

Urbanes Grün und Stadtklima – Analyse von Vegetation in europäischen Großstädten

Vegetation and Urban Climate – Study of Vegetation in Large European Cities

Matthias Möller^{1,2}, Klaudia Bartłomiejczak¹

¹Beuth Hochschule für Technik Berlin · mmoeller@beuth-hochschule.de

²Otto-Friedrich-Universität Bamberg

Zusammenfassung: Großstädte sind die Zentren unserer modernen Gesellschaft. Die Großstädte müssen für ihre Einwohner vitale Vegetation vorhalten, denn Bäume, Sträucher und Bodendecker sind wichtige Faktoren für das Stadtklima. In dieser Studie wurden 30 Großstädte der EU Kernländer Deutschland, Frankreich und Polen auf ihre Vegetation hin untersucht. Dafür wurden zunächst die eigentlichen Stadtgebiete abgegrenzt, was auf Basis von CORINE-CLC-Daten erfolgte. Auf Basis optischer Satellitenbilddaten des Sentinel-2, alle im Jahr 2019 aufgezeichnet, wurde die Vegetation berechnet. Hierfür kam der Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI) zur Anwendung. Die positiven NDVI Werte stellen Vegetation dar, sie wurden in 10 Klassen klassifiziert und analysiert. Als Ergebnis wird eine Rangfolge bezogen auf Vegetationsanteile für diese Regionen aufgestellt; die hier vorgestellte Methode kann als Vorlage für alle urbanen Regionen in der EU verwendet werden.

Schlüsselwörter: Sentinel-2, CORINE CLC, Fernerkundung, NDVI, Vegetation, Stadtklima

Abstract: *Large cities are the centers of the modern society. These Cities not only have to provide goods and services for the daily needs for their residents, it is also important to offer vital vegetation in green spaces. Trees, bushes and ground cover (e. g. shrubs, grass) play an important role regarding urban climate. A sufficient amount of vegetation increases the well-being of the residents. In this study, 30 large cities of the EU countries Germany, France and Poland were examined for their vegetation. In a first step the urban areas were outlined, which was done on the basis of CORINE CLC data. The vegetation was calculated using optical satellite image data from Sentinel-2, all recorded in 2019. The Normalized Differentiated Vegetation Index (NDVI) was applied to that data. Positive NDVI values represent healthy vegetation; they were classified and analyzed into 10 classes. The result is a ranking of urban green vegetation fraction for these regions; the method may be applied as a template for all urban regions in the EU.*

Keywords: *Sentinel-2, CORINE CLC, remote sensing, NDVI, vegetation, urban climate*

1 Einleitung

Urbane Regionen sind die Siedlungsräume der modernen Gesellschaft, hier leben Menschen auf relativ engem Raum in großer Zahl dicht zusammen. Die Einwohner wirtschaften, sind eng vernetzt und arbeitsteilig und nutzen ein großes Angebot an sozialen Dienstleistungen. In Deutschland leben in den 80 Großstädten im Jahr 2018 mehr als 30 % der Gesamtbevölkerung (26,4 Mio. Personen). Als Großstädte werden per Definition (BBSR, 2020) urbane Gebiete bezeichnet, die mehr als 100.000 Einwohner aufweisen, die auch einen hohen Versorgungsgrad der Bevölkerung gewährleisten, ausreichend Arbeitsplätze vorhalten und somit

eine hohe Zentralität haben. Dadurch steigt auch die Attraktivität der Großstädte für Bewohner, sie haben ein gesichertes Einkommen, eine gut ausgebaute Versorgung, sie können ihr Geld mit einem breiten Unterhaltungsangebot vielfältig ausgeben und letztlich einen zufriedenstellenden Lebensstandard realisieren.

Ist die Siedlungsfläche begrenzt, was bei fest definierten administrativen Grenzen zwangsläufig der Fall ist, dann steigen mit der Attraktivität einer Stadt auch die Preise für Immobilien, der Druck auf das Land im Stadtgebiet nimmt zu. Dies kann dazu führen, dass sehr dicht bebaut wird. Nachverdichtung ist heute vielerorts gewünscht, aber die Effekte werden auch kontrovers diskutiert. Denn dichte Bebauung gewährleistet einerseits kurze Wege in der Stadt, sei es zur Arbeitsstelle und/oder zu anderen Versorgungseinrichtungen. Bei einer gut ausgebauten ÖPNV Infrastruktur sollte damit -im Vergleich zum Umland- die Emission von CO₂ pro Einwohner in Großstädten geringer sein, ein deutlicher Vorteil also, bezogen auf die Diskussionen zu diesem Treibhausgas. Bei hoher Verdichtung im städtischen Raum verringert sich andererseits der Anteil von urbaner Vegetation. Grundstücke werden kleiner, effizienter und dichter bebaut, Gartenanteile schrumpfen oder fallen ganz weg, städtische Parks werden zurückgedrängt und weichen mehr und mehr urbaner Bebauung. Die Untersuchung der Erreichbarkeit von urbanen Grün- und Parkanlagen durch die Bevölkerung ist eine besondere Betrachtung und findet in einem großen Maßstab statt (Oehrlein et al., 2019).

