

Wie grün sind deutsche Städte?

Meinel, Gotthard; Krüger, Tobias; Eichler, Lisa; Wurm, Michael; Tenikl, Julia; Frick, Annett; Wagner, Kathrin; Fina, Stefan

Veröffentlichungsversion / Published Version

Forschungsbericht / research report

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Meinel, G., Krüger, T., Eichler, L., Wurm, M., Tenikl, J., Frick, A., ... Fina, S. (2022). *Wie grün sind deutsche Städte?* (BBSR-Online-Publikation, 03/2022). Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). <https://doi.org/10.26084/ioer-2022urbgrn>

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer CC BY Lizenz (Namensnennung) zur Verfügung gestellt. Nähere Auskünfte zu den CC-Lizenzen finden Sie hier:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Terms of use:

This document is made available under a CC BY Licence (Attribution). For more information see:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



BBSR-
Online-Publikation
03/2022

Wie grün sind deutsche Städte?

Autorinnen und Autoren

Gotthard Meinel
Tobias Krüger
Lisa Eichler
Michael Wurm
Julia Tenikl
Annett Frick
Kathrin Wagner
Stefan Fina

Wie grün sind deutsche Städte?

Das Projekt des Forschungsprogramms „Allgemeine Ressortforschung“ wurde vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) durchgeführt.

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Wissenschaftliche Begleitung

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat RS 6 „Stadt-, Umwelt-, und Raumb Beobachtung“
Dr. Fabian Dosch
fabian.dosch@bbr.bund.de

Begleitung im Bundesministerium

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB)
Referat SW I 5 „Grün und Baukultur in der Stadtentwicklung“
Dr. Lara Steup

Auftragnehmer

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR)
Dr. Gotthard Meinel
g.meinel@ioer.de
Dr. Tobias Krüger, Lisa Eichler

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum (DFD)
Dr. Michael Wurm, Julia Tenikl

LUP – Luftbild Umwelt Planung GmbH Potsdam
Bereich Fernerkundung
Dr. Annett Frick, Kathrin Wagner

Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung gGmbH (ILS)
Bereich Geoinformation & Monitoring
Prof. Dr. Stefan Fina

Stand

November 2021

Gestaltung

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR)

Bildnachweis

Titelbild: © B. Kochan, IÖR-Media

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.):
Wie grün sind deutsche Städte? BBSR-Online-Publikation 03/2022, Bonn, Februar 2022.



Foto: Picturemakers/Düsseldorf

Liebe Leserinnen und Leser,

immer mehr Menschen leben in Städten und wollen in einem attraktiven und durchgrünerten Umfeld leben. Urbanes Grün macht das Wohnumfeld lebenswert, sorgt für ein besseres Klima in den Städten und hilft, die Artenvielfalt zu sichern. Das „Weißbuch Stadtgrün“ des Bundes (2016) und die Neue Leipzig-Charta für Stadtentwicklung (2020) nennen die Stärkung urbanen Grüns als zentrales Handlungsfeld in den Kommunen.

Bisher gab es nur wenige Daten, welche die Kommunen für die strategische Entwicklung ihrer Grün- und Freiräume nutzen konnten. Wie lässt sich beispielsweise messen, welchen Anteil das Stadtgrün an der Fläche einer Stadt ausmacht, wie sich Grünflächen in den Quartieren verteilen und wie gut Grünräume erreichbar sind? Hochauflösende Daten der Fernerkundung geben hier wichtige Hinweise.

Ein Forschungskonsortium hat im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung zwischen 2018 und 2021 ein „Stadtgrünraster Deutschland“ erstellt. Erstmals liegen nun bundesweit nach methodisch einheitlichen Kriterien erstellte Rasterdatensätze in einer hohen Auflösung von 10 x 10 Metern vor. Das Raster schlüsselt – basierend auf Satellitendaten – die Flächen nach Kategorien wie Laubholz, Nadelholz oder Wiese auf. Basierend auf dem Raster berechneten die Forschenden Indikatoren wie den Grünanteil am Stadtgebiet, die Grünfläche pro Einwohner und die Erreichbarkeit von Grünflächen im Wohnumfeld. Die Indikatoren ermöglichen damit erstmals Vergleiche der Grünausstattung sowohl zwischen Kommunen als auch innerhalb einer Kommune – etwa im Hinblick auf Stadtbezirke oder Stadtquartiere.

