaner Knotenpunkt zu gelten? Wie groß muss eine Stadt mindestens sein, um als sinnvoller Knotenpunkt in einem überregionalen Netzwerk zu gelten? Diese Fragen sind kaum ohne Einfluss von Subjektivität zu beantworten. Um dennoch einen konkreten und vor allem legitimen Wert zu erhalten, wurden auf eine Vorgängerstudie zurückgegriffen. Taubenböck und Wiesner 2015 haben zur Untersuchung der *Amsterdam–Rotterdam, Ruhr–Cologne, Brussels–Antwerp and Lille* Megaregion die bevölkerungsreichsten Städte dieser Region als urbane Knotenpunkte gewählt. Es wird die Fläche des administrativ kleinsten aller Knotenpunkte dieser Megaregion betrachtet. Gemessen an der Größe der korrespondierenden LAU-2 Region ist dies Brüssel mit 32 km². Dieser Wert wird auf 30 km² als finaler Schwellwert gerundet.

3.4 Räumliche Verknüpfung der urbanen Knotenpunkte

Dieses Kapitel widmet sich der quantitativen Messung und Bewertung der Konnektivität der Siedlungsmuster zwischen den zuvor identifizierten urbanen Knotenpunkten. Dafür wird zunächst die Methode zur Verknüpfung dieser Punkte vorgestellt. Dabei handelt es sich um die Methode des Pfades geringster Kosten (engl. *least cost path* LCP; dt. Pfad geringster Kosten oder Kostenpfad) mit deren Hilfe jeweils zwei Punkte mit einem Kostenpfad verbunden werden (siehe Kapitel 3.4.2.1). Die Verknüpfung basiert auf der Besiedlungsdichte im interurbanen Raum zwischen diesen Punkten. Es folgt die Bewertung der Konnektivität je zweier Punkte anhand des Verlaufs des Kostenpfades (siehe Kapitel 3.4.2.2). Danach werden die Verknüpfungen zusätzlich untereinander klassifiziert, um eine vergleichende Analyse zu ermöglichen.

3.4.1 Vorbereitende Prozessierung der Daten

3.4.1.1 Triangulation des Netzwerks

Bevor die Konnektivität zwischen den urbanen Knotenpunkten berechnet werden kann, muss zunächst festgelegt werden welche Verbindungen überhaupt untersucht werden sollen. Dazu werden alle in Kapitel 3.3 identifizierten Knotenpunkte in einem topologischen

Netzwerk verbunden. Dabei sollen die Verbindungen möglichst gleichmäßig platziert werden, wobei es gilt, überflüssige Verknüpfungen zu vermeiden. Um bei diesem Schritt Willkür zu vermeiden und möglichst ökonomisch vorgehen zu können, wird das Netzwerk in einem automatischen Prozess erzeugt. Dies geschieht über die Triangulation eines irregulären Netzwerks mit dem ArcGIS Tool Create TIN (triangulated irregular network; TIN), das auf dem Delaunay-Algorithmus basiert. Dadurch erfüllt die Dreiecksvermaschung die Kriterien für ein Delaunay-Dreieck. Ist dies für das gesamte TIN der Fall, wird der kleinste Innenwinkel aller Dreiecke maximiert, wodurch lange, schmale Dreiecke möglichst vermieden werden (ESRI 2016d).

Das Werkzeug wird im GIS-Bereich normalerweise zur digitalen Darstellung von Oberflächenmorphologie genutzt und wird hier zweckentfremdet verwendet. Der Algorithmus lässt durch seine Eigenschaften diese anderweitige Nutzung zu und liefert ein sehr gutes Ergebnis (siehe Abbildung 3.5). Nach der Triangulation werden im Randbereich des Untersuchungsgebiets vereinzelt Verknüpfungslinien, die keine sinnvolle Verbindung ergeben (z.B. Verlauf über Wasser), manuell entfernt. Diese sind in oben genannter Abbildung rot eingefärbt.

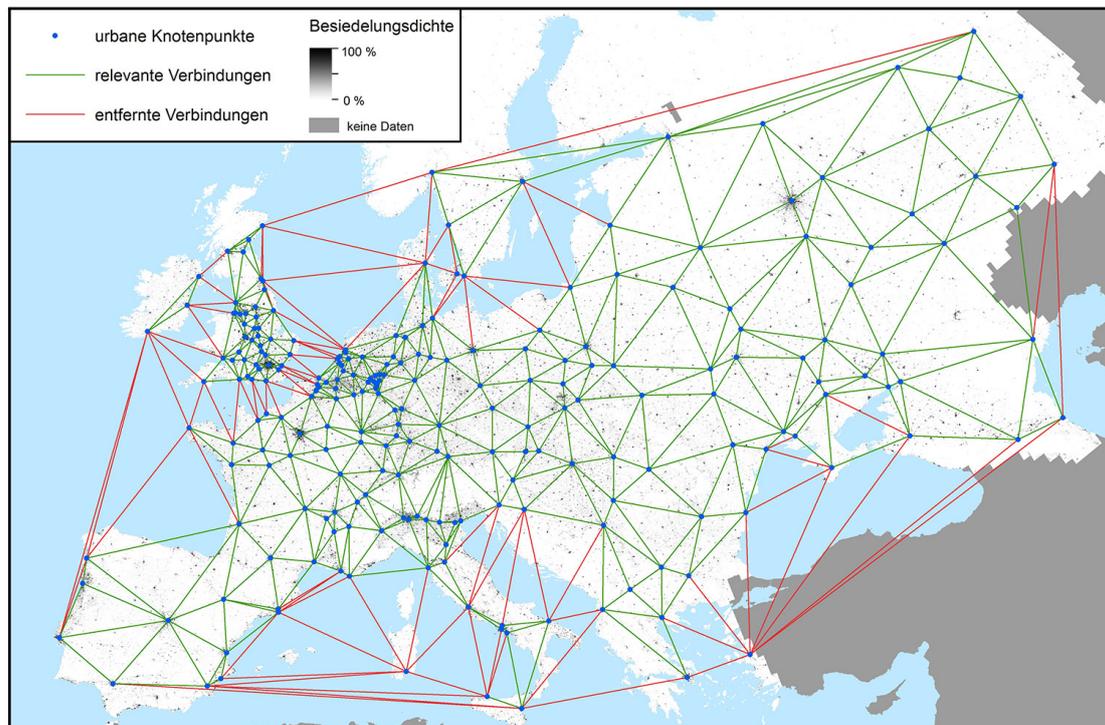


Abbildung 3.5: Das topologische Netzwerk mit urbanen Knotenpunkten

3.4.1.2 Erstellung der Kostenoberfläche

Die Kostenoberfläche ist ein grundlegender Inputparameter bei der Kostenpfadmethode. Im Grunde handelt es sich dabei um ein Rasterbild, dessen Pixelwerte die Höhe der Kosten repräsentieren, die beim durchqueren dieses Pixels anfallen. Die Werte bestimmen zusammen mit den jeweiligen Start- und Endpunkten den Verlauf der *least cost paths* (LCPs), die den Weg der geringsten Kosten zwischen diesen Punkten darstellen (siehe Kapitel 3.4.2.1).

Um die Kosten für die LCPs auf dicht besiedeltem Gebiet gering und auf dünn besiedel-

tem Gebiet hoch zu halten werden die Werte der Besiedlungsdichtekarte (siehe Kapitel 3.2) invertiert. Die Werte der Rasterzellen auf der Kostenoberfläche – die eigentlichen Kosten – entsprechen nun der Differenz zwischen dem jeweiligen Dichtewert und 100. Anschließend wird der Maximalwert (höchstmögliche Kosten) von 1 auf 2 verdoppelt, um den Weg durch wenig und ganz unbesiedeltes Gebiet für die LCPs möglichst „unattraktiv“ zu machen und so eine Verbindung über Siedlungen „attraktiv“ zu gestalten. Dies dient dazu die plausible, sachliche Logik der Analyse aufrecht zu erhalten. Wie sich diese Veränderung auf den Verlauf eines Kostenpfades auswirken kann, ist in Abbildung 3.1f zu erkennen.

3.4.2 Verknüpfung der urbanen Knotenpunkte durch Kostenpfade

3.4.2.1 Berechnung der Kostenpfade

In diesem Schritt wird für jede der vorher festgelegten Verbindungen (siehe Kapitel 3.4.1.1) der LCP berechnet. Der LCP repräsentiert die günstigste Verbindung zweier Punkte auf einer Kostenoberfläche. Ein anschauliches Beispiel für die Anwendung eines LCP ist die Berechnung des Verlaufs einer Straße zwischen zwei Punkten, wobei diese möglichst keine starken Neigungen aufweisen soll. Dies könnte auf Basis einer Hangneigungskarte als Kostenoberfläche erfolgen, wobei der Verlauf der Straße durch Bereiche starker Neigung mit hohen Kosten verbunden und der Weg über flaches Terrain kostengünstig ist. Berechnet man nun den LCP, wird sichergestellt, dass die Verbindung zwischen den beiden Punkten möglichst kurz ist und zugleich die kleinstmögliche Neigung aufweist. Der Zweck des Kostenpfades in diesem Beispiel ist es also einen Kompromiss aus Länge und Neigung der Straße zu ermitteln.

In dieser Untersuchung, in der es um die räumliche Verbundenheit zweier Punkte geht, fungiert die invertierte Besiedlungsdichtekarte (siehe Kapitel 3.2) als Kostenoberfläche. Ein Kostenpfad verläuft also bei möglichst kurzer Distanz vorzugsweise auf dicht besiedeltem Gebiet zwischen zwei vorgegebenen Punkten.

Umgesetzt wird die Kostenpfadmethode durch die Kombination verschiedener Software-Tools in einem sogenannten Model (siehe Abbildung 3.6). Zur Berechnung eines Kostenpfades wird dem Model die Position zweier urbaner Knotenpunkte als Start- und Endpunkt der zu berechnenden Verbindungslinie als Input übergeben. Auf Basis dieser Parameter und des Kostenrasters (Kostenoberfläche) werden im Folgenden ein *cost backlink raster* (Kostenrückverknüpfungsraster) und ein *cost distance raster* (Kostenentfernungsraster) erstellt. Letzteres enthält in jeder Zelle die kleinste akkumulative Kostenentfernung zum Startpunkt (ESRI 2016a), während das Kostenrückverknüpfungsraster in jeder Zelle einen Wert enthält, der auf die Nachbarzelle auf dem kleinsten akkumulativen Kostenpfad verweist (ESRI 2016c) und somit als Wegweiser für das *cost path* Tool (Kostenpfad) fungiert, das aus diesen beiden Rasterbildern den endgültigen Kostenpfad bestimmt (ESRI 2016b). Jeder Zelle des Kostenpfades, der im Rasterformat ausgegeben wird, wird danach der Wert der an dieser Stelle herrschenden Dichte zugewiesen, damit der Verlauf der Besiedlungsdichte entlang des Pfades nachvollzogen werden kann. Es folgt eine Konvertierung in ein Punktshapfile, welches sich aufgrund der integrierten Attributtabelle, in der die Dichtewerte nun gespeichert sind, besser zur Weiterverarbeitung und für statistische Analysen eignet als eine Rasterdatei.

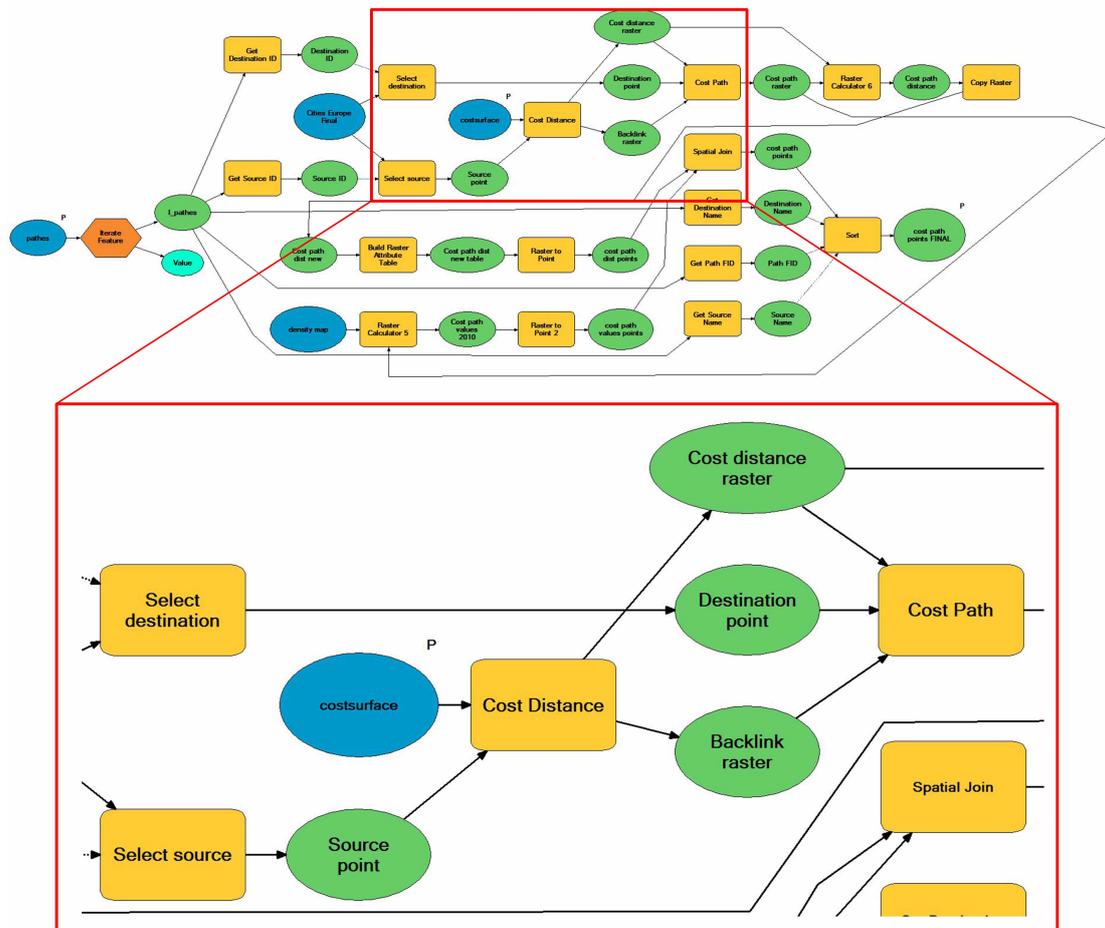


Abbildung 3.6: Das Model zur Berechnung der LCPs

3.4.2.2 Klassifikation der Verknüpfungen anhand der räumlichen Konnektivität

Nachdem die Kostenpfade vorliegen wird jeder einzelne davon hinsichtlich der räumlichen Verbundenheit, die zwischen Start- und Endpunkt herrscht, klassifiziert. Die angewendete Klassifizierungsmethode wurde von Taubenböck und Wiesner 2015 eingeführt und basiert auf dem Grad der räumlichen Konnektivität (Magnitude of spatial Connectivity; MoC). Dabei handelt es sich um einen Index, der aus zwei statistischen Indikatoren berechnet wird: der mittleren Besiedelungsdichte und dem Anteil der Pixel, die einen Dichtewert über 10% aufweisen. Während der erste Parameter eine Aussage über den Verbindungsgrad zulässt, zeigt der zweite an, wie kontinuierlich die Verbindung ist.