Bei geringer oder weitgehend fehlender Vegetation und einen hohen Grad der Versiegelung kann das Phänomen der urbanen Wärmeinsel auftreten Urban Heat Island (UHI vgl. Oke et al., 1973). Heiße Sommernächte, in denen die Abkühlung gering ist, verursachen Hitzestress, auch ernste gesundheitliche Beeinträchtigungen (etwa Herz-Kreislaufprobleme) bei den Bewohnern sind zu beobachten, hier sind insbesondere ältere Personen und Kinder gemeint. Im Sommer 2003 etwa wurden in Paris 40.000 Tote zusätzlich gezählt, als im Mittel. Die heißesten Lufttemperaturen wurden in Deutschland in den vergangenen 20 Jahren gemessen, eine Zunahme heißer Sommernächte ist aufgrund der globalen Erwärmung bereits heute prognostiziert (vgl. dazu Umweltbundesamt, 2020).

Vegetation hat eine ausgleichende Funktion bezogen auf das urbane Klima, kann die Temperaturen deutlich senken und damit das Phänomen der UHI verkleinern. Drei Effekte sind maßgeblich:

1. Durch die Verdunstung der Bäume, der mittleren und der bodennahen Vegetation wird thermale Energie in latente Energie umgesetzt, eine höhere Luftfeuchtigkeit ist die Folge und durch den Phasenübergang wird der Luft Energie in Form von Wärme entzogen.
2. Die Blätter von Bäumen wirken wie ein Filter auf Luft, die mit Mikropartikeln belastet ist. Die kleinen Teilchen lagern sich auf der Oberfläche von Blättern ab, vor allem Asthmatiker, aber auch wiederum ältere Personen und kleine Kinder profitieren von dieser Filterfunktion.
3. Bodennahe Vegetation, hauptsächlich Rasenflächen in Parks also, kühlen sich in den heißen Sommernächten aufgrund der hohen Ausstrahlung stärker ab als die Umgebung und tragen somit zur Kühlung bei. Werden am Rande von Großstädten solche kühlenden Flächen identifiziert, dann sollte die kühlere, frische Luft über freie Schneisen (sog. Kaltluft- und/oder Frischluftschneisen) in das überhitzte Zentrum geleitet werden. Der Effekt ist zwar von der Wirkung her begrenzt, trägt aber zur Ventilation des Stadtklimas bei.

Dem urbanen Grün kommt in Bezug auf das Stadtklima eine sehr wichtige Aufgabe zu. Ein weiterer Aspekt ist, dass urbane Parks als innerstädtische Erholungsorte für die Einwohner

sehr attraktiv sind. Allgemein wirkt grüne Vegetation auf das menschliche Wohlfühlen positiv, es beruhigt und entspannt den Geist (Bläser et al., 2012).

Eine vergleichende Studie zu Vegetation in Großstädten soll angestellt werden, um Aussagen treffen zu können, wo besonders viel urbane Vegetation vorhanden ist und wo ggf. Potenzial für mehr Vegetation gegeben ist. Auf Basis aktueller Satellitenbilddaten, die nach einem einheitlichen Schema analysiert werden, soll der Anteil von Vegetation im Vergleich zur gesamten besiedelten Fläche in ausgewählten Großstädten festgestellt werden.

Damit sollen Defizite, aber auch Potenziale für urbane Regionen aufgezeigt werden; mit dem Ergebnis soll eine Rangfolge aufgestellt werden, die die defizitären Regionen ggf. zu Nachbesserungen anreizen könnte.

2 Ausgewählte Großstädte Europas als Untersuchungsgegenstand

Die hier eingeführte Methodik der Analyse soll übertragbar auf alle urbanen Regionen in Europa, bei entsprechender Geodatenlage der Landnutzung/Landbedeckung auch weltweit sein. Ein weiterer Vorteil der entwickelten Methodik ist es, dass sie weitgehend standardisiert ist. In dieser Studie beschränken sich die Autoren zunächst auf die Betrachtung der drei Kernländer Nordeuropas, Deutschland, Frankreich und Polen.

2.1 Demographische Parameter Deutschlands, Frankreichs, Polens

Die Einwohnerzahl, die Flächengröße und damit die Bevölkerungsdichte von Deutschland, Frankreich und Polen sind verschieden, vgl. auch Tabelle 1 (Daten von EUROSTAT, 2020). Frankreich und Polen haben in etwa dieselbe Einwohnerdichte, in Deutschland ist die Einwohnerdichte annähernd doppelt so hoch; hier lebt die mit Abstand größte Bevölkerungszahl auf einer vergleichsweise kleinen Fläche. Die Verteilung der Bevölkerung in der Fläche ist in allen drei Ländern verschieden, es kommt zu sehr dicht besiedelten Räumen.