Die Forschenden konnten darüber hinaus in acht Fallstudien zeigen, wie diese Städte schon jetzt mit hochauflösenden Laserscan- und Luftbildverfahren stadtplanerisch relevante Informationen für die Entwicklung urbaner Grünräume gewinnen. Themen wie Grünvolumen, Vitalität von Grün (Trockenstress von Pflanzen), die auf Sozialräume bezogene Grünausstattung oder auch Ausstattungsdefizite bei städtischem Grün können mittels Fernerkundung transparenter diskutiert werden. Die Projekt-Ergebnisse liefern Verantwortlichen in den Rathäusern Argumente für den Aufbau eines kommunalen Grün-Monitorings.

Ich wünsche Ihnen eine interessante Lektüre.

Dr. Peter Jakubowski
Leiter der Abteilung Raum- und Stadtentwicklung im Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	7
1 Einführung	9
2 Stand der Forschung	11
2.1 Darstellung des Forschungsstandes	11
2.2 Erfassungsmöglichkeiten des Stadtgrüns	12
3 Erstellung eines bundesweiten satellitenbasierten Stadtgrünrasters	15
3.1 Eingangsdaten	15
3.2 Methodik	17
3.3 Ergebnisdatensatz	20
3.4 LUCAS-basierte Validierung	23
3.5 Zusätzliche Validierung über Grünvolumendaten	25
3.6 Einführung der Klasse Bebaut – stark durchgrünt	26
3.7 Bereinigung von Fehlklassifikationen	28
4 Indikatorbasierte Auswertung des Stadtgrünrasters	30
4.1 Indikatordefinition	30
4.2 Indikatorwerte und Interpretation	35
5 Fallstudien zu Grünvolumen und sozialräumlichen Aspekten	48
5.1 Fallstudien zur physischen Grünstruktur deutscher Städte	48
5.2 Sozialräumliche Fallstudien	69
6 Monitoring des Stadtgrüns	82
6.1 Ansätze zur Change Detection	82
6.2 Flächenwertbasierter Ansatz eines Monitorings	88
6.3 Indikatorwertbasierter Ansatz eines Monitorings	91
6.4 Geobasisdatenbasierter Ansatz	93
6.5 Ergebnistransfer	96
7 Fazit	99
8 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	105
8.1 Verbesserung des Klassifikationsproduktes in Hinblick auf das Change Detection	105
8.2 Typologie des Stadtgrüns	105
8.3 Kombination mit weiteren Datensätzen	106
8.4 Grünvolumen für kommunale Planungen	106
8.5 Verbesserung der sozialräumlichen Indikatorik	106
8.6 Präsentation der Ergebnisse	107
9 Literaturverzeichnis	108

10 Anhang	113
10.1 LUCAS-Klassen	113
10.2 Indikatorsteckbriefe	113
10.3 Auswahl der getesteten Indices für die Vitalitätsanalyse	122
10.4 Flächenbilanzen Stadtgrünraster, ALKIS und ATKIS im Vergleich	123
10.5 Datenbeschreibung infas360	125
10.6 Zugangsbeschränkte Flächen in Solingen	125
10.7 Mockups zur Webanwendung	126
10.8 Projektablauf	130

Zusammenfassung

Urbanem Grün kommt eine zentrale Bedeutung in Städten und ihrer Entwicklung zu. So stellt Stadtgrün einen essentiellen Beitrag für die Umwelt- und Lebensqualität dar, bietet Erholung für die Bewohner und trägt zur Verbesserung des Mikroklimas in den Städten bei. Daher wird der Stärkung des Stadtgrüns von der Bundesregierung im „Weißbuch Stadtgrün“ als Ziel einer integrierten und nachhaltigen Stadtentwicklung erklärt.

Die Grünausstattung der Stadt ist der jeweiligen Kommunalverwaltung bekannt. Der Fokus liegt hier aber in der Regel auf den öffentlichen Grünflächen, die sich im Zuständigkeitsbereich der kommunalen Grünflächenämter befinden. Weitestgehend unbekannt ist häufig das nicht öffentliche Grün in privaten Gärten, welches natürlich auch zur Wohlfahrtswirkung des Stadtgrüns beiträgt. Bisher fehlte eine bundesweite Datengrundlage, welche das Stadtgrün einschließlich der nicht öffentlichen Grünflächen in allen deutschen Städten einheitlich beschreibt und sowohl interkommunale als auch innerstädtische Vergleiche ermöglicht.