Damit diese Aussagen in eine quantitative Form gebracht werden können, wird angenommen, dass der Grad der räumlichen Verbindung mit zunehmender mittlerer Besiedelungsdichte ebenfalls ansteigt. Es wird weiter angenommen, dass sich der Grad der räumlichen Verbindung mit einem steigenden Anteil der Pixel über 10% Besiedelungsdichte ebenso erhöht. Um einen konkreten Wert für den MoC-Index zu erhalten, werden beide Parameter multipliziert. Unten stehende Formel (1) beschreibt, wie dieser Index für einen Kostenpfad berechnet wird.

$$(1) \quad MoC = \frac{\sum_{k=1}^n d(k)}{n} \times \left(\frac{100}{n} \times p \right) \quad 0 \leq MoC \leq 100$$

Formel zur Berechnung des Grades der räumlichen Konnektivität (Taubenböck und Wiesner 2015)

Dabei ist d gleich dem Wert der Besiedlungsdichte eines Pixels, n gleich der Anzahl aller Pixel und p gleich der Anzahl aller Pixel mit einer Besiedlungsdichte größer als 10%, auf denen der Kostenpfad verläuft. Der Index hat einen Wertebereich zwischen 0 und 100, was eine relative Bewertung der räumlichen Verbundenheit zulässt. Sind beide Parameter hoch, ist die MoC ebenfalls groß und es wird angenommen, dass eine starke räumliche Verbundenheit gegeben ist. Allerdings kann damit noch nicht entschieden werden, ob zwei urbane Knotenpunkte durch ihre Siedlungsmuster *räumlich verbunden* oder *nicht räumlich verbunden* sind. Dazu wird ein Grenzwert eingeführt, der eine Mindesthöhe des MoC-Werts eines Kostenpfades voraussetzt, um als *räumlich verbunden* klassifiziert zu werden. Auch wenn durch die Verwendung eines solchen Schwellwerts die Gefahr der Subjektivität besteht, da kein „eindeutiger, natürlicher oder objektiver Grenzwert existiert, der definiert ob zwei Städte hinsichtlich der jeweils gemessenen Siedlungsverteilung und der Besiedlungsdichte dazwischen verbunden sind“ (Taubenböck und Wiesner 2015), ist es trotzdem notwendig, um diese grundsätzliche Aussage über die Kostenpfade treffen zu können. Die Stärke des Verfahrens liegt jedoch darin, dass konsistent gearbeitet wird und somit – auch, wenn Schwellwerte subjektiv bleiben – Vergleichbarkeit erreicht wird.

Der Wert wird unter Hinzunahme der URT der NUTS-3 Regionen (siehe Kapitel 2.4.1) ermittelt. Von diesem Datensatz werden ausschließlich die als *vorwiegend urban / urban* klassifizierten Regionen verwendet. Von diesen Regionen werden alle zusammenhängenden zu jeweils einer einzigen Region verschmolzen. Der eigentliche Schwellwert ist die kleinste MoC der Pfade, deren Start- und Endpunkt innerhalb derselben zusammenhängenden Region liegen. Zusammengefasst lässt sich nun sagen:

Zwei Zentren gelten als *räumlich verbunden*, wenn die MoC des Kostenpfades, welcher diese verbindet, mindestens so groß ist, wie die kleinste MoC aller Pfade, welche zwischen Zentren verlaufen, die auf demselben zusammenhängenden Gebiet von als *vorwiegend urban / urban* klassifizierten NUTS-3 Regionen liegen.

Der konkrete Wert für die Mindesthöhe der MoC beziffert sich auf 24,47. Von insgesamt 610 der insgesamt untersuchten Verbindungen erfüllen 275 dieses Kriterium und gelten somit durch ihre starke räumliche Verbindung als Teil eines physischen Netzwerks. Diese werden im Folgenden als *räumlich verbunden* bezeichnet. Alle anderen werden als *nicht räumlich verbunden* bezeichnet.

Da die MoC-Werte der verbundenen Pfade stark variieren, werden sie ein weiteres Mal untereinander klassifiziert. Dem Beispiel von Taubenböck und Wiesner 2015 folgend, findet auch hier die Jenks-Caspall Klassifikationsmethode Anwendung (auch *natural breaks* genannt). Diese iterative Clusterbildungsmethode ist dafür konzipiert, die beste Gruppierung von Werten zu bestimmen, indem die Standardabweichung jeder Klasse vom jeweiligen Klassenmittel minimiert und gleichzeitig die Abweichung jeder Klasse von den Mittelwerten der anderen Klassen maximiert wird. So soll eine maximale Varianz zwischen den Klassen geschaffen werden (Jenks und Caspall 1971). Die verbundenen Pfade

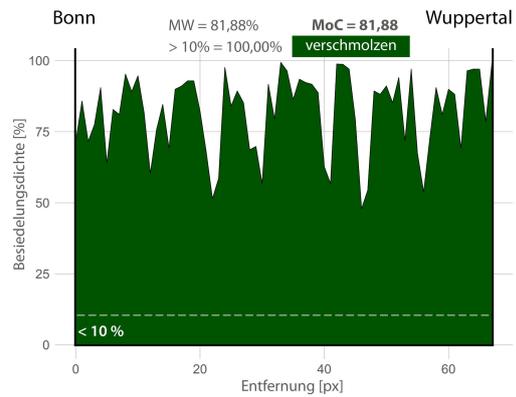
werden so in drei weitere Klassen (*verschmolzen, stark räumlich verbunden, gering räumlich verbunden*) unterteilt.

Zusätzlich werden alle *nicht räumlich verbundenen* Verknüpfungen in zwei Klassen (*sehr gering räumlich verbunden, nicht räumlich verbunden*). Dies geschieht ebenfalls unter Verwendung des Jenks-Caspall-Algorithmus und dient dazu, Verknüpfungen mit möglichem Potential zur Etablierung einer räumlichen Verbindung auszumachen.

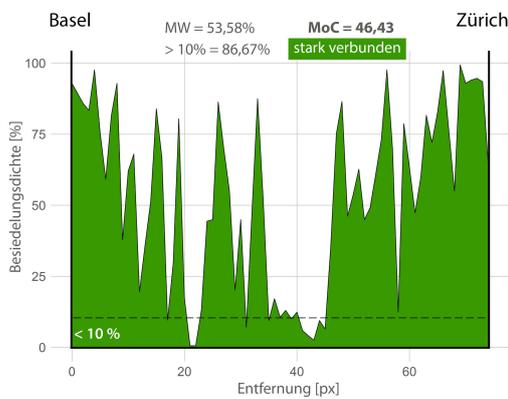
In Abbildung 3.7 wird für jede Klasse exemplarisch ein Kostenpfad und dessen zu Grunde liegende Besiedlungsdichtewerte visualisiert. Entlang der X-Achse ist die Distanz vom Startpunkt angegeben und an der Y-Achse der jeweilige Dichtewert. Des Weiteren sind die MoC, der Anteil von Pixeln unter 10% Dichte und die durchschnittliche Dichte angegeben um einen Eindruck zu vermitteln, wie sich diese Werte auf die Klasse auswirken. Die Diagramme werden durch eine Übersicht aller Klassen (Abbildung 3.7a) ergänzt. Insgesamt gibt es in dieser Untersuchung fünf Arten räumlicher Verbindung, wobei jeder Kostenpfad anhand seines MoC-Werts einer davon zugewiesen wird. Abbildung 3.8 soll zum besseren Verständnis der Diagramme beitragen. Sie zeigt den Kostenpfad zwischen Bonn und Wuppertal auf dem Satellitenbild, dem GUF und der Besiedlungsdichtekarte. Zusätzlich ist das Diagramm gezeigt, das den Verlauf der Dichtewerte zwischen den beiden urbanen Knotenpunkten illustriert. Dabei wird jede Zelle, die der Kostenpfad auf der Besiedlungsdichtekarte durchquert von einem Datenpunkt im Diagramm repräsentiert, der den Abstand der Zelle vom Startpunkt (gemessen in Pixeln) und den dortigen Dichtewert (in Prozent) enthält.



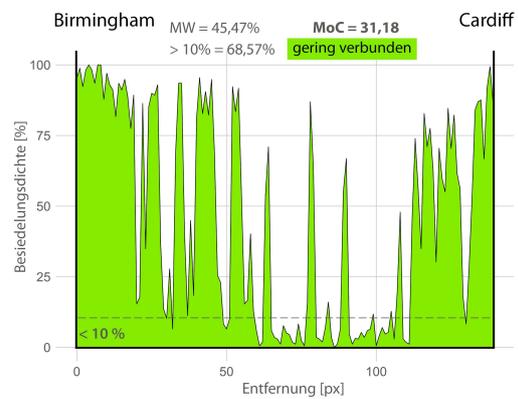
(a) Fünf Arten der räumlichen Verbindung zwischen zwei urbanen Knotenpunkten



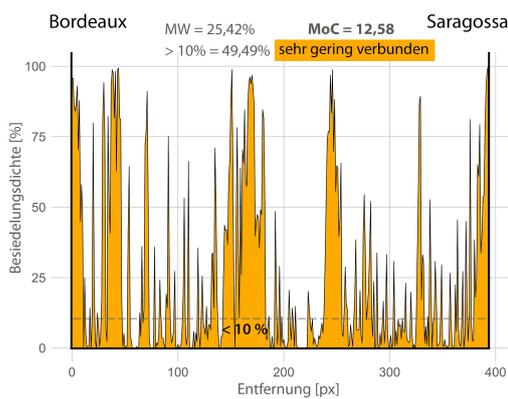
(b) Beispieldiagramm für den Verlauf der Besiedelungsdichte (*verschmolzenen*)



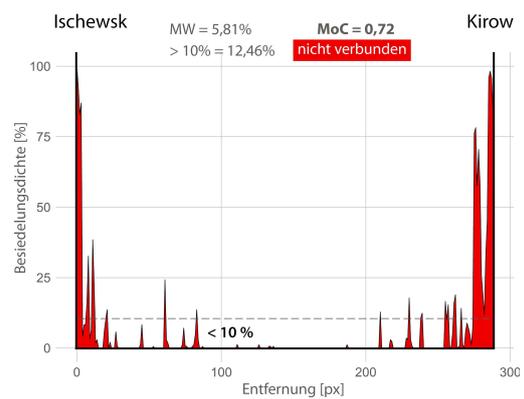
(c) Beispieldiagramm für den Verlauf der Besiedelungsdichte (*stark verbundenen*)



(d) Beispieldiagramm für den Verlauf der Besiedelungsdichte (*gering verbundenen*)



(e) Beispieldiagramm für den Verlauf der Besiedelungsdichte (*sehr gering verbundenen*)



(f) Beispieldiagramm für den Verlauf der Besiedelungsdichte (*nicht verbundenen*)

Abbildung 3.7: Übersicht über die Arten der räumlichen Verbindung mit je einem Beispiel