Tabelle 1: Bevölkerung, Großstädte und Einwohnerzahlen in DE, FR, PL

	DE (2018)	FR (2016)	PL (2014)
Größe in km ²	357.000	544.000 (Kernland)	313.000
Einwohner	83.000.000	67.000.000	38.500.000
Siedlungsdichte EW/km ²	232,5	123,16	123
Großstädte (> 100.000 EW)	80	44	39
EW in Großstädten (× 1.000)	26.411	21.575	12.597
EW Großstädte (mean)	330.133	490.345	322.991
Anzahl Großstädte EW > 1.000.000	4	2	2
Anzahl der Großstädte EW > 250.000 und ≤ 1.000.000	22	11	10
Anzahl der Großstädte EW ≤ 250.000	54	31	27

In Frankreich ist die Konzentration auf die Agglomeration Paris hervorzuheben, hier leben nach EUROSTAT 2020 annähernd 10 Mio. Einwohner, als weitere Millionenstadt ist in FR noch Lyon zu nennen. In Polen ist die Metropole Warschau mit rd. 1,7 Mio. Einwohnern das Zentrum des Landes, es gibt keine weitere Millionenstadt. In Deutschland liegt die Metropole Berlin mit rd. 3,6 Mio. EW weit vor Hamburg, München und Köln.

2.2 Ausgewählte Großstädte Deutschlands, Frankreichs, Polens

Die durchgeführte Analyse der Vegetation in urbanen Gebieten wurde exemplarisch an den fünf zahlenmäßig größten und den fünf kleinsten Großstädten in den drei EU-Ländern durchgeführt. Als Ergebnis soll ein Ranking, eine qualitative und objektive Abschätzung des Vegetationsanteils präsentiert werden. Diese 30 Großstädte sind in Tabelle 2 gelistet.

Tabelle 2: Ausgewählte Großstädte und deren Einwohnerzahlen

Großstadt (DE)	EW 2018	Großstadt (FR)	EW 2016	Großstadt (PL)	EW 2014
Berlin	3.613.495	Paris	9.803.494	Warschau	1.735.442
Hamburg	1.830.584	Lyon	1.074.695	Kraków	761.873
München	1.456.039	Marseille	893.802	Lódz	706.004
Köln	1.080.394	Nice	672.557	Breslau	634.487
Frankfurt a. Main	746.878	Bordeaux	642.778	Posen	545.680
Salzgitter	104.548	Bayonne	114.029	Tarnów	111.376
Moers	103.949	Pau	110.214	Chorzów	110.337
Siegen	102.337	Avignon	109.934	Köslin	108.605
Hildesheim	101.744	Troyes	105.930	Kalisch	103.373
Cottbus	101.036	Valenciennes	103.431	Legnitz	101.343

Eine Besonderheit stellt die Stadt Chorzów dar, denn die Region um Chorzów besteht aus vielen miteinander vernetzten Städten mit insgesamt ca. 1,9 Mio. EW, sie bildet also einen geschlossenen, zusammenhängenden urbanen Agglomerationsraum.

3 Geodaten und Analysemethoden

3.1 Vorüberlegungen zur Abgrenzung des Untersuchungsraumes

Es muss eine Entscheidung bzgl. der geographischen Abgrenzung der Untersuchungsgebiete angestellt werden. Wenig zielführend ist es, dass administrative Raumeinheiten als Untersuchungsgebiete verwendet werden. In den Ländern Europas ist die Raumgliederung verschieden (vgl. NUTS), sie stammt aus historischen Gegebenheiten, die administrative Fläche einer Stadt ist selten identisch mit der Siedlungsfläche. So hat eine Stadt mit vergleichsweise großer administrativer Fläche und geringer Bevölkerungszahl einen kleinen Siedlungskern und ein überwiegend landwirtschaftlich genutztes Umland mit entsprechend hohen Vegetationsanteilen. Dies würde das Bild verzerren, bezogen auf die Vegetation im urbanen Gebiet. Eine objektive Aussage und die Vergleichbarkeit der 30 Gebiete wäre somit erschwert. Daher wurde auf externe, verifizierte, offizielle Geodaten zurückgegriffen.

3.2 CORINE-CLC-Geodaten

CORINE CLC (Coordination of Information on the Environment, CORINE Landcover) ist ein Geodatensatz, der für die gesamte Fläche der EU inklusive der Schweiz und der Türkei die Landnutzung und Landbedeckung (engl. Land Use Land Cover, LULC) beinhaltet (EEA1985). Der große Geodatensatz wurde auf Basis von manuell ausgewerteten Satellitenbilddaten erstellt, was in 44 thematischen Klassen resultiert. In dieser Untersuchung wurde der aktuelle CORINE-CLC-Datensatz aus dem Jahr 2018 im Rasterformat mit einer Pixelgröße von 100 m verwendet.