Diese wurden mit dem Projekt „Monitoring des Stadtgrüns“ auf Grundlage von Sentinel-2-Satellitendaten des europäischen Copernicus-Programms geschaffen. Dabei wurde das urbane Grün flächendeckend in den Klassen Laubholz, Nadelholz und Wiese (niedrige ganzjährige Vegetation) mit vergleichsweise hoher Genauigkeit in einer räumlichen Auflösung von 10 m klassifiziert. Da die multispektralen Sentinel-2-Daten kostenfrei und mit einer hohen Wiederholungsrate zur Verfügung stehen, konnten durch Mittelwertbildung saisonale und Vitalitätsunterschiede des Stadtgrüns ausgeglichen werden. Unter Verwendung von Erhebungspunkten des Land use and land cover surveys (LUCAS) der europäischen Statistikbehörde Eurostat als Trainings- und Validierungsdaten wurde mittels eines Machine-Learning-Algorithmus (Random Forest) die Landbedeckung mit einer Gesamtgenauigkeiten von über 90 % erhoben.

Das digitale Ergebnisprodukt erhielt den Namen „Stadtgrünraster Deutschland“. Es ermöglicht als Kartenprodukt eine hochauflösende visuelle Einschätzung der Stadtgrünsituation. Zudem bildet es die Grundlage für eine quantitative Beschreibung des Stadtgrüns. Dabei beschreiben die GIS-technisch ermittelten Indikatoren Grünausstattung, Grünraumversorgung, Grünerreichbarkeit, Grünraumvernetzung und klimaaktive Flächen wichtige Aspekte des Ist-Zustands des Stadtgrüns einer Stadt und können Defizite aufzeigen. Aber auch der Vergleich der Städte untereinander ist dank der deutschlandweit einheitlichen Datengrundlage möglich. Die Analysen ergaben, dass Unterschiede der Indikatorwertausprägungen insbesondere von der Stadtgröße und der Stadtstruktur bestimmt werden.

Auf lokaler Ebene können durch die Verwendung von Luftbild- und Laserscandaten sehr viel höherauflösende Informationen zur Versiegelung, dem Grünvolumen, der Grünqualität, Vitalitätsverlusten der urbanen Vegetation, der Grünversorgung und von Gründefiziten abgeleitet werden. Das wurde an acht Fallstudien in Städten unterschiedlicher Größe von Klein- bis zu großen Großstädten erprobt, der große Informationsgewinn durch Vertreter der Städte bestätigt und die Anwendungsfelder diskutiert und dargelegt.

So kommen zur Ableitung des Grünvolumens insbesondere Stereoluftbilder mit Infrarotkanal sowie Laserscan-Daten und daraus abgeleitete Oberflächenmodelle zum Einsatz. Zur Analyse von Oberflächentemperaturen bieten sich die Thermalinformationen des Landsat 8-Satelliten an. So können z. B. nach Festlegung möglichst nicht zu überschreitender Temperaturen in städtischen Hitzeinseln bestehende Grünvolumendefizite abgeschätzt werden.

Unter Verwendung von stadtgrünrelevanten Objekten aus Geobasisdaten (ALKIS, ATKIS Basis-DLM) können in Kombination mit kleinräumigen sozialräumlichen Daten Aussagen zum Versorgungsgrad der Bevölkerung mit urbanem Grün getroffen und damit Fragen der Umweltgerechtigkeit beantwortet werden. Defizitär ausgestattete Räume können identifiziert werden und eine Grundlage für die Priorisierung von Maßnahmen der städtischen Grünplanung bilden.

Aufgrund der gesicherten Fortführung der Sentinel-2-Mission können dessen Daten prinzipiell auch die Grundlage für ein Monitoring des Stadtgrüns sein. Allerdings ist dabei zu beachten, dass die Veränderungsdynamik von urbanen Grünflächen in Deutschland sehr gering ist und Veränderungen darum nur mit hochgenauen Erfassungsmethoden erkannt werden können. Ein Monitoring des urbanen Grüns mit Satellitendaten ist somit trotz der erreichten Klassifikationsgüte von über 90 %, die sich auch nicht ohne manuelle Nacharbeiten weiter steigern lässt, nicht in kurzen Zeitabständen sinnvoll. Die wenigen Veränderungen lassen sich nicht robust genug erfassen. Darum wird ein Wiederholungsintervall von sechs Jahren vorgeschlagen, zumal dieses mit anderen europäischen (Corine Land Cover, Urban Atlas, LUCAS) und deutschen Erhebungsprogrammen (LBM-DE) konform geht.

Auf den in größeren zeitlichen Abständen ermittelten Indikatoren, die auf Basis des Stadtgrünrasters berechnet werden, sollte ein Monitoring des Stadtgrüns geprüft werden. In Zeitreihen bieten diese Indikatoren generalisierende Aussagen zur Entwicklung des Stadtgrüns in Deutschland insgesamt. Zudem können ggf. einzelne Städte identifiziert werden, deren Entwicklung des Stadtgrüns auffällig verläuft.