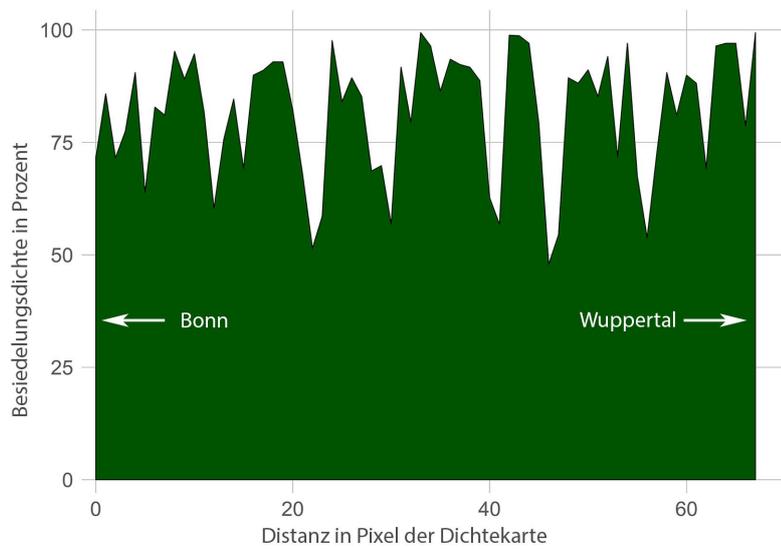
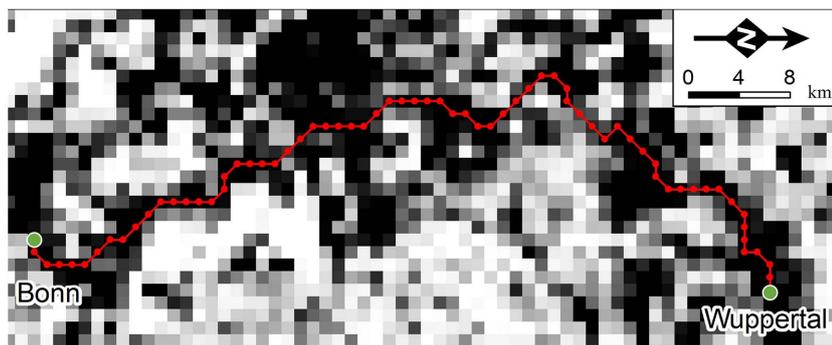
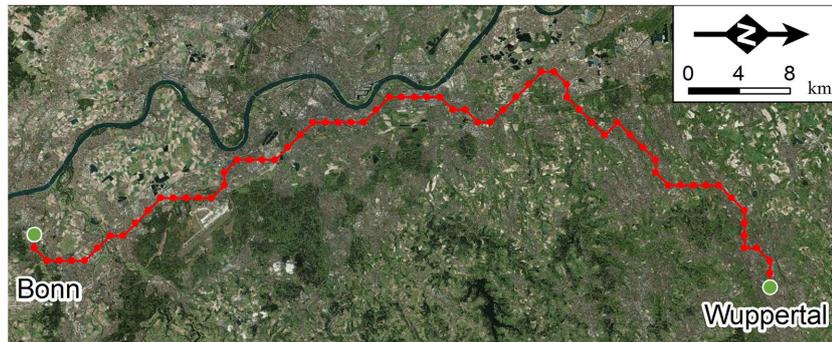


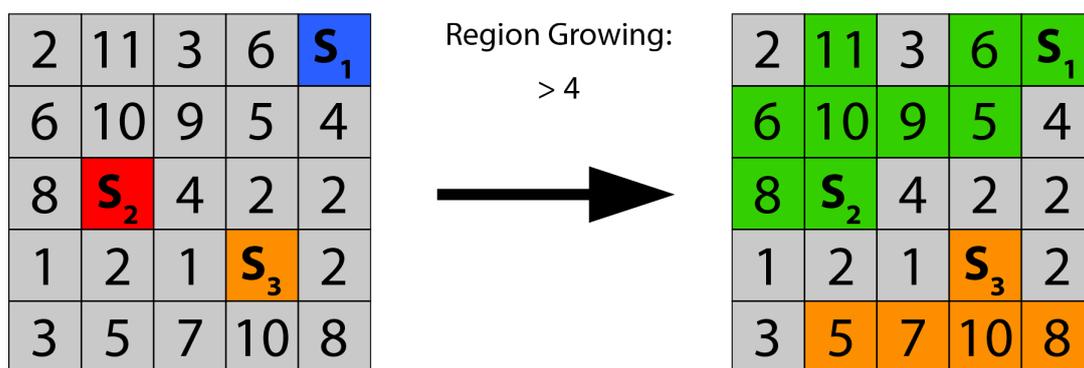
Abbildung 3.8: Abbildung des Kostenpfades zwischen Bonn und Wuppertal mit verschiedenen Hintergrundkarten, sowie dem zugehörigen Diagramm

3.5 Räumliche Ausweisung und Kategorisierung von Regionen mit vernetzten Städten

Als ein weiteres Ergebnis dieser Studie werden Regionen mit ähnlicher Charakteristik bezüglich ihrer Siedlungsdichte, ihrer urbanen Knotenpunkte und deren Interkonnektivität territorial abgegrenzt. Zum einen enthalten diese sogenannten Stadtregionen je mindestens einen urbanen Knotenpunkt, der entweder Start- oder Endpunkt eines als *räumlich verbunden* klassifizierten Kostenpfades ist und somit selbst als *räumlich verbunden* gilt. Zum anderen weisen sie vergleichsweise hohe Besiedlungsdichtewerte auf. Nachdem die Besiedlungsdichtekarte und das Netzwerk der klassifizierten Kostenpfade vorliegen, lässt sich bereits ein grobes Bild dieser Regionen abzeichnen. Um eine definitive räumliche Ausprägung festzustellen, wird ein Verfahren angewendet, das auf dem Prinzip des sogenannten *Region Growing* basiert (siehe Kapitel 3.5.1). Wurden die Regionen räumlich ermittelt, werden im Folgenden verschiedene Parameter berechnet, die die quantitative Basis zur Beschreibung der Eigenschaften und somit der weiteren Kategorisierung bilden (siehe Kapitel 3.5.2).

3.5.1 Prinzip des Region Growing

Um das konkrete Territorium der jeweiligen Stadtregion auszumachen wird ein *Region Growing* Verfahren verwendet. Dabei handelt es sich um einen iterativen, pixelbasierten Bildsegmentierungsalgorithmus, bei dem die Nachbarzellen der Ausgangspixel (engl. *seedpixel*) untersucht werden. Je nachdem, ob diese eine zuvor formulierte Wachstumsbedingung erfüllen, werden sie zur Region hinzugefügt oder nicht. Dieser Vorgang wird solange wiederholt bis keines der Nachbarpixel der entstandenen Region mehr die Bedingung erfüllt. Abbildung 3.9 illustriert das Prinzip dieser Methode anhand eines Beispielrasters mit drei Zellen als *seedpixel*. Links ist das Raster vor Anwendung des *Region Growing* zu sehen. Nun „wächst“ pro *seedpixel* eine Region hervor, der alle Zellen angehören, welche die Bedingung (im Beispiel: Pixelwert > 4) erfüllen. Wie in diesem Beispiel anhand von S_1 und S_2 gezeigt wird, können im Verlauf des Verfahrens auch mehrere *seedpixel* in einer einzigen Region resultieren. Im Kontext der Untersuchung dient die



S_n = Seedpixel

Abbildung 3.9: Veranschaulichung der Funktionsweise des *Region Growing* Verfahrens

Besiedlungsdichtekarte als Basisraster zur Ermittlung von Regionen urbaner Relevanz über die Dichtewerte. Als *seedpixel* werden die Pixel auf dem Raster gewählt, auf de-

nen *räumlich verbundene* urbane Knotenpunkte lokalisiert sind. Das sind Knoten, die entweder Start- oder Endpunkt von mindestens einem Kostenpfad sind, der als *räumlich verbunden* klassifiziert wurde (siehe Kapitel 3.4.2.2). Auf diese Weise wird erreicht, dass die zu ermittelnden Stadtregionen ausschließlich um Orte herum entstehen, die sich zuvor bereits durch ihre Klassifizierung als *räumlich verbundene* urbane Knotenpunkte über ihre hohe Besiedlungsdichte als relevant qualifiziert haben. Vor der Durchführung des *Region Growing* muss eine konkrete Mindestdichte beziffert werden, die im Anschluss als Wachstumsbedingung dient. Dabei handelt es sich um die Besiedlungsdichte, die ein Pixel mindestens aufweisen muss damit es zur Region hinzugefügt werden kann. Um die Subjektivität an dieser Stelle zu minimieren, wird dieser Wert nicht willkürlich gewählt. Indem das *Region Growing* systematisch mehrmals mit unterschiedlichen Wachstumsbedingungen durchgeführt wird, soll die Entwicklung der Ergebnisse beobachtet und so der sinnvollste Wert herausgefunden werden. Dadurch, dass sich jedes *seedpixel* in einer eindeutigen Zelle auf dem Dichterafter befindet, können diese als eine eigene Menge von Dichtewerten betrachtet werden. Die Wachstumsbedingung wird jeweils in einem Vielfachen der Standardabweichung (SAW) vom Mittelwert dieser Wertemenge angegeben und pro Durchgang um 0,1 x SAW erhöht. Die Wachstumsbedingung kann sowohl als maximal zulässige Abweichung vom Mittelwert (in Vielfachen der SAW) als auch als konkrete Mindestdichte ausgedrückt werden. Nach jedem Durchlauf liegen nun konkrete Regionen vor und es wird das relative Flächenwachstum im Vergleich zum vorherigen Ergebnis berechnet. In Abbildung 3.10 sind diese Werte für die Durchläufe von 4,6 bis 6,8 x SAW dargestellt. Während die Regionen zwischen 4,6 und 6,5 x SAW immer um weniger als 20% an Größe zunehmen, wächst die Fläche in den beiden darauf folgenden Schritten um etwa 32% beziehungsweise 34% an. Der größte Sprung ist jedoch von 6,7 auf 6,8 x SAW zu verzeichnen, wo sich die Fläche mit etwa 120% Wachstum mehr als verdoppelt. Dieser Einschnitt wird gleichzeitig als Schwellwert festgesetzt, was bedeutet, dass die Regionen mit 6,7 x SAW ermittelt werden, was einer Mindestdichte von 2,47% entspricht. Dieser Wert mag zunächst sehr gering erscheinen, doch wenn man sich die Verteilung der Werte des Dichterafter vor Augen führt (siehe Abbildung 3.3), lässt sich feststellen, dass 89% aller Werte unter 2,47% liegen und im Umkehrschluss nur 11% der Pixel im gesamten Untersuchungsgebiet die Wachstumsbedingung erfüllen. Der Mittelwert von 1,8% bestätigt diese einseitige Verteilung.

Die Karte in Abbildung 3.11 visualisiert die Zäsur zwischen 6,7 und 6,8 x SAW in einem Ausschnitt über Zentraleuropa. Der über die Wachstumsraten systematisch ermittelte Schwellwert wird visuell bestätigt, da der große Flächenunterschied sofort zu erkennen ist. Die blauen Bereiche (6,8 x SAW) schließen beispielsweise beinahe ganz Irland sowie den Großteil Westfrankreichs ein, weshalb dieses Ergebnis aufgrund seiner flächenmäßigen Ausdehnung deutlich über ein sinnvolles hinausgeht, da es auch sehr große Areale beinhaltet, die vergleichsweise dünn besiedelt sind.

An dieser Stelle wird explizit darauf hingewiesen, dass es bei derartigen, raumwissenschaftlichen Untersuchungen kein richtiges oder falsches Ergebnis gibt. Über diesen systematischen Ansatz wird versucht, den unvermeidlichen subjektiven Einfluss so gering wie möglich zu halten.

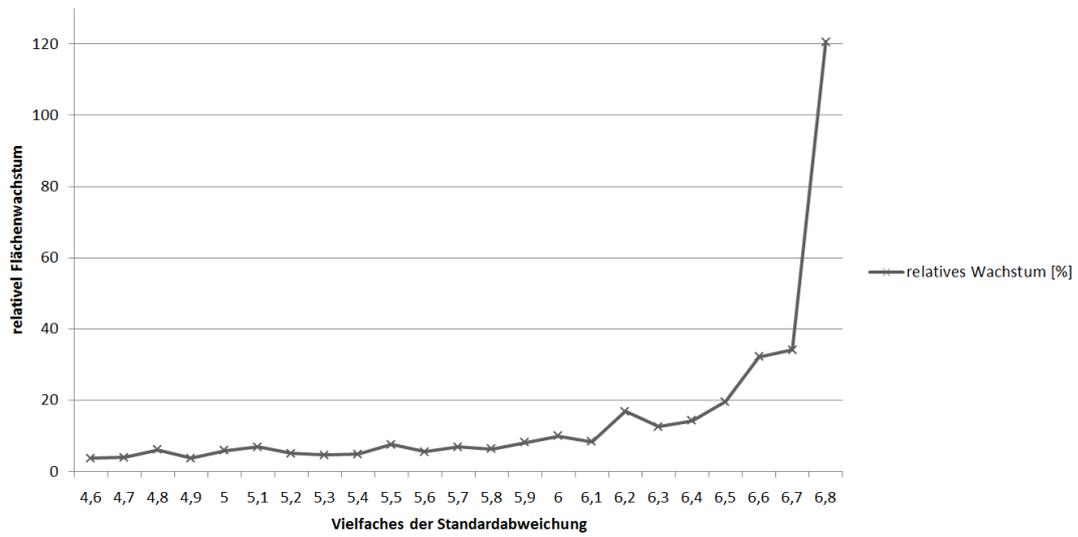


Abbildung 3.10: Entwicklung des relativen Flächenwachstums bei zunehmend großzügiger Wachstumsbedingung