3.3 Sentinel-2 Bilddaten

Sentinel-2a/b sind die Satelliten im Copernicus Programm der ESA, die optische Bilddaten der Erdoberfläche aufzeichnen. Im VNIR (Visible Near InfraRed) bieten Sentinel-2 Bilddaten eine feine geometrische Auflösung von 10 m und sind damit auch für die großmaßstäbige Erfassung urbaner Gebiete geeignet; etwa im Maßstabsbereich bis zu 1:15.000. Mit einer 12bit Radiometrie sind die Graustufen zudem fein abgestuft; das wiederum ermöglicht eine Trennung auch von spektral sehr ähnlichen Objekten. Alle Bilddaten sind bereits georeferenziert und mit der jeweiligen UTM Projektion korrigiert. Die Sentinel-2 Bilddaten wurden über den USGS Earthexplorer (2020, Sentinel-2 [ESA] image courtesy of the U.S. Geological Survey) bezogen. Dann wurden alle 30 Stadtregionen, die in 2.2 definiert wurden, entsprechend aus den Bilddaten ausgeschnitten.

Hier wurden ausschließlich Bilddaten aus dem Jahr 2019 und den Monaten mit vitaler, voll ausgeprägter Vegetation verwendet; dies sind in Europa die Monate: Mai, Juni, Juli. Alle Großstädte liegen in der Klimazone Cfb nach Geiger-Köppen (Kottek et al., 2006), sie können phänologisch direkt miteinander verglichen werden. Es kann zu kleinen Abweichungen der Vegetationsbewertung mit den CLC-Daten kommen, da CLC über einen Zeitraum von mehreren Jahren und auf Basis älterer FE-Bilddaten erstellt wurde.

4 Methodik

Hier wird die Methodik erklärt, mit der die Geodaten ausgewertet wurden. Wichtig war die Vorgabe, dass die Methodik reproduzierbar ist und auf andere Untersuchungsgebiete übertragbar ist. In dieser Analyse kam ausschließlich freie Software zum Einsatz, für die Prozessierung der Bilddaten wurde das Paket Multispec (Multispec, 2020) und für die Analyse im GIS das Paket QGIS (QGIS, 2020) verwendet.

4.1 Analyse der CORINE-CLC-Geodaten

Im CORINE-CLC-Geodatensatz wurden zunächst alle LULC-Klassen ausgewählt, die einer Nutzung als urbaner Siedlungsraum entsprechen. Dies sind nach dem CORINE-CLC-Klassifikationsschema die Klassen 111-142. Hängen diese Flächen lückenlos zusammen, so wurde der Siedlungsraum über die administrativen Grenzen der Stadt hinweg definiert. Daraus ergeben sich besondere Situationen, wie an den beiden folgenden Beispielen von Chorzów und Berlin dargestellt.

Die Stadt Chorzów ist eingebettet in die Metropolregion Górnoslaski Związek Metropolitalny. Dazu zählen neben der eigentlichen Stadt Chorzów (mit 110.337 EW) im Zentrum auch große, alte Industriestädte wie Katowice und Gliwice. Hier ist das Stadtgebiet von Chorzów klein, aber die Region – entsprechend den CORINE-CLC-Daten mit Klassen urbaner Nutzung – ist weit ausgedehnt (Abb. 1 links), gemäß den Vorgaben in dieser Untersuchung. Somit ergibt sich hier ein Gebiet mit der Ausdehnung von ca. 60×30 km und einer Flächen-größe von 476,58 km².

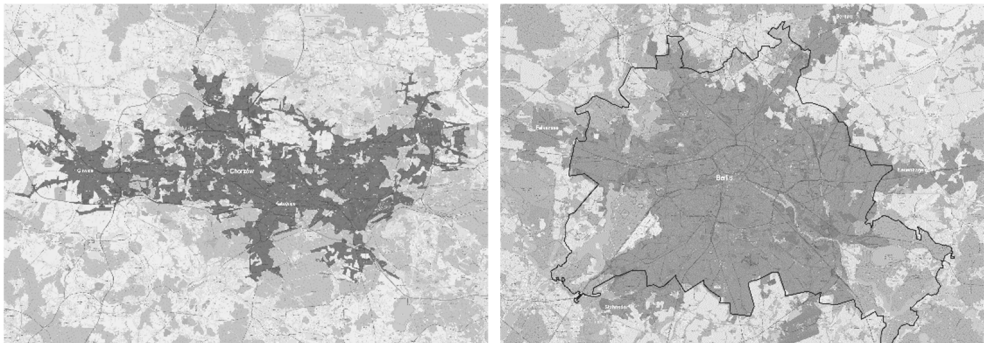


Abb. 1: Metropolregion Górnoslaski Związek Metropolitalny mit Chorzów im Zentrum (links); Größe des Ausschnitts ca. 60×30 km; grau hinterlegt sind die CORINE-CLC-Daten mit urbaner Nutzung. Berlin mit Stadtgrenze (rechts); Größe des Ausschnitts ca. 55×57 km; grau hinterlegt sind die CORINE-CLC-Daten mit urbaner Nutzung. Hintergrundkarte: OSM, CC-BY-SA, OSM Mapper.