Für den Ergebnistransfer werden verschiedene etablierte Plattformen vorgesehen, die die gewonnenen Indikatoren in Form von Karten, Diagrammen und Tabellen präsentieren. Dazu gehören neben der Website „Grün in der Stadt“ des BMWSB (<https://gruen-in-der-stadt.de/>), der Monitor der Siedlungs- und Freiraumentwicklung des Leibniz- Instituts für ökologische Raumentwicklung (IÖR-Monitor; www.ioer-monitor.de) für Indikatorwerte und das Stadtgrünraster selbst, der EOC Geoservice des DLR für den Download der Landbedeckungsklassifikation und die Anwendung Monitoring Stadtregionen des Instituts für Landes- und Stadtentwicklungsforschung (ILS; www.ils-stadtregionen.de) oder die Webanwendung INKAR-Indikatoren und Karten zur Raum- und Stadtentwicklung des BBSR für weitere Auswertungen.

1 Einführung

Urbanes Grün ist von zentraler Bedeutung für zahlreiche Aspekte der Stadtentwicklung. Es erbringt eine Vielzahl von Ökosystemleistungen (ÖSL) (Grunewald et al. 2016). Grünflächen dienen der Naherholung und der Naturerfahrung im unmittelbaren Wohnumfeld der Bürger, tragen zur Verbesserung des Mikroklimas in Städten bei, stellen wichtige Lebensräume für Pflanzen und Tiere dar (Sicherung der urbanen Biodiversität) und sind entscheidend für die Luftqualität. Sie beeinflussen die Attraktivität der Städte für deren Bewohner positiv und steigern nachweislich die allgemeine Umwelt- und Lebensqualität (BMUB 2017). Aufgrund der stetig wachsenden urbanen Bevölkerung gewinnen städtische Grünflächen als Bereitsteller von Ökosystemleistungen zunehmend an Bedeutung.

Der Begriff „Stadtgrün“ oder „urbanes Grün“ bezieht sich zunächst auf „alle Formen grüner Freiräume und begrünter Gebäude. Zu den Grünflächen zählen Parkanlagen, Friedhöfe, Kleingärten, Brachflächen, Spielbereiche und Spielplätze, Sportflächen, Straßengrün und Straßenbäume, Siedlungsgrün, Grünflächen an öffentlichen Gebäuden, Naturschutzflächen, Wald und weitere Freiräume, die zur Gliederung und Gestaltung der Stadt entwickelt, erhalten und gepflegt werden müssen. Auch private Gärten und landwirtschaftliche Nutzflächen sind ein wesentlicher Teil des Grüns in den Städten.“ (BMUB 2015: 7) Hinzuzuzählen sind ebenso Bauwerksbegrünungen mit „Fassaden- und Dachgrün, Innenraumbegrünung sowie Pflanzen an und auf Infrastruktureinrichtungen.“ (ebd.) Nach der Begriffsdefinition der Europäischen Kommission ist für Stadtgrün auch der Begriff der „grünen urbanen Infrastruktur“ (European Commission 2013) synonym verwendbar.

Im „Weißbuch Stadtgrün“ werden von der Bundesregierung politische Handlungsfelder zum urbanen Grün definiert. Die Stärkung des Grüns in der Stadt wird hier als erklärtes politisches Ziel für eine integrierte und nachhaltige Stadtentwicklung festgeschrieben (BMUB 2017). Unter anderem sollen im Handlungsfeld „Grünräume qualifizieren und multifunktional gestalten“ Orientierungs- und Kennwerte für Grün entwickelt werden, welche einen empfehlenden Charakter haben. Diese sollen den Kommunen als Argumentationsgrundlage dienen, um im Rahmen der Stadtentwicklung den Zielen einer bedarfsgerechten, vernetzten Grünraumversorgung Gewicht zu verleihen (BMUB 2017).

In der vorliegenden Dokumentation werden die Ergebnisse des Forschungsprojekts „Monitoring des Stadtgrüns“ (Kurztitel¹) dargestellt. Das Projekt wurde vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) in Auftrag gegeben und von einem Konsortium bearbeitet, dem neben dem Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR) in Dresden als Leadpartner das Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) in Oberpfaffenhofen, die Firma Luftbild Umwelt Planung GmbH (LUP) aus Potsdam sowie der Bereich Geoinformation & Monitoring am Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung gGmbH (ILS) in Dortmund angehörten.

Ziel des Projekts war die Erarbeitung und Anwendung einer Methodik zur bundesweit flächendeckenden Erfassung von Stadtgrün sowie die Erarbeitung einer Typologie der stadträumlich-funktionalen differenzierten Grünausstattung von Städten in Deutschland.