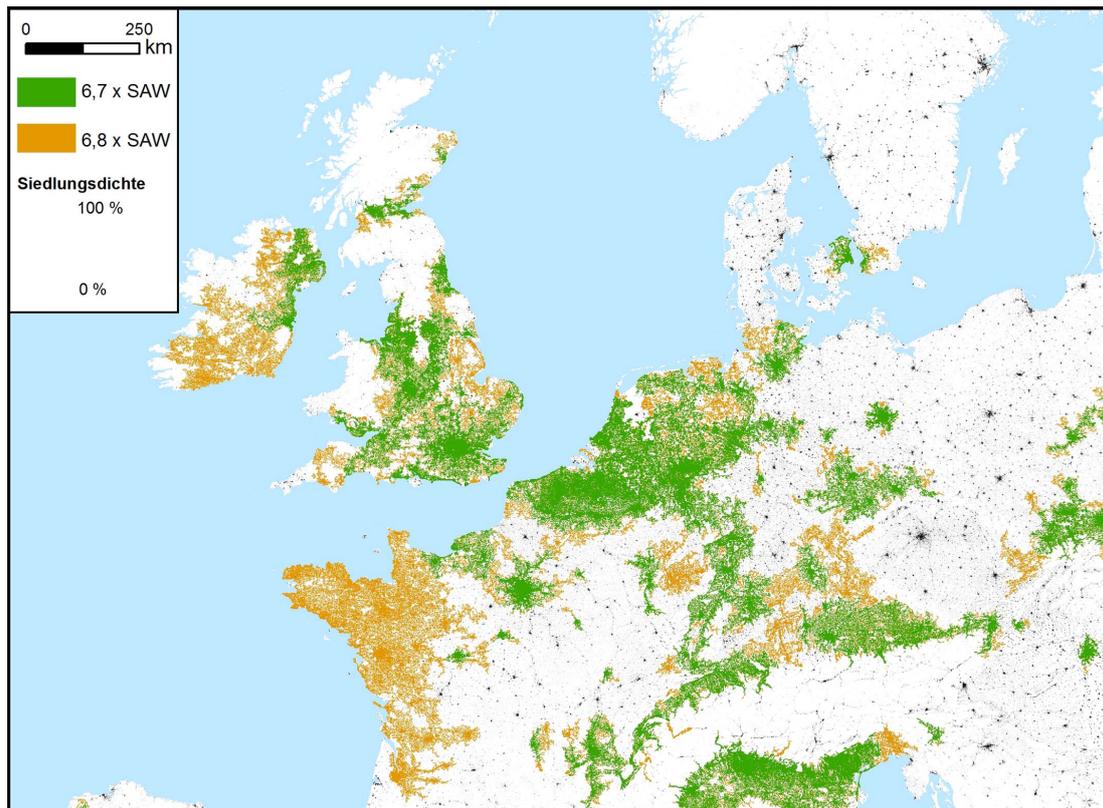


Abbildung 3.11: Visuelle Darstellung der Ergebnisse des *Region Growing* Verfahrens mit unterschiedlichen Wachstumsbedingungen

3.5.2 Kategorisierung der identifizierten Regionen

Es liegen nun 61 räumlich getrennte Regionen vor, die sich durch eine durchgehend überdurchschnittlich hohe Besiedlungsdichte auszeichnen und mindestens einen urbanen

Knotenpunkt enthalten, der als *räumlich verbunden* gilt. Zur quantitativen Charakterisierung der Regionen werden folgende Daten erhoben und anschließend in normalisierte Werte umgewandelt:

- Fläche A
Dieser Wert gibt die räumliche Ausdehnung der Region an, wobei eine größere Ausdehnung eine höhere Relevanz der Region indiziert.
- Anzahl urbaner Knotenpunkte N
Dieser Parameter repräsentiert die Anzahl der *räumlich verbundenen* urbanen Knotenpunkte in der jeweiligen Region. Je höher dieser Wert, desto relevanter ist die Region.
- Mittlere Länge der Kostenpfade L
Die mittlere Länge aller Kostenpfade, deren Start- und Endpunkt in der jeweiligen Region liegen. Eine kleine mittlere Länge deutet dabei auf eine verdichtete Anordnung der Knotenpunkte in dieser Region und somit auf eine höhere Relevanz hin.
- Grad der Konnektivität der Kostenpfade K
Ein Index, der sich über die Anteile der Klassen der Verbindungen in dieser Region errechnet, wobei starke räumliche Verbindungen schwerer gewichtet sind als schwache.

Der Wert K errechnet sich aus der Multiplikation der Anteile der *räumlich verbundenen* Kostenpfade, die in der Region verlaufen. Dabei wird die Anzahl *gering räumlich verbundener* Pfade einfach, die der *stark räumlich verbundenen* 1,25-fach und die Zahl der als *verschmolzen* klassifizierten Verbindungen 1,5-fach gewichtet. Auf diese Weise wird Regionen, deren urbane Knotenpunkte eine starke Konvergenz ihrer Siedlungsmuster aufweisen, mehr Bedeutung beigemessen. Die absoluten Werte der Parameter A , N und K werden am Maximalwert aller Regionen normalisiert, wodurch man jeweils einen normalisierten Parameterwert zwischen 0 und 1 erhält. Das heißt, dass beispielsweise für die Region mit der größten Fläche $A = 1$ gilt und dementsprechend für eine Region, welche nur die Hälfte dieser Fläche besitzt, $A = 0,5$. Die mittlere Länge der Kostenpfade L wird ebenfalls normalisiert, jedoch am Minimalwert. Das bedeutet, dass für die Regionen mit der absolut kleinsten mittleren Pfadlänge gilt: $L = 1$. Die eigentliche Kategorisierung erfolgt mittels der Parameter und anhand eines regionalen Index I_{REG} , der via Multiplikation aus allen Parametern – wie in Formel (2) gezeigt – errechnet wird.

$$(2) \quad I_{REG} = A \times N \times L \times K \times 100$$

Formel zur Berechnung des regionalen Index I_{REG}

Es folgt die eigentliche Kategorisierung der Stadtregionen anhand der zuvor erhobenen Daten. Zunächst bilden alle Regionen, die nur einen einzigen *räumlich verbundenen* urbanen Knotenpunkt enthalten, eine Kategorie aus monozentrischen Regionen (Kategorie E). Die Regionen mit mehr als einem *räumlich verbundenen* Knoten werden über den *natural breaks* Algorithmus (Jenks und Caspall 1971) in vier weitere Kategorien (Kategorien A, B, C und D) eingeteilt. Alle urbanen Knotenpunkte, die als *nicht räumlich*

verbunden klassifiziert wurden, haben keine flächenmäßige Ausdehnung. Sie bilden die letzte Kategorie (Kategorie F). Alle Daten zu den Regionen (Kategorie A – D) sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Tabelle 3.2 enthält die Werte für die Regionen der Kategorien E und die urbanen Knotenpunkte der Kategorie F.

Tabelle 3.1: Detaillierte quantitative Charakterisierung und Kategorisierung der identifizierten territorialen Regionen (Kategorie A – D)

Kategorie	urbane Knotenpunkte (Städte) pro Region	räumliche Ausdehnung / Nationen	physische Indikatoren				regionaler Index I _{REG}	Bevölkerung
			Anzahl verb. Knoten	Fläche [km ²]	mittlere Länge der Kostenpfade [km]	Grad der Konnektivität		
A	Lens, Lille, Kortrijk, Roeselare, Bruegge, Gent, Brussels, Charleroi, Antwerpen, Luettich, Aachen, Moenchengladbach, Duesseldorf, Solingen, Wuppertal, Leverkusen, Koeln, Bonn, Duisburg, Essen, Dortmund, Krefeld, Muenster, Bielefeld, Osnabrück, Hannover, Brunswick, Eindhoven, Breda, Dordrecht, Rotterdam, Utrecht, Den Haag, Leiden, Amsterdam, Zaanstad, Apeldoorn	Transnational (France, Belgium, Netherlands, Luxembuorg, Germany)	37	65.253	69	1,32	28,04	51.048.827
B	Swindon, Bristol, Cardiff, Gloucester, Birmingham, Coventry, Leicster, Nottingham, Derby, Stoke, Warrington, Liverpool, Birkenhead, Manchester, Sheffield, Leeds, Blackpool	National (United Kindom)	17	22.080	76	1,24	3,720	23.897.718
	Turin, Busto Arsizio, Mailand, Bergamo, Brescia, Verona, Padua, Venice, Bologna	National (Italy)	9	31.388	100	1,22	2,105	20.809.095
	London, Southend on the sea, Rochester, Luton, Milton Keys Peterberough, Ipswich, Norwich, Brighton, Farnborough, Reading, Southampton, Portsmouth	National (United Kindom)	12	16.473	83	1,31	1,891	21.020358
C	Frankfurt, Wiesbaden, Mannheim, Karlsruhe, Stuttgart, Straßburg	National (Germany)	6	13.656	88	1,19	0,673	13.303.103
	Augsburg, Munich, Vienna, Linz	Transnational (Germany, Austria)	3	17.794	64	1,0	0,509	9.399.535
	Neapel, Caserta, Scafati	National (Italy)	3	4.462	37	1,5	0,333	5.283.131
D	Basel-Zurich	Transnational (Switzerland, France, Germany)	2	9.457	88	1,25	0,165	7.178.119
	Cracow-Bielitz Biala	Transnational (Poland, Czech Republic)	2	9.959	79	1,00	0,161	7.503.593
	Vigo-Porto-Lissabon	Transnational (Potugal-Spain)	3	15.314	232	1,13	0,136	8.9411.183
	Geneva-Lausanne	Transnational (Switzerland, France)	2	2.392	60	1,25	0,061	1.853.7763
	Dublin-Belfast	Transnational (Ireland, North Ireland)	2	7.555	167	1,25	0,057	3.237.883
	Nancy-Metz	Transnational (France, Luxembuorg, Belgium)	2	2.383	59	1,00	0,050	1.229.523
	Barcelona-Sabadell	National (Spain)	2	3.390	22	1,50	0,281	6.290.076
	Lyon-Saint Etienne-Valence	National (France)	3	5.479	87	1,17	0,132	3.422.285
	Newcastle-Sunderland-Midellsborough	National (UK)	3	1.857	42	1,33	0,106	2.464.981
	Hamburg-Lübeck	National (Germany)	2	3.959	68	1,25	0,090	3.759.739
	Murcia-Alicante	National (Spain)	2	2.997	80	1,25	0,058	2.389.141
	Ruoen-Le Havre	National (France)	2	3.502	83	1,00	0,050	1.492.658
	Marseille-Toulon	National (France)	2	1.856	60	1,25	0,048	2.266.451
Glasgow-Edinburgh	National (UK)	2	2.276	81	1,25	0,041	3.023.951	
Florence-Livorno	National (Italy)	2	2.114	99	1,25	0,032	2.107.133	

Tabelle 3.2: Detaillierte Liste der monozentrischen Regionen (Kategorie E) sowie der urbanen Knotenpunkte, die nicht Teil einer territorialen Region sind (Kategorie F)

Kategorie	monozentrische Regionen (gruppiert nach Nationen)	Nation (Anzahl der Knotenpunkte)	Kategorie	nicht als Teil einer Region klassifizierte urbane Knotenpunkte (Städte)	Nation (Anzahl der Knotenpunkte)
E	Paris, Montpellier, Caen, Tours, Clermont-Ferrand, Orleans, Dijon, Troyes, Reims	France (9)	F	Lviv, Schytomyr, Winnyzja, Kiev, Tschernihiw, Poltawa, Carkiw, Dnipropetrowsk, Sapoischschja	Ukraine (9)
	Dresden, Nuernberg, Berlin, Bremen, Oldenburg, Magdeburg, Kassel	Germany (7)		Brest, Nantes, Bordeaux, Toulouse, Rennes, Le Mans	France (6)
	Northhampton, Bournemouth, Hull, Aberdeen, Dundee	UK (5)		Wladimir, Pensa, Tambow, Woronesch, Krasnodar	Russia (5)
	Moscow, Rostow, Tula, Taganrog	Russia (4)		Temeswar, Cluj-Napoca, Bucharest, Konstanza	Romania (4)
	Warsaw, Lodz, Teschenstochau, Radom	Poland (4)		Wroclaw, Posen, Bydgoszcz, Lublin	Poland (4)
	Donezk, Luhansk	Ukraine (2)		Bari, Catania, Palermo, Cagliari	Italy (4)
	Valencia	Spain (1)		Saragossa, Madrid, Seville	Spain (3)
	Kopenhagen	Denmark (1)		Minsk, Wizebsk, Homel	Belarus (3)
	Budapest	Hungary (1)		Stockholm, Gothenburg	Sweden (2)
	Ljubljana	Slovenia (1)		Prague, Brno	Czech Republic (2)
	Grenoble	Switzerland (1)		Sofia, Plowdiw	Bulgaria (2)
	Rome	Italy (1)		Athens, Thessaloniki	Greece (2)
	Malmoe	Sweden (1)		Riga	Latvia (1)
Bratislava	Slovakia (1)	Belgrad		Serbia (1)	
		Debrecen		Hungary (1)	
		Kaunas		Lithuania (1)	
		Cork		Ireland (1)	
		Plymouth		UK (1)	
		Graz		Austria (1)	
		Oslo		Norway (1)	
		Zagreb		Croatia (1)	
		Tirana		Albania (1)	
		Skopje		Mazedonia (1)	
		Chisinau		Moldavia (1)	
		Izmir		Turkey (1)	

4 Ergebnisanalyse

Urbane Knotenpunkte, deren Verbindungslinien (Kostenpfade) und territoriale Regionen sind das Resultat der im vorherigen Teil der Arbeit beschriebenen Methodik. Zur Veranschaulichung sind diese Ergebnisse in Abbildung 4.2 dargestellt. Auffällig ist das Gebiet in Westeuropa um Belgien, Holland, Südengland, Nordfrankreich und Nordwestdeutschland. Dieses Areal wird deshalb in Abbildung 4.3 zu genaueren Betrachtung in einem größeren Maßstab visualisiert. Um einen Eindruck des Grades der räumlichen Konnektivität (MoC) der urbanen Knotenpunkte zu vermitteln, zeigt Abbildung 4.1 zusätzlich die berechneten und klassifizierten Verbindungslinien (Kostenpfade).

In den folgenden beiden Kapiteln werden die Ergebnisse und die Räume, die sie erzeugen (territorial, nicht-territorial), beschreibend analysiert. Dabei wird auf die urbanen Knotenpunkte und deren Verbindungen (nicht-territorial; Kapitel 4.1) und auf die Stadtregionen (territorial; Kapitel 4.2) separat eingegangen.