Für Berlin ergibt sich ein zusammenhängender Siedlungsraum, der in Abb. 1 rechts als graue Fläche mit einer Größe von ca. 736,35 km² abgebildet ist, die Grenze des Landes Berlin (in Abb. 1 rechts als schwarze Linie dargestellt) umschließt eine administrative Fläche von rd. 879 km². Diese Siedlungsräume stellen also das für jede Großstadt gültige Untersuchungsgebiet dar, das mal größer, mal kleiner, aber meist nicht identisch ist mit dem administrativen Gebiet. Man erkennt im Westen Berlins den Ort Falkensee, der mit der Siedlungsfläche Berlins verbunden ist, im Südwesten die Gemeinde Stahnsdorf, im Südosten ist eine Siedlungsachse nach Schönefeld, zum neuen Hauptstadtflughafen ausgeprägt, im Nordosten reicht der zusammenhängende urbane Siedlungsraum bis nach Bernau. Große Waldflächen, wie etwa der Grunewald und auch der Berliner Stadforst Köpenick sind hingegen explizit ausgeschlossen von der Analyse; diese Gebiete – obwohl sehr wichtig für das urbane Klima und für Zwecke der Naherholung – zählen in dieser Studie nicht zur urbanen Vegetation des Untersuchungsgebietes von Berlin.

4.2 Auswertung der Sentinel-2-Bilddaten

Die Sentinel-2 Bilddaten wurden zu einem vier-kanaligen Multispektralbild mit den Kanälen VNIR (Blau – Grün – Rot – nahes IR) prozessiert und dann wurde das jeweilige Untersuchungsgebiet großräumig ausgeschnitten. Aus dem resultierenden Bildausschnitt wurde dann über den Quotienten des nahen Infraroten und des roten Spektralkanals der NDVI (vgl. Albertz, 2001) berechnet.

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{ROT}) / (\text{NIR} + \text{ROT})$$

Der NDVI hat sich als robuster Index bewiesen und bringt, auf Sentinel-2 Bilddaten angewendet, verlässliche Ergebnisse. Vitale Vegetation reflektiert im Nahen IR sehr stark, im roten Spektrum wesentlich geringer. Somit stellt der Wert des NDVI ein absolutes Maß für das Vorhandensein von Vegetation, bzw. von Vegetationsanteilen dar. Die aus der NDVI-Berechnung resultierenden Bilder sind im Grauwertebereich -1 bis $+1$ normiert. Negative Werte stehen z. B. für Wasser, Werte um den Bereich 0 herum für eine Bebauung oder offenen Boden und positive Werte zeigen immer einen Anteil von Vegetation; folglich gilt: je höher ein positiver NDVI, desto größer der Anteil vitaler Vegetation. Alle berechneten NDVI-Werte wurden in 20 Klassen (im Wertebereich von -1 bis 1) zusammengefasst, also gruppiert in Klassen mit einer Breite von jeweils $0,1$ Wertepunkten. Für diese Klassifikation von Grauwerten hat sich das QGIS-Plug-in Slicer (Slicer 2020) als nützlich erwiesen.

5 Urbanes Grün in 30 Großstädten

5.1 Quantitativer Vergleich der Vegetation

Aus der Berechnung des NDVI wurden ausschließlich die positiv besetzten Werteklassen ausgewählt, also die 10 Klassen im Wertebereich von 0 bis 1 . Für diese positiven Klassen konnten die Flächen in den Untersuchungsgebieten berechnet werden; sie sind in Abbildung 2 grafisch dargestellt. Diese 10 Klassen stellen die reine Bebauung, bzw. im Gegensatz Vegetation dar, denn die Klasse „Wasser“ wurde schon durch die Selektion der CORINE-CLC-Klassen ausgeklammert.

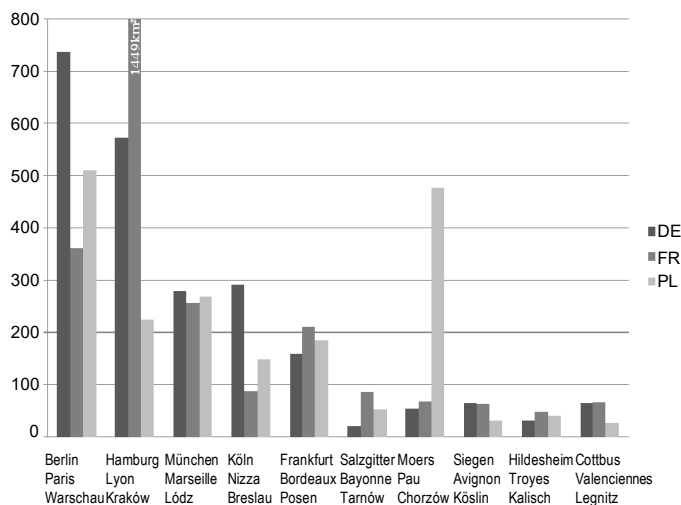


Abb. 2:
Vergleich der mit Vegetation bestandenen Flächen in den Untersuchungsgebieten (Größe in km²)

Die mit weitem Abstand größten Fläche an Vegetationsanteilen weist das Untersuchungsgebiet Lyon (1449,83 km²) auf, mehr als doppelt so groß ist hier die Fläche verglichen mit Berlin (736,35 km²), das auf dem zweiten Platz liegt. Das Untersuchungsgebiet um Chorzów (476,58 km²) fällt ebenfalls durch seine Größe auf, dies erklärt sich über die außergewöhnliche Ausprägung des Gebietes, wie schon in 4.1 erläutert.