Die Bearbeitung des Projekts erfolgte von November 2018 bis Juni 2021. Die zentralen Ergebnisse des Projekts umfassen

1.) das „Stadtgrünraster Deutschland“, eine auf urbanes Grün fokussierte Landbedeckungsklassifikation aus europäischen Sentinel-2-Satellitendaten,

(1)

Vollständiger Titel: Wie grün sind bundesdeutsche Städte? Fernerkundliche Erfassung und stadträumlich-funktionale Differenzierung der Grünausstattung von Städten in Deutschland (Erfassung der urbanen Grünausstattung); FKZ: 10.06.03.18.101

2.) für acht teilnehmende Fallstudienstädte stadtgrünbezogene detail- und facettenreiche Sonderauswertungen zur Grünausstattung basierend auf hochauflösenden Fernerkundungsdaten unterschiedlichster Art sowie

3.) Untersuchungen zu sozialräumlichen Fragestellungen im Kontext städtischen Grüns.

In Vorbereitung eines bundesweiten Stadtgrünmonitorings wurde auf Grundlage von geeigneten Indikatoren ein Konzept entwickelt, was auch eine Informationsplattform zu Informationen und Indikatoren zur Grünausstattung von Städten und Stadträumen im Bundesgebiet als Web-Anwendung umfasst.

2 Stand der Forschung

2.1 Darstellung des Forschungsstandes

In der Stadtforschung ist das Konzept der „grünen Infrastruktur“ in den letzten Jahren immer stärker in den Fokus genommen worden (Mell 2017). Viele Autoren sehen im Stadtgrün ein hohes Potential, um mit verschiedenen aktuellen und zukünftigen Herausforderungen der Stadtplanung umzugehen. So werden zum Beispiel die Kompensation hoher Abflussraten auf versiegelten Flächen bei Starkregenereignissen, die Verbesserung der klimatischen Situation durch Frisch- und Kaltluftschneisen entlang von Grünkorridoren, aber auch die Erhöhung der urbanen Lebensqualität und die Planung gesundheitsfördernder Stadtstrukturen betrachtet (Fuller/Gaston 2009). Barton (2016) bezeichnet die Grünausstattung einer Stadt auch als eine Form ökologischer Resilienz gegenüber Umweltstressoren wie Luftverschmutzung, betont aber auch die Bedeutung für den Wasserhaushalt und Biodiversität.

Für ein analytisches Verständnis wurde das theoretische Konzept einer grünen Infrastruktur mit zentralen Prinzipien unterlegt, die grundlegende Charakteristika eines vernetzten, strategisch geplanten Stadtgrüns ausmachen. Hierbei sind zwei Prinzipien hervorzuheben: Multifunktionalität und Konnektivität (Grädinaru/ Hersperger 2018; Lennon/Scott 2014). Multifunktionalität beschreibt die Integration und Interaktion verschiedener Funktionen (Lennon/Scott 2014). Durch Konnektivität der grünen Elemente wird ein Netzwerk geschaffen, welches als Ganzes funktioniert (Grädinaru/Hersperger 2018). Aufbauend auf diese beiden Grundprinzipien lässt sich ein Konzept des Monitorings von Stadtgrün ableiten.

Für den Bereich der Multifunktionalität existiert bereits eine breite Literaturlage, welche vornehmlich die Messung, Kartierung und Bewertung von Ökosystemleistungen als Kernziel hervorhebt (Maes et al. 2015). Für die Ziele eines Planungsansatzes sind dies bereits sehr wichtige Einflussgrößen, die als Entscheidungsunterstützung dienen können. Durch eine gezielte Information, an welchen Stellen innerhalb einer Stadt Defizite an und Unterversorgungen mit multifunktionalen Grünflächen vorliegen, können Investitionsentscheidungen zielgerichteter vorgenommen werden, um die positiven Wirkungen in ökologischen, ökonomischen und sozialen Belangen folgerichtig entstehen zu lassen (Demuzere et al. 2014; Voskamp und van de Ven 2015). Nur durch diese gezielte Steuerung von einzelnen Komponenten einer grünen Infrastruktur innerhalb einer Stadtregion kann letztlich ein funktionales Netzwerk des Stadtgrüns entstehen (Mell et al. 2017).