Abbildung 4.1: Die identifizierten urbanen Knotenpunkte sowie die klassifizierten Verbindungslinien dazwischen im Untersuchungsgebiet

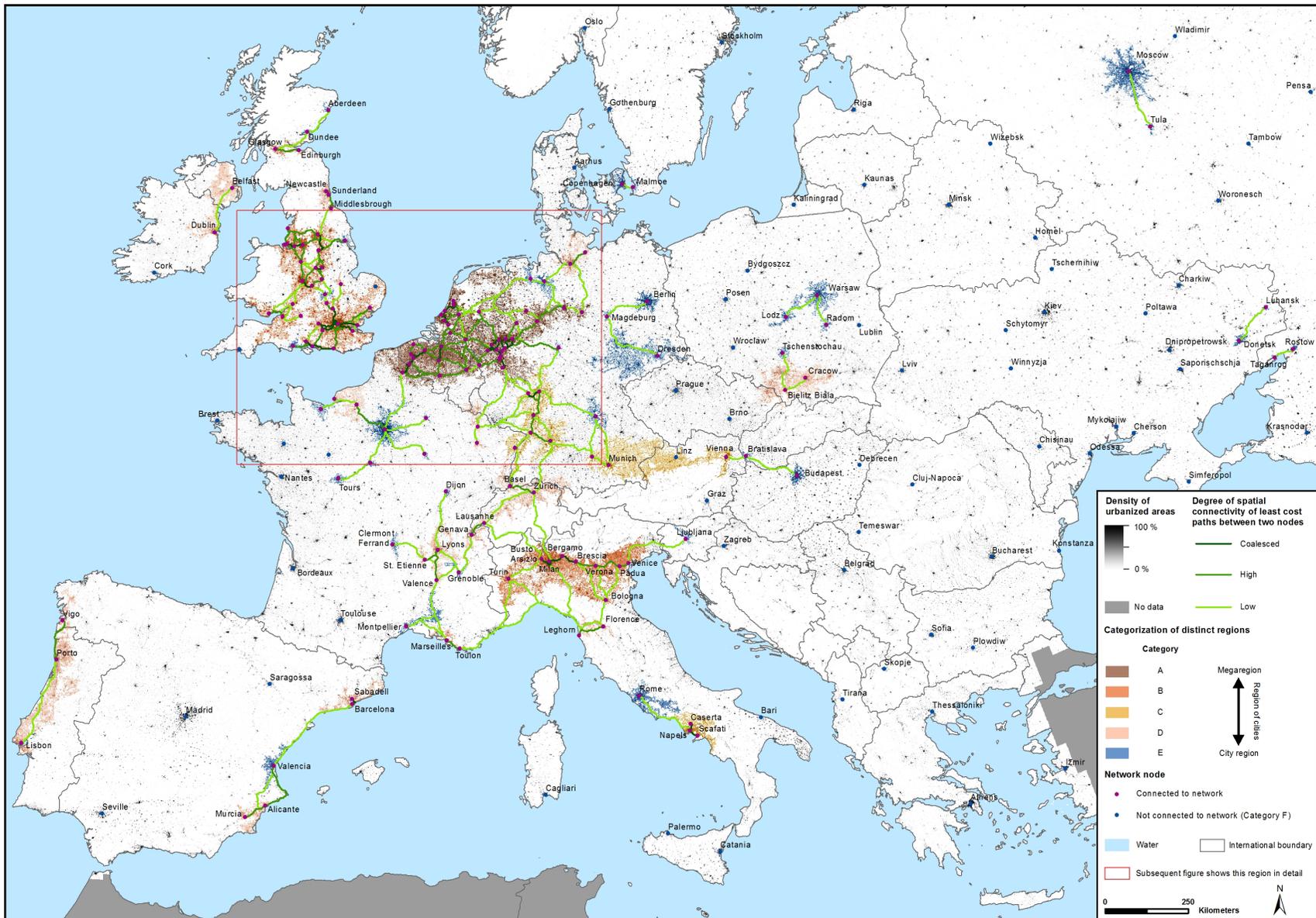


Abbildung 4.2: Die identifizierten urbanen Knotenpunkte, die als *räumlich verbunden* klassifizierten Verbindungslinien sowie die ausgewiesenen Regionen im Untersuchungsgebiet

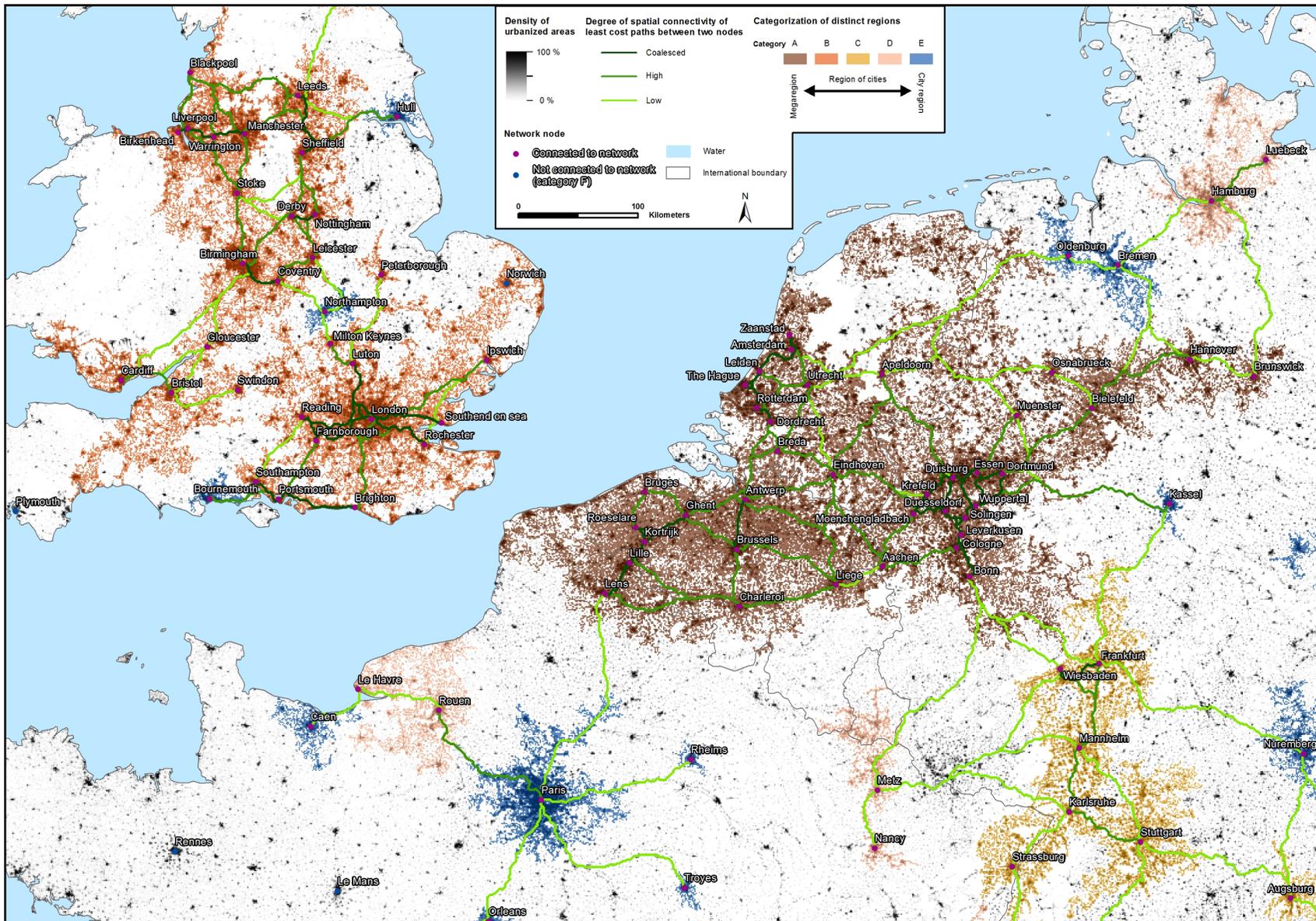


Abbildung 4.3: Die identifizierten urbanen Knotenpunkte, die als *räumlich verbunden* klassifizierten Verbindungslinien sowie die ausgewiesenen Regionen aus der Detailregion in Abbildung 4.2

4.1 Urbane Knotenpunkte und nicht-territoriale Regionen

Die Methode, durch deren Anwendung urbane Knotenpunkte über hohe Siedlungsdichte sowie eine relevante Flächenausdehnung zusammenhängender Gebiete von hoher Siedlungsdichte ermittelt werden, resultiert in insgesamt 240 Knoten, von denen 66,3% (159 absolut) über die Konvergenz ihrer Siedlungsmuster als Teil eines physischen Netzwerkes identifiziert werden (*räumlich verbunden*). Mit den Verbindungslinien (Kostenpfade), welche diese Konvergenz quantifizieren, entstehen sichtbare, aber nicht eindeutig territorial abgrenzbare Regionen – sogenannter *soft space*. In Abbildung 4.1 sind alle Verbindungslinien zwischen den Knotenpunkten im Untersuchungsgebiet visualisiert, wobei diejenigen, die als Teil des physischen Netzwerkes klassifiziert wurden (*verschmolzen, stark räumlich verbunden, gering räumlich verbunden*), in Grüntönen und die restlichen (*sehr gering räumlich verbunden, nicht räumlich verbunden*) in orange beziehungsweise rot eingefärbt sind. Das Ergebnis zeigt, dass die Methode die Rekonstruktion von Konzepten wie dem European Blue Star, der Blauen oder der Gelben Banane erlaubt. Trotzdem sind auch Abweichungen von diesen Räumen zu verzeichnen.

Der Großteil der verbundenen Knoten verteilt sich auf West- und Zentraleuropa. Entsprechend ist in diesem Gebiet auch das dominierende Netzwerk lokalisiert, das sich – lässt man die natürliche Abtrennung durch den Kanal zwischen den Britischen Inseln und dem europäischen Hauptland außen vor – von Zentralengland bis nach Norditalien zieht und dabei die Niederlande, Belgien, Luxemburg, Frankreich, Deutschland und die Schweiz durchzieht. Einfacher formuliert könnte man sagen, dass man diesen Bereich ausschließlich über *räumlich verbundene* (grüne) Pfade durchqueren kann. In Zahlen zeigt sich die Dominanz dieses Netzwerkes darin, dass 51,7% aller identifizierten Knotenpunkte an dieses Netzwerk angebunden sind (36,7% auf dem europäischen Hauptland und 15% in Großbritannien).

In Abbildung 4.4 ist die räumliche Ausdehnung der Blauen und der Sunbelt Banane dargestellt. Grundsätzlich spiegelt das oben beschriebene nicht-territoriale Konstrukt, welches trotzdem eine gewisse räumliche Ausdehnung besitzt, die Blaue Banane (RECLUS 1989) über den Verlauf der Verbindungslinien wieder, die auch oft als „Rückgrat der europäischen Wirtschaft“ betitelt wird. Sie orientiert sich an jahrhundertealten Handelsrouten und wird manchmal als urbaner Korridor, zentrale urbane Region in Europa oder zentrale Megalopolis bezeichnet (Heidenreich 1998; Hospers 2002). Betrachtet man den vom oben genannten dominierenden Netzwerk aufgespannten *soft space*, zeigt sich, dass sich die Blaue Banane im Vergleich zu ihrer ursprünglich indizierten räumlichen Ausdehnung erweitert hat. So erstreckt sich das Netzwerk entlang neu entstandener Entwicklungsachsen in den Norden Englands bis Newcastle, nach Nord- und Zentraldeutschland bis Hamburg und Hannover sowie im Südosten bis nach München. Im Norden Frankreichs ist zu erkennen, dass auch Paris und seine Umliegenden Städte Teil des Netzwerkes sind, welches sich im selben Land über Lyon bis nach Montpellier und Marseilles erstreckt. Des Weiteren sind im nördlichen Teil Italiens alle Knotenpunkte bis nach Florenz an das Hauptnetzwerk angebunden. Im Westen dehnt sich dieses bis nach Ljubljana in Slowenien aus. Schlussendlich lässt sich sagen, dass sich die Blaue Banane als Basis in diesem dominanten Netz aus *räumlich verbundenen* urbanen Knotenpunkten widerspiegelt und zusätzlich über mehrere Entwicklungsachsen erweitert wurde. Die Gelbe Banane – zwischen Paris um Warschau (Hospers 2002) – wird bruchstückhaft von dem Netzwerk aus *räumlich verbundenen* Pfaden nachgezeichnet. Allerdings zeigen die Lücken, die größtenteils von Verbindungen mit *sehr geringer räumlicher Verbundenheit* geschlossen werden, durch ihre Klassifizierung ein Entwicklungspotenzial in die erwartete

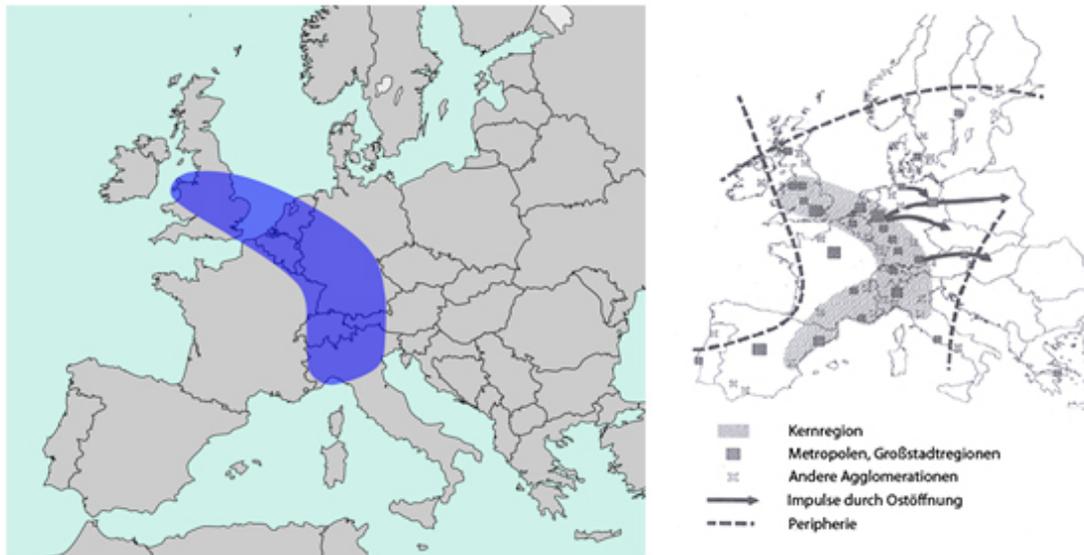


Abbildung 4.4: links: Blaue Banane (Bildquelle: Wikimedia Commons 2009a); rechts: Blaue Banane und Sunbelt Banane (Bildquelle: Schätzl 1993)

Richtung an. So zeigt sich bereits eine durchgehende Verbindung von Paris bis Braunschweig (engl. Brunswick), welche von dort an meist mit Unterbrechungen durch Pfade der *sehr gering räumlich verbundenen* Klasse (gelb) – aber auch vereinzelt mit bereits *räumlich verbundenen* – bis nach Warschau fortgesetzt wird.