Im nächsten Schritt wurden nun die Vegetationsanteile prozentual zur Gesamtfläche der positiv besetzten NDVI-Werteklassen berechnet. In Tabelle 3 sind die 10 positiven NDVI-Klassen im Wertebereich 0 bis 1 flächenanteilig prozentual dargestellt. Je höher der NDVI-Wert der Klasse, desto höher ist der Vegetationsanteil und folglich desto positiver die Wirkung auf das Stadtklima. Hier fallen mit vergleichsweise wenig Vegetation die Untersuchungsgebiete Salzgitter und Cottbus in DE auf, in FR sind es Lyon, Marseilles und Avignon und in PL Posen und Legnitz.

Tabelle 3: Großstädte in DE, FR, PL; NDVI-Klassen 0,1 – 1; prozentuale Flächenanteile

NDVI-Kl.	Berlin	HH	München	Köln	FFM	Salzg.	Moers	Siegen	Hildes.	Cott.
0 – <0,1	5,7 %	7,0 %	6,1 %	8,4 %	8,5 %	22,3 %	7,8 %	6,7 %	7,0 %	3,7 %
0,1 – <0,2	7,7 %	7,2 %	8,7 %	9,7 %	11,4 %	13,3 %	9,0 %	7,1 %	9,8 %	12,9 %
0,2 – <0,3	8,6 %	6,4 %	10,3 %	9,5 %	10,8 %	8,3 %	10,8 %	7,6 %	9,4 %	22,1 %
0,3 – <0,4	10,9 %	8,0 %	11,9 %	10,2 %	11,2 %	7,8 %	11,6 %	10,6 %	10,9 %	13,2 %
0,4 – <0,5	12,4 %	10,1 %	11,9 %	10,3 %	10,8 %	6,9 %	11,5 %	12,9 %	11,7 %	10,3 %
0,5 – <0,6	13,7 %	11,7 %	11,5 %	10,5 %	10,9 %	7,1 %	11,3 %	13,6 %	12,4 %	10,2 %
0,6 – <0,7	14,2 %	13,4 %	11,5 %	11,1 %	11,3 %	7,6 %	11,4 %	13,4 %	13,7 %	9,6 %
0,7 – <0,8	13,4 %	15,0 %	12,4 %	11,7 %	11,4 %	8,7 %	10,9 %	12,1 %	13,1 %	8,3 %
0,8 – <0,9	12,4 %	17,9 %	12,8 %	13,2 %	11,7 %	13,5 %	11,2 %	13,7 %	10,1 %	7,9 %
0,9 – 1	0,8 %	3,4 %	2,8 %	5,4 %	1,9 %	4,4 %	4,6 %	2,3 %	1,9 %	2,0 %
gesamt % (km ²)	100 % (736,35)	100 % (573,30)	100 % (277,88)	100 % (290,57)	100 % (159,23)	100 % (19,86)	100 % (53,83)	100 % (65,62)	100 % (30,03)	100 % (65,31)

NDVI-Kl.	Paris	Lyon	Marseille	Nizza	Bord	Bayonne	Pau	Avign	Troyes	Valenc.
0 – <0,1	7,5 %	10,0 %	15,3 %	13,5 %	5,0 %	4,8 %	4,7 %	12,0 %	8,1 %	8,3 %
0,1 – <0,2	13,6 %	14,9 %	19,9 %	12,2 %	12,4 %	9,4 %	8,2 %	20,0 %	12,0 %	10,8 %
0,2 – <0,3	13,0 %	16,6 %	19,7 %	12,9 %	13,9 %	10,9 %	9,4 %	20,6 %	13,3 %	10,8 %
0,3 – <0,4	13,7 %	16,6 %	15,8 %	12,9 %	14,2 %	13,0 %	10,9 %	15,9 %	13,9 %	11,2 %
0,4 – <0,5	13,3 %	13,7 %	11,6 %	12,4 %	12,9 %	13,1 %	12,7 %	11,4 %	12,8 %	10,9 %
0,5 – <0,6	12,2 %	10,5 %	8,3 %	11,7 %	11,3 %	11,6 %	13,2 %	8,1 %	11,5 %	10,6 %
0,6 – <0,7	11,5 %	7,6 %	5,6 %	11,0 %	10,0 %	11,1 %	12,5 %	5,8 %	10,1 %	10,8 %
0,7 – <0,8	9,4 %	6,3 %	3,0 %	8,7 %	9,5 %	14,8 %	12,3 %	4,1 %	8,6 %	10,6 %
0,8 – <0,9	5,8 %	3,7 %	0,9 %	4,6 %	8,9 %	11,2 %	12,4 %	2,1 %	6,1 %	9,9 %
0,9 – 1	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	1,9 %	0,0 %	3,7 %	0,0 %	3,8 %	6,1 %
gesamt % (km ²)	100 % (361,65)	100 % (1449,83)	100 % (256,12)	100 % (86,84)	100 % (209,46)	100 % (85,00)	100 % (68,04)	100 % (63,56)	100 % (47,62)	100 % (67,24)