Die Konnektivität von Stadtgrün betrachtet die Literatur aktuell größtenteils unter dem Aspekt der Habitatverbindung oder der Migrationsoptionen für verschiedene Arten (Liquete et al. 2015). Dies ist auch ein wesentlicher Grund, warum der Aspekt der Konnektivität für den Bereich der Stadtforschung im Vergleich zur Multifunktionalität relativ wenig beforscht wurde. Für urbane Räume wird Konnektivität daher häufig nur unter dem Aspekt der Erreichbarkeit von Grünflächen diskutiert, wobei dieser Aspekt eine zentrale Rolle bei der Bewertung der Grünversorgung einnimmt (Hansen/Pauleit 2014). Für die Entfaltung vieler Nutzungspotentiale von Stadtgrün ist es entscheidend, dass die Flächen auch von Bürgern z. B. zur Naherholung erreicht werden können oder die Stadtbewohner (z. B. für positive mikroklimatische Effekte) im Wirkungsradius solcher Flächen wohnen (Rusche 2012).

So benennt zum Beispiel die wissenschaftliche Begleitforschung der Bundesregierung eine Stärkung der natürlichen Lebensbedingungen mit Grünräumen als vordringliche Aufgabe einer gesundheitsfördernden Stadtentwicklung. Neben Aspekten der sozialen Teilhabe wird insbesondere die Erholungswirkung von städtischem Grün oder Blau (urbane Gewässer) hervorgehoben (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen 2016: 202 f.). Sozialräumliche Selektionsprozesse werfen jedoch die Frage auf, ob sozioökonomisch benachteiligte Bevölkerungsgruppen diesen Zugang zu Grünflächen in ausreichendem Maße haben bzw. auch nutzen können. So stellt sich z. B. die Frage, ob die Verdrängung von statusniedrigen und einkommensschwachen Haushalten aus hochpreisigen Wohnlagen in preisgünstige Quartiere und

Randlagen mit einer erhöhten Exposition gegenüber Umweltstressoren und einer geringeren Erreichbarkeit von Erholungsflächen einhergeht. Die Stadtforschung beschäftigt sich in diesem Zusammenhang zunehmend mit der Grünversorgung und -erreichbarkeit auch im Hinblick auf eine gerechte Verteilung und Zugänglichkeit von Grünressourcen für unterschiedliche Lebensstile und soziale Schichten (Böhme et al. 2015). Gleichzeitig intensiviert die Raumforschung ihre Bemühungen, Ausstattungsstandards für gesundheitsfördernde Stadtstrukturen zu entwickeln und in der Planungspraxis zu etablieren (Baumgart et al. 2018). Im „Weißbuch Stadtgrün“ wird seitens der Bundesregierung eine bundesweit flächendeckende ausreichende Grünflächenversorgung angestrebt. Im Sinne der Umweltgerechtigkeit soll allen Bürgern ein adäquater Zugang zu Grünflächen ermöglicht werden (BMUB 2017).

Diese Bemühungen erfordern jedoch eine gute flächendeckende Datenlage über die Situation und Entwicklung grüner und blauer städtischer Infrastrukturen. Während erste Städte schon ein Monitoring des Stadtgrüns betreiben und wiederkehrende Erhebungen des städtischen Grünvolumens und Biotopkartierungen durchführen, fehlen auf der Bundesebene zuverlässige und flächendeckende Informationen zu diesem Thema.

2.2 Erfassungsmöglichkeiten des Stadtgrüns

Auf kommunaler Ebene werden städtische Grünflächen erfasst und ggf. bewertet, insbesondere Flächen, welche sich im Zuständigkeitsbereich der kommunalen Grünflächenämter befinden. Geofachdaten zum Grün werden zudem in Abhängigkeit von der jeweiligen Verwaltungsorganisation (durch Planungsämter, Vermessungsämter und Umweltämter) erhoben. Weitere grünrelevante Informationen, wie beispielsweise Flächen in privater, genossenschaftlicher oder forstwirtschaftlicher Hand, werden meist an anderen Stellen erhoben und gepflegt. Derartige Flächen machen oftmals einen erheblichen Teil des städtischen Grüns aus.

Viele Großstädte stellen ihre Geodaten in Umweltinformationssystemen oder Umweltatlanten der Öffentlichkeit zur Verfügung. Immer häufiger werden diese Informationen über Webportale angeboten.

Neben der Erfassung der Grünflächen wird auch in einigen Städten, wie z. B. Potsdam oder Berlin, das Grünvolumen mit der Grünvolumenzahl (GVZ) nach Schulze et al. (1984) bestimmt. Eine regelmäßige Erhebung im Rahmen eines Monitorings kann einerseits bauliche Verdichtungen bzw. andererseits die Erhaltung, Steigerung oder den Verlust des Grünvolumens nachweisen.