Die Sunbelt Banane zwischen Mailand und Valencia (Hospers 2002; Abbildung 4.4 rechts) findet sich ebenfalls – wenn auch mit einer Lücke zwischen Montpellier und Barcelona – im Netzwerk wieder. Es zeigt sich sogar eine Erweiterung über Valencia hinaus bis nach Alicante und Murcia, sowie eine Verlängerung im Osten, die ganz Norditalien einnimmt.

Auch der Blue Star (IAURIF 1991) wird von den *räumlich verbundenen* Knotenpunkten und dem dazwischen aufgespannten Netzwerk sehr gut abgebildet (siehe Abbildung 4.5). Die restlichen kleineren Netzwerke, die nur von zwei oder drei *räumlich verbundenen* Knotenpunkten aufgespannt werden, bilden lediglich kleinere und in Relation zum eingangs beschriebenen Hauptnetzwerk unbedeutende *soft spaces*, von denen höchstens der zwischen



Abbildung 4.5: European Blue Star (Bildquelle: JUGEM 2016)

zwischen Lissabon und Vigo herauszustellen ist. Allgemein ist noch zu erwähnen, dass die Knotenpunkte größere Zwischenräume aufweisen je östlicher im Untersuchungsgebiet sie gelegen sind. Eine weitere Besonderheit ist, wie das Beispiel Madrid zeigt, die räumliche Isolation von selbst populations- und flächenmäßig bedeutenden Städten durch große Distanzen zu anderen urbanen Knotenpunkten, welche in diesem Fall meist an der Küste der iberischen Halbinsel gelegen sind.

4.2 Charakterisierung der territorialen Regionen

Die im Folgenden genannten Daten sind aus den Tabellen 3.1 und 3.2 entnommen. Zwar lassen sich durch das nicht-territoriale Netzwerk aus räumlichen Verbindungen Konzepte wie die Blaue Banane in ihrem räumlichen Charakter rekonstruieren, aber dennoch fehlt auf dieser Ebene der Analyse eine eindeutige flächenmäßige Abgrenzung als Region. Diese wurden über ein *Region Growing* Verfahren in Kombination mit der Siedlungsdichte identifiziert, wobei insgesamt 61 räumlich getrennte Territorien entstanden sind, von denen 22 den Kategorien A bis D zuzuordnen sind. Die restlichen 39 bilden die Kategorie E. In Ihrer Charakteristik sind diese Einheiten sehr unterschiedlich geprägt. Die auffälligste Region, die sich in allen Belangen sehr stark von den restlichen unterscheidet und deshalb alleine Kategorie A bildet, ist eine transnationale, sehr große Megaregion, die bei drei von vier relevanten Parametern den Maximalwert stellt und deshalb den mit Abstand größten regionalen Index (I_{REG}) aufweist. Drei weitere große Megaregionen mit ebenfalls hohen, aber bei Weitem lange nicht so extremen Werten für I_{REG} , konnten identifiziert werden (Kategorie B). Kategorie C besteht aus drei weiteren großen Stadtregionen mit drei bis sechs urbanen Knotenpunkten und die restlichen Regionen, die mehr als einen solchen aufweisen, bilden Kategorie D. Acht dieser 22 polyzentrischen Regionen (Kategorie A bis D) überschreiten dabei internationale Grenzen, was zeigt, dass diese kein Hindernis darstellen.

Die dominante Randstaad-Ruhr-Köln-Lille Megaregion besteht aus 37 *räumlich verbundenen* urbanen Knotenpunkten (193 im gesamten Untersuchungsgebiet), deren Verbundenheit von insgesamt 88 Kostenpfaden charakterisiert wird. Während 74 dieser Verbindungen *verschmolzen* oder *stark räumlich verbunden* sind, ist der Rest immer noch – wenn auch teilweise nur *gering* – *räumlich verbunden*. Die räumliche Ausdehnung dieser Region ist ebenfalls von den anderen unerreicht und doppelt so groß wie die, der flächenmäßig zweitgrößten Region (Turin-Mailand-Venedig in Norditalien). Mit über 51 Millionen Einwohnern beheimatet diese spezielle Megaregion etwa 10% der gesamten Bevölkerung Europas (bezogen auf die Abdeckung des GEOSTAT 1 km² Bevölkerungsrasters; erläutert in Kapitel 5.2). Bezüglich der räumlichen Ausdehnung wesentlich kleiner, aber mit Bevölkerungszahlen zwischen 21 und 24 Millionen Einwohnern trotzdem sehr relevant, sind die drei Megaregionen der Kategorie B. Vor allem über die Anzahl der urbanen Knoten setzen diese sich von den unteren Kategorien (C und D) ab. Dazu zählen der Großraum London (12 Knoten), das Gebiet von Cardiff und Bristol bis nach Leeds, welches zusätzlich die Städte Birmingham, Liverpool und Manchester einnimmt (17 Knoten), sowie die bereits erwähnte Region von Turin über Mailand bis nach Venedig in Norditalien (9 Knoten). Die kleineren Regionen (Kategorie C und D) beinhalten noch drei bis sechs urbane Knotenpunkte (C) beziehungsweise zwei bis drei (D) und haben Populationswerte zwischen fünf und 13 Millionen (C) und 1,2 bis neun Millionen Einwohnern (D). Festzuhalten ist des Weiteren, dass sich die meisten der Stadtregionen in Zentral- oder Westeuropa befinden (siehe Abbildung 4.2).

5 Plausibilisierung der Ergebnisse

Die Tatsache, dass es in den Raumwissenschaften oft kein eindeutiges Ergebnis und die einzig richtige Lösung gibt, macht eine Validierung der Ergebnisse im herkömmlichen Sinne aufgrund des Mangels an eindeutigen Referenzdaten nicht möglich. Deshalb sollen in diesem Kapitel die in der Arbeit produzierten Daten plausibilisiert werden. Um zu zeigen, dass die am Anfang der Arbeit identifizierten urbanen Knotenpunkte auch tatsächlich existierende Städte repräsentieren, wird in Kapitel 5.1 deren Lage mit der Position der jeweils korrespondierenden Stadt verglichen. Zusätzlich wird der Grad der Urbanisierung der NUTS-3 Regionen (siehe Kapitel 2.4.1), in denen die Knotenpunkte lokalisiert sind, erhoben. Im Nachfolgenden Kapitel wird die Sinnhaftigkeit der Stadtregionen bekräftigt, indem diese mit bereits existierenden Konzepten aus anderen Studien in Zusammenhang gesetzt und mit Populations- und Besiedlungsdichtedaten verschnitten werden.

5.1 Urbane Knotenpunkte

Zur Plausibilisierung der Knotenpunkte werden zwei externe Datensätze herangezogen. Einer davon ist der Grad der Urbanisierung der NUTS-3 Regionen (URT; siehe Kapitel 2.4.1), welcher bereits in der Methodik Verwendung fand (siehe Kapitel 3.4.2.2). Es wird erwartet, dass die urbanen Knotenpunkte überwiegend in Regionen lokalisiert sind, die als *vorwiegend urban / urban* klassifiziert wurden, und dass die Anzahl der Punkte, die in *vorwiegend ländlichen / ländlichen* Regionen liegen, gering ist. Zum anderen wird das Umfeld der Knotenpunkte mehrmals mit verschiedenen Suchdistanzen nach Städten abgesucht, die von Eurostat in der Städtestatistik *Urban Audit* gelistet sind. Neben anderen Kriterien impliziert dies eine Mindestbevölkerung von 50.000 Einwohnern (Liste der Städte des *Urban Audit* siehe Eurostat 2016a; Download: Eurostat 2016c). Es wird angenommen, dass bei der großen Mehrheit der urbanen Knotenpunkte eine korrespondierende *Urban Audit Stadt* (UAS) im Umfeld zu finden ist. Da sich die Abdeckung der Eurostat-Daten auf die Mitgliedsstaaten der EU (EU-28) sowie Norwegen, die Schweiz und Island begrenzt, wird die Analyse auf das gemeinsame Überschneidungsgebiet zwischen diesen Ländern und dem Untersuchungsgebiet (siehe Kapitel 2.5) begrenzt. In dieses gemeinsame Gebiet fallen 193 der insgesamt 240 identifizierten Knotenpunkte.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Es ist zu erkennen ist, dass mit etwa zwei Drittel der Großteil der Knotenpunkte in einer als *vorwiegend urban / urban* klassifizierten Region liegt, während 32,1% der Punkte sich in *Zwischenregionen* befinden und nur ein geringer Anteil von 2,6% sich in einer *vorwiegend ländlichen / ländlichen* Region befindet. Die Tatsache, dass diese fünf Knotenpunkte in eine als *vorwiegend ländliche / ländliche* Region fallen, ist auf administrative Unterschiede auf nationaler Ebene zurückzuführen. Vier dieser Punkte befinden sich in Frankreich und einer in Irland – Länder, in denen aufgrund administrativer Differenzen die Regionen auf NUTS-3 Level im Allgemeinen signifikant größer sind als beispielsweise in Deutschland, den Niederlanden, oder Belgien. Während in den zuerst genannten Nationen lediglich die Hauptstädte Dublin und Paris eine eigene Region darstellen, bilden in Deutschland auf NUTS-3 Ebene wesentlich kleinere und unbedeutendere Städte eine eigene Region. Das macht eine

Klassifikation dieser kleineren, von einer Stadt dominierten Region als *vorwiegend urban* / *urban* wesentlich wahrscheinlicher, wenn man bedenkt, dass die Klassifikationsmethode auf dem Anteil der ländlichen Bevölkerung basiert (siehe Kapitel 2.4.1).

Der andere Teil der Plausibilisierung der urbanen Knotenpunkte bestätigt ebenfalls das Potential der Methode urban relevante Punkte zu identifizieren. Bereits bei einem relativ geringen Suchradius von fünf Kilometern wird bei 89% der Knotenpunkte eine UAS gefunden. Wird in einem Umfeld von 7,5 Kilometern gesucht, ist das bei 97% der Knotenpunkte der Fall und alle 193 haben eine UAS in ihrer Nachbarschaft bei 25 Kilometern Suchdistanz.

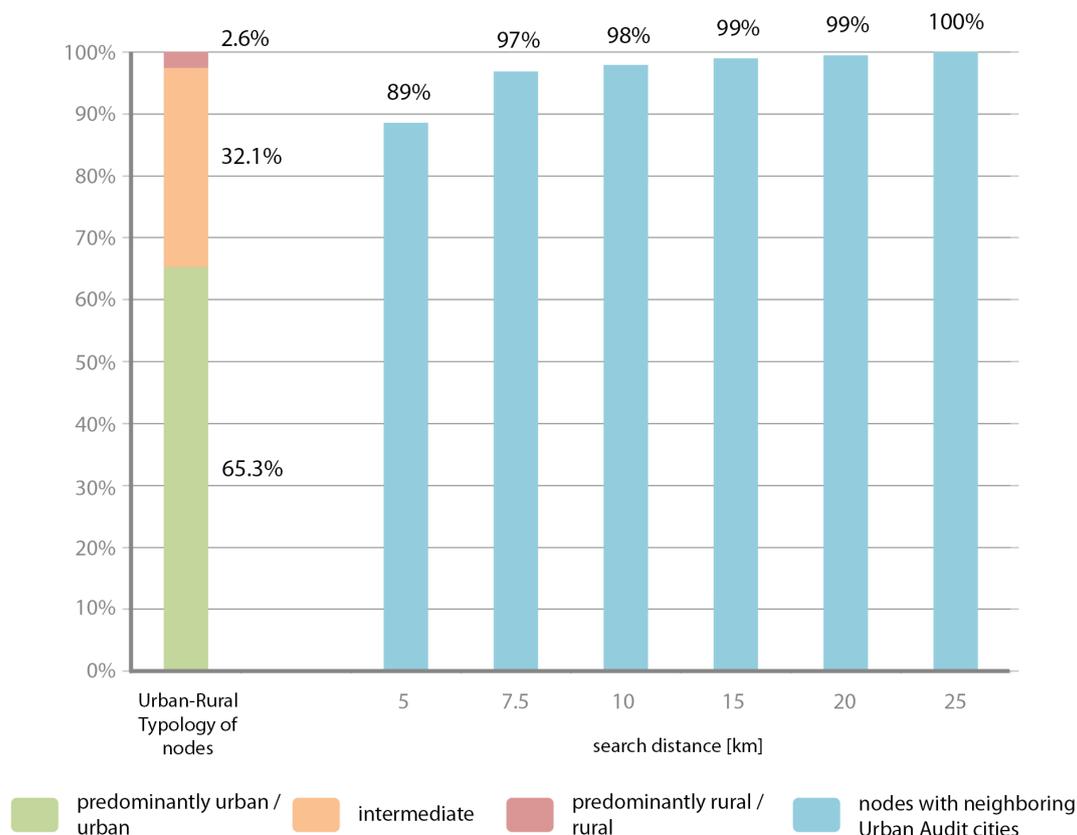


Abbildung 5.1: Plausibilisierung der identifizierten urbanen Knotenpunkten mit der urban-rural typology und *Urban Audit Städten*