NDVI-Kl.	Warsch.	Krakau	Lodz	Breslau	Posen	Tarn	Chorzow	Köslin	Kali.	Legn
0 – <0,1	7,6 %	6,4 %	6,5 %	9,9 %	8,3 %	5,6 %	9,7 %	6,9 %	7,8 %	7,4 %
0,1 – <0,2	10,4 %	8,3 %	8,5 %	10,1 %	11,7 %	7,6 %	9,7 %	12,0 %	11,6 %	11,8 %
0,2 – <0,3	11,6 %	8,7 %	10,6 %	9,7 %	13,9 %	10,0 %	10,1 %	12,8 %	13,9 %	13,0 %
0,3 – <0,4	12,8 %	9,9 %	12,3 %	10,0 %	14,0 %	12,8 %	10,3 %	12,7 %	16,0 %	13,0 %
0,4 – <0,5	12,9 %	11,0 %	12,7 %	10,7 %	12,7 %	14,7 %	10,2 %	11,6 %	14,6 %	11,8 %
0,5 – <0,6	12,0 %	11,6 %	12,8 %	11,5 %	11,5 %	15,3 %	10,4 %	11,3 %	13,1 %	12,8 %
0,6 – <0,7	11,7 %	12,4 %	12,7 %	12,4 %	9,9 %	15,6 %	11,1 %	12,7 %	10,7 %	14,1 %
0,7 – <0,8	11,5 %	13,5 %	11,7 %	12,6 %	8,6 %	12,8 %	11,0 %	10,3 %	7,8 %	9,9 %
0,8 – <0,9	9,5 %	15,4 %	10,9 %	11,8 %	8,8 %	5,5 %	12,7 %	8,1 %	4,5 %	5,9 %
0,9 – 1	0,1 %	2,9 %	1,2 %	1,3 %	0,5 %	0,0 %	4,9 %	1,6 %	0,0 %	0,2 %
gesamt % (km ²)	100 % (511,06)	100 % (223,46)	100 % (267,44)	100 % (147,87)	100 % (185,77)	100 % (52,81)	100 % (476,58)	100 % (31,25)	100 % (39,6)	100 % (26,66)

Wichtig für das Stadtklima sind insbesondere die fünf NDVI-Klassen von 0,5 bis 1,0, diese stehen für große, vitale Vegetationsanteile. Wenn diese Klassen flächenanteilig überproportional ausgeprägt sind, so kann von einer positiven Auswirkung auf das Stadtklima ausgegangen werden. In Tab. 3 sind jeweils die beiden Untersuchungsgebiete mit den am höchsten ausgeprägten Vegetationsanteilen an der Gesamtfläche grau markiert.

5.2 Qualitativer Vergleich der Vegetation

In einer abschließenden Berechnung wurden die NDVI-Werte der fünf Klassen 0,5 bis 1,0 nochmals aggregiert. Die Ergebnisse daraus sind in Abbildung 3 vergleichend dargestellt. Man erkennt einen gleichmäßigen Vegetationsanteil in den Untersuchungsgebieten in DE, PL zeigt – mit Ausnahme von Tarnów – ein ähnliches Muster, in FR allerdings sind Schwankungen feststellbar. Avignon und Marseilles liegen im Süden Frankreichs und dort sind Vegetationsanteile aufgrund des trockeneren Klimas weniger ausgeprägt sind.

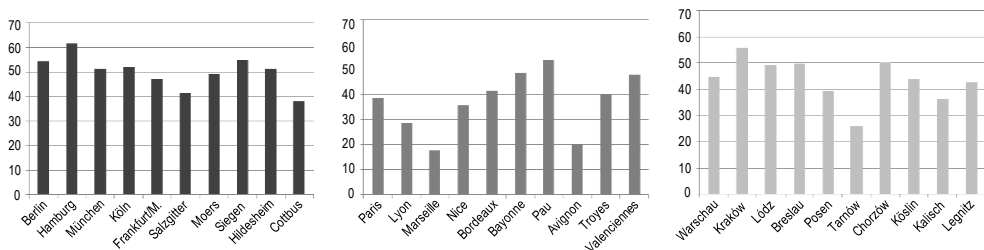


Abb. 3: Vergleich der mit Vegetation bestandene Flächen in den Untersuchungsgebieten, (DE, FR, PL von links nach rechts)