Auf nationaler Ebene findet von Seiten des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) eine Kartierung der Landnutzung bzw. Landbedeckung im Rahmen des digitalen Landbedeckungsmodells für Deutschland statt (LBM-DE) (BKG 2020). Dieses dient als Basis für den nationalen Beitrag für die CORINE-Land-Cover-Produkte der EU. Aufbauend auf dem Basis-Landschaftsmodell erfolgt die Aktualisierung mittels einer Analyse multispektraler Satellitenbilder (RapidEye, Disaster Monitoring Constellation). Die Mindestkartierfläche beträgt dabei 1 ha (BKG 2020).

Das europäische Erdbeobachtungsprogramm Copernicus stellt einige Kartenprodukte kostenlos zur Verfügung. Die CORINE-Land-Cover-Produkte stellen eine Landbedeckungsklassifizierung verschiedener Jahre für Europa bereit. Abgedeckt werden dabei 44 Landnutzungs- und Landbedeckungsklassen in einer geometrischen Auflösung von etwa 100 m (COPERNICUS Programme 2019). Darüber hinaus werden Daten zur Wald- bzw. Grasbedeckung sowie der dominierenden Blattart in Europa, basierend auf Landsat-Satellitendaten bis zu einer Auflösung von 20 m, bereitgestellt.

Seit dem Jahr 2006 bildet der European Urban Atlas eine sehr hoch aufgelöste räumliche Datenquelle zur Landnutzung und Landbedeckung in Metropolregionen mit mehr als 100.000 Einwohnern. Diese Daten weisen eine Mindestkartierfläche (Minimal Mapping Unit, MMU) von 25 ha auf, separat bereitgestellte Änderungsdatensätze (Land Cover Change) haben eine 5 ha große MMU (COPERNICUS 2020).

Zum Zweck einer bundesweiten Erfassung von bestimmten Landbedeckungselementen müssen die verwendeten Datengrundlagen bestimmte Bedingungen erfüllen. Dies sind v. a. eine vollständige Abdeckung des Untersuchungsgebietes, eine auch in Zukunft gesicherte Aufnahme, eine hohe Aktualität der Daten, eine homogene Qualität unabhängig von ihrer räumlichen Lage sowie eine hohe geometrische und semantische Genauigkeit der Informationen. Für Deutschland kommen unter diesen Voraussetzungen verschiedene Geodatenprodukte in Betracht, die grundsätzlich als geeignet erscheinen. In der Tabelle 1 werden diese dargestellt.

Tabelle 1
Datengrundlagen für die Erfassung von Stadtgrün

Kategorie	Bezeichnung	Beschreibung	Bemerkung
Amtliche vektorielle Geobasisdaten	ALKIS (Amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem)	Flurstücks- und Gebäudegeometrien, verknüpft mit Attributen des Katasterbuchwerkes (z. B. Nutzungsart); Kartenmaßstab 1:1.000	Sehr hoher geometrischer Detailgrad (Katastermaßstab ca. 1:1.000), aber geringere thematische Auflösung als ATKIS; keine zyklische Aktualisierung (anlassbezogen); nur für einzelne Bundesländer Open-Data, daher bundesweiter Monitoring-Ansatz auf ALKIS-Basis momentan nicht möglich
	ATKIS Basis-DLM (Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem)	Digitaler objektstrukturierter Vektordatensatz der topographischen Objekte (Lage, Form, Namen und Eigenschaften verknüpft mit objektbezogenen Sachdaten); Erfassungsmaßstab ca. 1:10.000	Kleinere Objekte erst ab Erreichung einer bestimmten Mindestgröße erfasst, sonst Dominanzprinzip der vorherrschenden Flächennutzung; regelmäßige Aktualisierung gesichert; bundesweit weitgehend harmonisiert und für Bundeszwecke nutzbar
Freie Geodaten	OpenStreetMap	Erfassung von Daten zu Gebäuden, Wegen und weiteren Flächennutzungen mittels Luftbildern, GPS-Geräten und Feldkarten durch Freiwillige	Frei nutzbar, flächendeckend für Deutschland, Aktualität und Konsistenzen der Daten von der Arbeit der Freiwilligen abhängig, Attribute uneinheitlich
Geofachdaten	Grünflächeninformationssysteme (GRIS), Baumkataster	Kommunale Fachanwendungen zur Verwaltung der Pflege und Unterhaltung des Stadtgrüns	Vorhandensein, Gestaltung und Umfang je nach Kommune unterschiedlich
	Stadtbiotopkartierung	Flächendeckende visuelle Kartierung von Biototypen und Landnutzung aus Luftbildern, flächendeckend oder selektiv	Nutzung unterschiedlicher Kartierverfahren und Kartierschlüssel, ungesicherte Aktualisierung
	LBM-DE (Landbedeckungsmodell für Deutschland)	Nutzung von Geobasisdaten und multispektraler Satellitenbilder; Kombination von Landbedeckung und Landnutzung (Corine Land Cover (CLC)-Klassen)	Dreijähriges Aktualisierungsintervall günstig für die Beobachtung von kurz- und längerfristige Änderungen, aufgrund semantischer Änderungen der Flächenzuordnung für ein Monitoring von Landbedeckung und Landnutzung derzeit noch ungeeignet