5.2 Stadtregionen

Die Plausibilisierung der Stadtregionen erfolgt über den Vergleich von Bebauungs- (GUF) und Populationsdaten, welche dem GEOSTAT 1 km² Bevölkerungsraster (GEOSTAT 2011) entnommen sind. Diese Analyse beschränkt sich auf die Abdeckung des Bevölkerungsrasters, welche die EU-28 (ohne Zypern und Luxemburg) und zusätzlich die Schweiz, Norwegen, den Kosovo und Albanien umfasst. Dadurch bedingt werden nur 55 der insgesamt 61 Stadtregionen im Rahmen der Plausibilisierung berücksichtigt. Da die Klassifikation der Regionen mit hohen Besiedlungsdichten verbunden ist, wird erwartet, dass

der Bevölkerungsanteil in den ausgewiesenen Gebieten größer ist als der der Bebauung. Abbildung 5.2 veranschaulicht das Verhältnis zwischen der bebauten Fläche (linkes Diagramm) und der Bevölkerung (rechtes Diagramm) gegliedert nach Anteilen außerhalb beziehungsweise innerhalb der einzelnen Regionen im untersuchten Gebiet. Insgesamt betrachtet wird die Hypothese bestätigt, da auf nur 43,6% der bebauten Fläche 49% der Bevölkerung leben. Auch wenn dieser Umstand nicht auf alle in der Arbeit ausgewiesenen Stadtregionen zutrifft – Turin-Milan-Venice beheimatet beispielsweise nur 4% der Bevölkerung auf 4,2% der Fläche –, ist es doch beim Großteil der Fall. Ein extremes Beispiel dafür ist die Region London, die auf nur 2,8% der gesamten bebauten Fläche im untersuchten Gebiet trotzdem 4,1% der Bevölkerung beherbergt, was auf eine stark urbanisierte Region schließen lässt. Lässt man die bebauten Fläche außen vor und betrachtet das gesamte Gebiet, das von den Stadtregionen eingenommen wird, lässt sich festhalten, dass sich die oben erwähnten 49% der Bevölkerung auf nur 6,1% der Fläche konzentrieren.

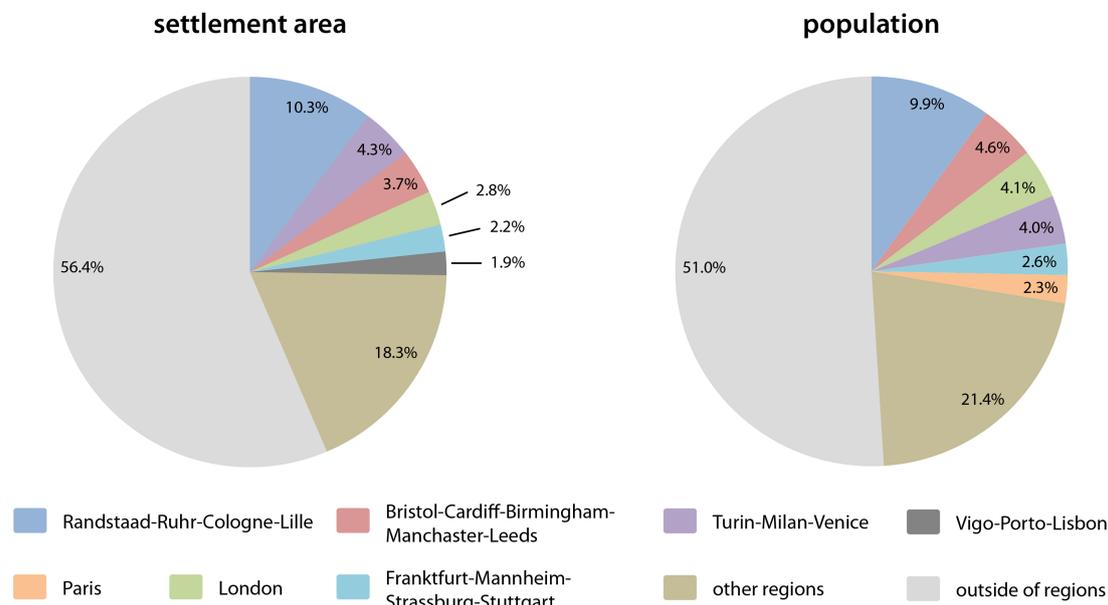


Abbildung 5.2: Plausibilisierung der Stadtregionen über den Vergleich der Bevölkerungsverteilung mit der Siedlungsfläche

Neben diesen statistischen Werten lassen sich die Regionen auch über andere, Regionenbildende Konzepte plausibilisieren. Im Allgemeinen korrespondieren die territorial abgegrenzten Regionen sehr gut mit den Megaregionen, die von Florida u. a. 2008 vorgeschlagen wurden (siehe Abbildung 5.3) und ebenfalls von Erdbeobachtungsdaten (nächtliche Beleuchtung) abgeleitet wurden. Nichtsdestotrotz sind vereinzelte Abweichungen festzustellen. Beispielsweise schlagen die Autoren eine Megaregion vor, die sich von Mailand durch ganz Italien bis nach Kalabrien zieht. Ferner erfasst die Klassifikation dieser Arbeit alle acht Fokusregionen des POLYNET Projektes (Hall und Pain 2006), in dem funktionale Verflechtungen polyzentrischer Stadtregionen vergleichend untersucht wurden. Dabei wurden die Regionen Brüssel, Rhein-Main, Rhein-Ruhr, Paris (Ile-de-France), London (Südostengland), Dublin, Amsterdam (Deltametropolis) und die Metropolregion Zürich ausgewählt (Universität Heidelberg 2008). Ein hervorzuhebender Unterschied zwischen beiden Klassifikationen ist, dass die Regionen Amsterdam, Rhein-Main und Rhein-Ruhr mit dem in dieser Arbeit verwendeten Ansatz (über die Besiedlungsdich-

te) als eine zusammenhängende Region detektiert wurden. Das Pentagon, welches vom Europäischen Raumentwicklungskonzept (engl. European Spatial Development Perspective) als Kerngebiet in Europa und einzige „globale Integrationszone“ identifiziert wurde (ESPON 2005), ist ein zwischen London, Hamburg, München, Mailand und Paris aufgespanntes Polygon.

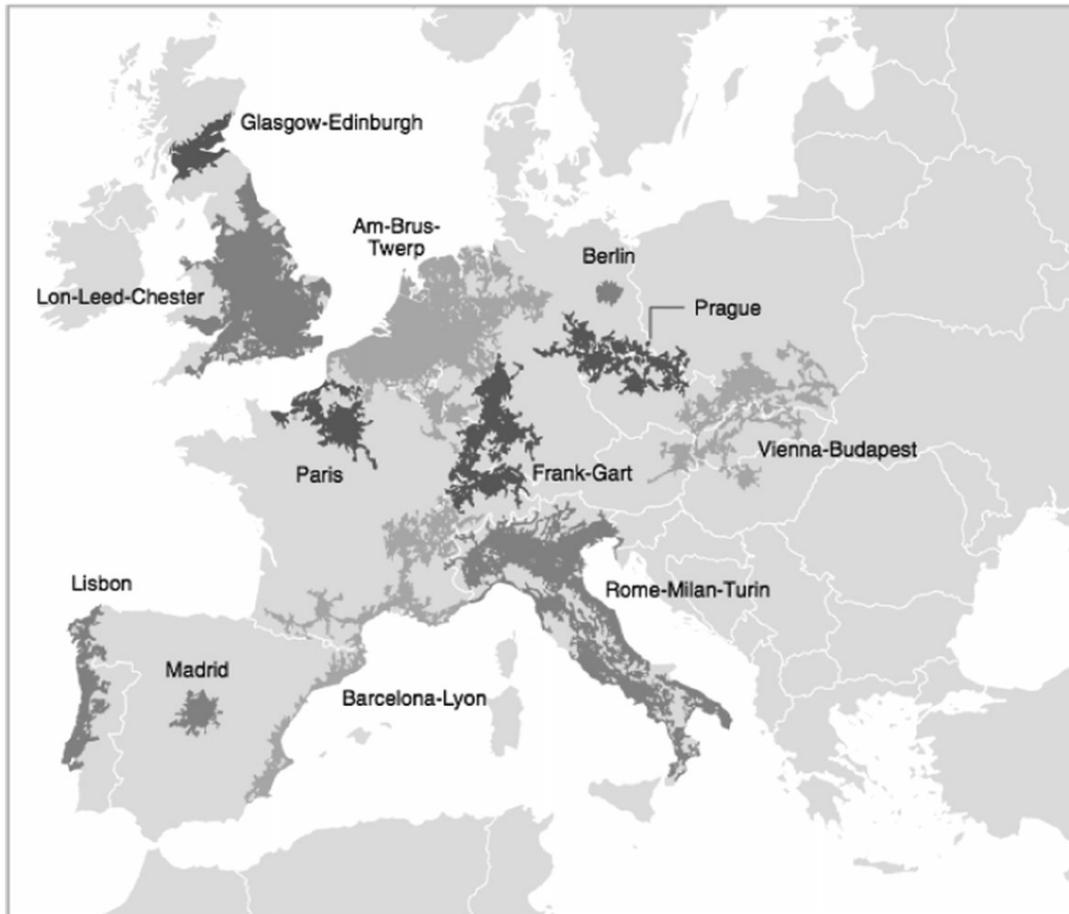


Abbildung 5.3: Europas Megaregionen nach Florida u. a. 2008 (Bildquelle: Florida u. a. 2008, S. 471)

6 Schlussbetrachtung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass Daten zu Siedlungsmustern, die mit den Mitteln der Erdbeobachtung aufgenommen wurden und die visuelle Ausprägung urbaner Konzentration darstellen, ein nützliches Mittel zur lokalen Ermittlung neuartiger regionaler Phänomene sind. Diese wurden anhand der räumlichen Verbindung von urbanen Knotenpunkten sowohl konkreten Territorien zugeordnet, als auch mit nicht-territorialen, aber in gewisser Weise räumlich gebundenen Regionen (z.B. Netzwerk aus Kostenpfaden) in Verbindung gebracht. Die territorialen Regionen wurden anhand verschiedener Parameter (Fläche, Anzahl urbaner Knotenpunkte, räumliche Kompaktheit der Knoten, Grad der räumlichen Konnektivität der Knoten) vergleichend analysiert und dementsprechend kategorisiert. Zur Umsetzung wurde die Methodik von Taubenböck, Wiesner u. a. 2014 und Taubenböck und Wiesner 2015 aufgegriffen, teilweise modifiziert und hinsichtlich der Bildung der Regionen und deren Kategorisierung erweitert. Mit dem GUF konnte ein hochaktueller, global verfügbarer und in seiner räumlichen Genauigkeit einzigartiger Datensatz verwendet werden, der nicht nur große und dichte urbane Agglomerationen, sondern auch das mitteldicht bebaute Umland und sogar kleine besiedelte Bereiche in ländlichen Gebieten erfasst und so eine sehr genaue Analyse regionaler Phänomene zulässt. Mit den in dieser Arbeit erzeugten Räumen können ungleiche Entwicklungen auf kleiner Skala kartiert und so der Blick auf regionale Ähnlichkeiten und Unterschiede bezüglich der Siedlungsmuster in Europa geschärft werden.

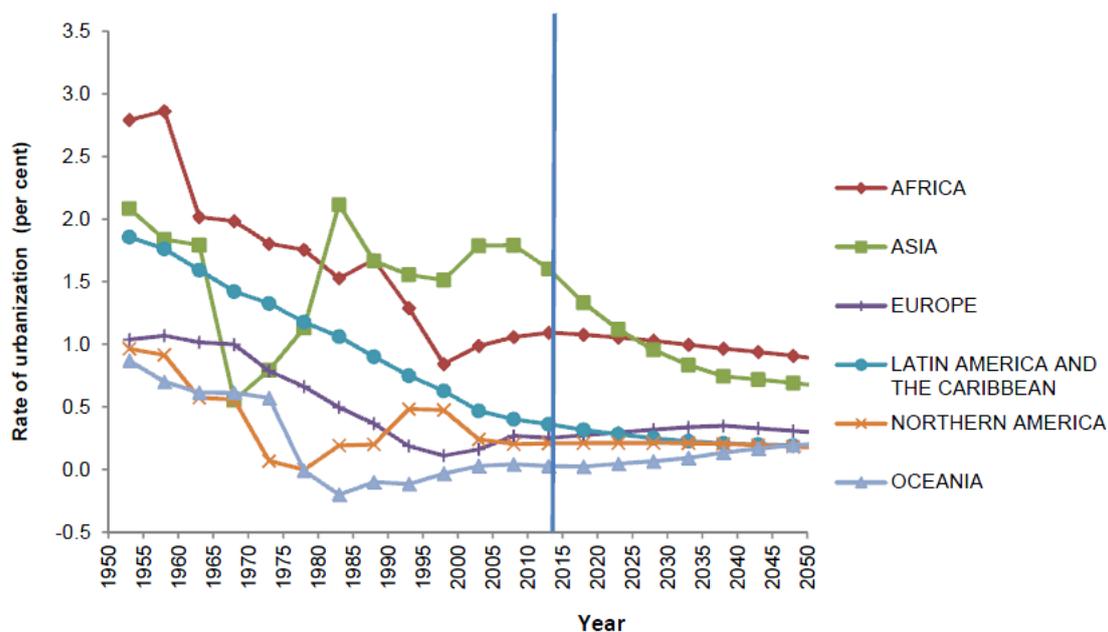


Abbildung 6.1: Urbanisierungsrate nach Großgebieten, 1950-2050 (Bildquelle: UN 2015a, S. 35)

Ein interessanter Aspekt für die Zukunft könnte sein, derartige Untersuchungen um eine multitemporale Komponente zu erweitern. Das Problem dabei ist, dass es für vergangene Zeiten keine Datensätze gibt, die eine Analyse mit ähnlicher Genauigkeit zuließen.