Tabelle 4: Aggregierte NDVI-Klassen 0,5 – 1; Flächenanteile in %

Rang	Untersuchungs- gebiet	Summe NDVI Werte der Klassen 0,5 – 1	Rang	Untersuchungs- gebiet	Summe NDVI Werte der Klassen 0,5 – 1
1	Hamburg	61,4 %	16	Warschau	44,8 %
2	Kraków	55,8 %	17	Köslin	44,1 %
3	Siegen	55,1 %	18	Legnitz	42,9 %
4	Berlin	54,6 %	19	Bordeaux	41,6 %
5	Pau	54,0 %	20	Salzgitter	41,4 %
6	Köln	51,9 %	21	Troyes	40,0 %
7	Hildesheim	51,2 %	22	Posen	39,4 %
8	München	51,1 %	23	Paris	38,8 %
9	Chorzów	50,1 %	24	Cottbus	37,9 %
10	Breslau	49,6 %	25	Kalisch	36,2 %
11	Moers	49,3 %	26	Nice	36,0 %
12	Lódz	49,3 %	27	Lyon	28,8 %
13	Bayonne	48,8 %	28	Tarnów	26,0 %
14	Valenciennes	48,0 %	29	Avignon	20,0 %
15	Frankfurt Main	47,2 %	30	Marseille	17,8 %

In der Gesamtschau der aggregierten NDVI-Klassen kann man in Tabelle 4 sehen, wie ein Ranking für alle Untersuchungsgebiete ausfällt. Interessant ist die Tatsache, dass in Hamburg mehr als dreimal so viele Vegetationsanteile vorhanden sind, als wie in Marseille und Avig-

non. Berlin als Hauptstadt hat zu Recht den Ruf als ein „grüne Metropole“, Paris und Warschau, Hauptstädte von FR und PL, fallen gegen Berlin deutlich ab.

6 Schlussbetrachtung und Kritik

Aus aktuellen Bilddaten des optischen Sensors Sentinel-2a/b konnte für ausgewählte urbane Regionen der Länder DE, FR, PL die Vegetation über den NDVI berechnet werden. In einem nächsten Schritt, und um diese Studie fortzusetzen und praktisch umzusetzen, sollte die hier vorgestellte Methode auf alle urbanen Gebiete in Europa übertragen werden. Das Ergebnis wäre ein objektiver Bewertungsmaßstab und für planende Institutionen die Geodatenbasis, ggf. ihren Vegetationsanteil durch konkrete Maßnahmen zu erhöhen und somit die Lebensqualität ihrer Einwohner zu steigern. Dies ist auch ganz im Sinne einer nachhaltigen und ökologisch ausgerichteten Stadtplanung (Möller, 2008). Die hier vorgestellte Methode wurde ausschließlich am Desktop-GIS entwickelt und die Berechnungen manuell durchgeführt, sie lässt sich aber mit einigem Aufwand durchaus automatisieren und das Ergebnis kann dann bspw. über ein Web-Mapping online und permanent aktualisiert dargestellt werden.

Danksagung

Dieser Aufsatz entstammt in Teilen einer BA-Arbeit, die im Jahr 2019 an der Beuth Hochschule für Technik verfasst wurde (Bartłomiejczak 2019). Die Autoren danken dem Team des USGS Earthexplorer für das breite Angebot an besten Fernerkundungsbilddaten!

Literatur und Quellen

- Albertz, J. (2001). *Einführung in die Fernerkundung – Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern* (2nd. Ed.). Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Bartłomiejczak, K. (2019). *Urbanes Grün in Europäischen Großstädten. Eine vergleichende Analyse von Vegetation in urbanen Gebieten auf Basis von Sentinel-2a/b Satellitenbilddaten* (unveröffentlicht).
- BBSR – Bundesinstitut für Bau- Stadt und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2020). Retrieved April 04, 2020, from https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/deutschland/gemeinden/StadtGemeindetyp/StadtGemeindetyp_node.html.
- Bläser, K., Danielzyk, R., Fox-Kämper, R., Funke, L., Rawak, M., & Sondermann, M. (2012). *Urbanes Grün in der integrierten Stadtentwicklung. Strategien, Projekte, Instrumente*. Ed.: Ministerium für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Earthexplorer (2020). Retrieved April 04, 2020, from <https://earthexplorer.usgs.gov/>.
- European Environment Agency – EEA (1985). Retrieved April 04, 2020, from <https://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>.
- EUROSTAT (2020). Retrieved April 04, 2020, from <https://ec.europa.eu/eurostat/de/data/database>.

- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263.
- Möller, M. (2008). Sustainable and Ecological Urban Development – Case Study for the Burenkamp Area, Osnabrueck. In: J. Schiewe, & E. Michel (Eds.), *Geoinformatics paves the Highway to Digital Earth* (pp. 99–103).
- Multispec (2020). Retrieved April 04, 2020, from <https://engineering.purdue.edu/~biehl/MultiSpec/>
- Oehrlein, J., Niedermann, B., & Haunert, J.-H. (2019). Analysing the Supply and Detecting Spatial Patterns of Urban Green Spaces via Optimization. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 87(4) 137–158.
- Oke T. R. (1973). City Size and the Urban Heat Island. *Atmospheric Environment*, 7, 769–779.
- QGIS (2020). *QGIS-Website*. Retrieved April 04, 2020, from <https://www.qgis.org/de/site/>.
- Slicer (2020). *Slicer-Plug-in*. Retrieved April 04, 2020, from <https://plugins.qgis.org/plugins/Slicer/>.
- Umweltbundesamt (2020). *Indikator: Heiße Tage*. Retrieved April 04, 2020, from <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-heisse-tage#die-wichtigsten-fakten>.