Also richtet sich der Blick in die Zukunft, in der der GUF und davon abgeleitete Daten (wie z.B. räumliche Verbindungslinien und Regionen; siehe Abbildung 4.2 und 4.1) dann als zeitlich früheste Ebene einer Zeitreihenanalyse dienen könnten. Des Weiteren liegt es schon aufgrund des Namens *Global Urban Footprint* nahe, dieselbe Untersuchung auf anderen Kontinenten durchzuführen oder sogar auf eine globale Ebene auszudehnen, um erdteilspezifische und auch Unterschiede in einem kleineren Maßstab zu erfassen.

Auch wenn die Urbanisierungsraten (Zuwachs des Anteils der Stadtbevölkerung an der Gesamtbevölkerung) bis 2050 größtenteils sinken und stagnieren werden (Abbildung 6.1), steht doch ein stetiges Wachstum der Stadtbevölkerung bevor (UN 2015a). Die Bewegung der Menschen vom Land in die Städte wird die letzte große Wanderungsbewegung der Menschheit in dieser Größenordnung sein (Saunders 2011). Neben den Auswirkungen von Transportationsnetzwerken, der Globalisierung und anderen Prozessen ist die Urbanisierung einer der treibenden Prozesse des globalen Wandels. Sie wird die Welt der Zukunft stark prägen und muss deshalb so gut wie möglich untersucht und verstanden werden. Dies ist eine wichtige Voraussetzung um in der Lage zu sein nötige Entscheidungen treffen und wichtige Maßnahmen ergreifen zu können, welche die negativen Auswirkungen der Urbanisierung (z.B. Ausbreitung von Slums, Umweltverschmutzung etc.) auf ein Minimum reduzieren sollen. Das Ziel dieses Phänomen allumfassend in seiner Gesamtheit zu analysieren und möglichst gut zu verstehen bedarf allerdings vieler verschiedener Perspektiven aus unterschiedlichen Disziplinen der Forschung. Die vorliegende Studie ist nur kleiner Beitrag zur Erweiterung des empirischen Wissens über globale Urbanisierung und ihre lokal unterschiedlichen Ausprägungen.

Literatur

- Brenner, N. und Schmid, C. (2014). "The urban agein question". In: *International Journal of Urban and Regional Research* 38.3, S. 731–755.
- Brezzi, M., Dijkstra, L. und Ruiz, V. (2011). "OECD Extended Regional Typology: The Economic Performance of Remote Rural Regions". In: *OECD Regional Development Working Papers* 06. URL: <http://dx.doi.org/10.1787/5kg6z83tw7f4-en>.
- Büttner, G. u. a. (2004). "The CORINE land cover 2000 project". In: *EARSeL eProceedings* 3.3, S. 331–346.
- Cheng, J. u. a. (2013). "Understanding urban networks: Comparing a node-, a density-and an accessibility-based view". In: *Cities* 31, S. 165–176.
- Crutzen, P. J. (2002). "Geology of mankind". In: *Nature* 415.6867, S. 23–23.
- Danko, D. M. (1992). "The digital chart of the world project". In: *Photogrammetric engineering and remote sensing* 58.8, S. 1125–1128.
- Dicken, P. (1998). *Global shift: transforming the world economy*. Guilford Press.
- Dijkstra, L. und Poelmann, H. (2014). "A harmonised definition of cities and rural areas: the new degree of urbanization". In: *European Commission Urban and Regional Policy. Working paper* 1, S. 2014.
- DLR (2016). *Corine Landcover - Bodenbedeckungsdaten für Deutschland*. URL: http://www.corine.dfd.dlr.de/intro_de.html (besucht am 11.05.2016).
- DLR (2014). *Die Spur des Menschen - Siedlungsmuster aus dem All*. (CC-BY 3.0). URL: <http://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabid-9630/#gallery/24114> (besucht am 11.05.2016).
- Donnay, J.-P., Barnsley, M. und Longley, P. A. (2001). *Remote sensing and urban analysis*. Taylor und Francis.
- EEA (2011). *Urban morphological zones 2000*. URL: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-morphological-zones-2000-1> (besucht am 12.04.2016).
- EEA (2013). *EEA reference GRID*. URL: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eea-reference-grids-2> (besucht am 12.04.2016).
- EEA (2014). *Urban morphological zones - Methodology*. URL: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/urban-morphological-zones-2000-2#tab-methodology> (besucht am 15.02.2016).
- EFGS (2016). *Data - GRID data for download per country*. URL: <http://www.efgs.info/data/> (besucht am 13.04.2016).
- EFGS (2013). *Production procedures for a harmonised European population grid - Aggregation method*. URL: <http://www.efgs.info/wp-content/uploads/geostat/1b/GEOSTAT1B-Appendix1-production-procedures-bottom-up.pdf> (besucht am 15.07.2016).
- Esch, T., Marconcini, M. u. a. (2013). "Urban footprint processorFully automated processing chain generating settlement masks from global data of the TanDEM-X mission". In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 10.6, S. 1617–1621.
- Esch, T., Schenk, A. u. a. (2011). "Characterization of land cover types in TerraSAR-X images by combined analysis of speckle statistics and intensity information". In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49.6, S. 1911–1925.

- Esch, T., Taubenböck, H. u. a. (2012). "TanDEM-X missionnew perspectives for the inventory and monitoring of global settlement patterns". In: *Journal of Applied Remote Sensing* 6.1, S. 061702–1.
- ESPON (2005). *ESPON Project 1.1.1: The Role, Specific Situation and Potentials of Urban Areas as Nodes in a Polycentric Development. Final Report; Final Version, 31 March*.
- ESRI (2016a). *Kostenentfernung*. URL: <http://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-distance.htm> (besucht am 02.06.2016).
- ESRI (2016b). *Kostenpfad*. URL: <http://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-path.htm> (besucht am 02.06.2016).
- ESRI (2016c). *Kostenrückverknüpfung*. URL: <http://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/cost-back-link.htm> (besucht am 02.06.2016).
- ESRI (2016d). *Was ist eine TIN-Oberfläche?* URL: <http://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/manage-data/tin/fundamentals-of-tin-surfaces.htm> (besucht am 31.05.2016).
- Eurostat (2016a). *Annex 2 - Cities participating in the Urban Audit data collection*. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/documents/4422005/6840613/Ryb-2015-Annex2-Cities-CandK.pdf> (besucht am 11.07.2016).
- Eurostat (2016b). *Lokale Verwaltungseinheiten (LAU)*. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/de/web/nuts/local-administrative-units> (besucht am 09.05.2016).
- Eurostat (2016c). *Städte-Audit*. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/administrative-units-statistical-units/urban-audit#ua11-14> (besucht am 11.07.2016).
- Eurostat (2016d). *Urban-rural typology*. URL: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Urban-rural_typology (besucht am 09.03.2016).
- Eurostat (2012). *Eurostat regional yearbook 2012*. Hrsg. von. Önnersfors. Publications Office of the European Union.
- Eurostat (2015). *Regions in the European Union - Nomenclature of territorial units for statistics - NUTS 2013/EU-28*. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/-/KS-GQ-14-006> (besucht am 13.04.2016).
- Felbier, A. u. a. (2014). "The global urban footprintProcessing status and cross comparison to existing human settlement products". In: *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, S. 4816–4819.
- Florida, R. (2014). *The Rise of the Creative Class–Revisited: Revised and Expanded*. Basic books.
- Florida, R., Gulden, T. und Mellander, C. (2008). "The rise of the mega-region". In: *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society* 1.3, S. 459–476.
- GEOSTAT (2011). *GEOSTAT 1km Bevölkerungsraster*. URL: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/gisco/geodata/reference-data/population-distribution-demography/geostat#geostat11> (besucht am 16.02.2016).
- UN-Habitat (2008). *State of the World's Cities 2008-2009: Harmonious Cities*. Earthscan.
- Hall, P. G. und Pain, K. (2006). *The polycentric metropolis: learning from mega-city regions in Europe*. Routledge.
- Harrison, J. und Hoyler, M. (2015). "Megaregions: foundations, frailties, futures". In: *Megaregions: Globalizations New Urban Form*, S. 1–28.
- Heidenreich, M. (1998). "The changing system of European cities and regions". In: *European Planning Studies* 6.3, S. 315–332.

- Hospers, G.-J. u. a. (2002). "Beyond the Blue Banana? Structural Change in Europe's Geo-Economy". In: *42nd European Congress of the Regional Science Association*, S. 19.
- Huber, S., Younis, M. und Krieger, G. (2010). "The TanDEM-X mission: overview and interferometric performance". In: *International Journal of Microwave and Wireless Technologies* 2.3-4, S. 379–389.
- IAURIF (1991). "La Charte de Lille de France". In: *Les Cahiers de l'IAURIF* 97, S. 98.
- INSPIRE (2016). *About INSPIRE*. URL: <http://inspire.ec.europa.eu/index.cfm/pageid/48> (besucht am 12.04.2016).
- INSPIRE (2014). *D2.8.I.2 Data Specification on Geographical Grid Systems Technical Guidelines*. URL: http://inspire.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/INSPIRE_DataSpecification_GG_v3.1.pdf (besucht am 12.04.2016).
- Jenks, G. F. und Caspall, F. C. (1971). "Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction". In: *Annals of the Association of American Geographers* 61.2, S. 217–244.
- JUGEM (2016). URL: <http://blog.archiphoto.info/?eid=962873> (besucht am 21.07.2016).
- Klotz, M., Kemper, T. u. a. (2016). "How good is the map? A multi-scale cross-comparison framework for global settlement layers: Evidence from Central Europe". In: *Remote Sensing of Environment* 178, S. 191–212.
- Klotz, M., Wurm, M. und Taubenböck, H. (2015). "Der Werkzeugkasten der urbanen Fernerkundung – Daten und Produkte". In: *Globale Urbanisierung*. Springer, S. 29–38.
- Krieger, G. u. a. (2007). "TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry". In: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45.11, S. 3317–3341.
- Lang, R. und Dhavale, D. (2005). "Beyond Megalopolis: Exploring Americas New Metropolitan Geography, Census Report 05: 01". In: *VA: Metropolitan Institute at Virginia Tech*.
- Ohndorf, A. (2014). *Erfolgreiche Formationsänderung der Satelliten*. URL: <http://www.dlr.de/blogs/home/tandem-x/erfolgreiche-formationsaenderung-der-satelliten.aspx> (besucht am 11.05.2016).
- Potere, D. und Schneider, A. (2009). "Comparison of Global Urban Maps". In: *Global Mapping of Human Settlement: Experiences, Datasets, and Prospects*, S. 269.
- Potere, D., Schneider, A. u. a. (2009). "Mapping urban areas on a global scale: which of the eight maps now available is more accurate?" In: *International Journal of Remote Sensing* 30.24, S. 6531–6558.
- RECLUS (1989). *Les villes europeennes: Report DATAR*. La Documentation française.
- Saunders, D. (2011). *Arrival city: The final migration and our next world*. Vintage Books Canada.
- Schafran, A. (2014). "Rethinking mega-regions: sub-regional politics in a fragmented metropolis". In: *Regional Studies* 48.4, S. 587–602.
- Schätzl, L. (1993). *Wirtschaftsgeographie der europäischen gemeinschaft*. F. Schöningh.
- Schöpfer, E., Pelizari, P. A. und Spröhnle, K. (2015). "Temporäre Siedlungen: Wenn aus Flüchtlingslagern Städte werden". In: *Globale Urbanisierung*. Springer, S. 71–81.
- Scott, A. J. (2001). "Globalization and the rise of city-regions". In: *European Planning Studies* 9.7, S. 813–826.
- Siedentop, S. (2015). "Ursachen, Ausprägungen und Wirkungen der globalen Urbanisierung – ein Überblick". In: *Globale Urbanisierung*. Springer, S. 11–21.

- Taubenböck, H. und Wiesner, M. (2015). "The spatial network of megaregions-Types of connectivity between cities based on settlement patterns derived from EO-data". In: *Computers, Environment and Urban Systems* 54, S. 165–180.
- Taubenböck, H., Wiesner, M. u. a. (2014). "New dimensions of urban landscapes: The spatio-temporal evolution from a polynuclei area to a mega-region based on remote sensing data". In: *Applied Geography* 47, S. 137–153.
- Taubenböck, H. und Wurm, M. (2015). "Globale Urbanisierung–Markenzeichen des 21. Jahrhunderts". In: *Globale Urbanisierung*. Springer, S. 5–10.
- Taubenböck, H., Wurm, M. u. a. (2011). "Flood risks in urbanized areas–multi-sensoral approaches using remotely sensed data for risk assessment". In: *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)* 11, S. 431–444.
- UN (2015a). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*.
- UN (2015b). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision [Highlights]*.
- Unit, E. I. (2012). "Super-sized Cities: Chinas 13 Megalopolises". In: *London: The Economist*.
- Universität Heidelberg (2008). *Polynet Rhein-Main*. URL: <http://www2.geog.uni-heidelberg.de/wiso/forschung/polynet.htm> (besucht am 19.07.2016).
- Weng, Q. und Quattrochi, D. A. (2006). *Urban remote sensing*. CRC Press.
- Wikimedia Commons (2009a). *Blaue Banane*. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Blaue_Banane#/media/File:Blue_Banana.svg (besucht am 12.07.2016).
- Wikimedia Commons (2009b). *EM-Spektrum*. URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EM-Spektrum.svg> (besucht am 20.07.2016).