Kategorie	Bezeichnung	Beschreibung	Bemerkung
Fernerkundungsdaten	Luftbilder, Stereoluftbilder, Digitale Orthophotos (DOP)	Objektive photographische Abbildung der Erdoberfläche, Maßstabsunterschiede und geometrische Verzerrungen aufgrund unterschiedlicher Geländehöhen werden bei der Erstellung eines digitalen Orthophotos behoben	(Teil-)automatisierte Auswertung möglich, hohe Auflösung ermöglichen Unterscheidbarkeit von einzelnen Vegetationsarten; Durchführung durch Vermessungsämter der Länder, daher nicht einheitlich
	Laserscandaten (LiDAR)	Dreidimensionale Aufnahme der Oberfläche für die Erstellung von Gebäudemodellen, digitalen Oberflächenmodellen und Grünvolumen	Aufgrund hoher Kosten nur lokal eingesetzt, Wiederholungsintervalle oft unzureichend
	Satellitenbilddaten	In unterschiedlichen Wellenlängenbereichen flächendeckende und objektive, uninterpretierte Erfassung der Landoberfläche	Flächendeckende Erfassung des Untersuchungsgebiets bei hoher geometrischer und zeitlicher Auflösung; Thematische Auflösung und Klassifikationsgüte begrenzt

Quelle: IÖR

Im Projekt „Monitoring des Stadtgrüns“ wurde für eine bundesweite Erfassung des Stadtgrüns in einheitlicher Qualität und mit einer hohen räumlichen Auflösung ein satellitengestützter Ansatz verfolgt.

3 Erstellung eines bundesweiten satellitenbasierten Stadtgrünrasters

3.1 Eingangsdaten

3.1.1 Satellitendaten

Datenbasis für die bundesweite Bestimmung des Stadtgrüns bilden Satellitendaten des europäischen Erdbeobachtungsprogramms Copernicus, welches mit der Sentinel-Mission kostenfrei Satellitendaten zur Verfügung stellt. Die Sentinel-Satelliten generieren Informationen zur Landoberfläche, Luftqualität oder auch Ozeanbeobachtung.

Insbesondere Sentinel-2 liefert in zeitlich engen Wiederholzyklen und mit großen Schwadbreiten räumlich hochauflösende Daten. Sentinel-2 nimmt mit zwei baugleichen, multispektralen Satelliten (Sentinel-2A und Sentinel-2B) die Landoberflächen auf. Diese kreisen um 180° versetzt mit einer durchschnittlichen Höhe von 786 km in einem sonnensynchronen Erdorbit. Sentinel-2A startete im Juni 2015 und Sentinel-2B folgte im März 2017. Innerhalb von fünf Tagen deckt das System jedes Gebiet auf der Landoberfläche mindestens einmal mit einer räumlichen Auflösung von 10 m ab, was zum jetzigen Zeitpunkt die höchstauflösenden frei verfügbaren globalen Satellitendatenangebot darstellt. Sentinel-2 arbeitet mit einem passiven optischen Sensor, welcher das von der Erde reflektierte Sonnenlicht aufnimmt. Tabelle 2 zeigt die Wellenlängen sowie die räumlichen Auflösungen der 13 verfügbaren Spektralkanäle. Während sich der Satellit entlang seines Orbits bewegt, können mit dem Sensor in einer Schwadbreite von 290 km neue Daten aufgezeichnet werden. Die hohe Datenverfügbarkeit dieser Satellitenmission stellt somit einen großen Vorteil aufgrund der hohen zeitlichen und räumlichen Abdeckung dar (ESA 2019).

Tabelle 2

Wellenlängen, Bandbreiten und räumliche Auflösungen der Sentinel-2-Satelliten

Räuml. Auflösung [m]	Band	Zentrale Wellenlänge [nm]	Bandbreite [nm]
10	2	490	65
	3	560	35
	4	665	30
	8	842	115
20	5	705	15
	6	740	15
	7	783	20
	8a	865	20
	11	1 610	90
	12	2 190	180
60	1	443	20
	9	945	20
	10	1 375	30

Quelle: ESA 2013

Damit bieten die Sentinel-2-Daten die Möglichkeit der Erstellung eines homogenen und hochauflösenden bundesweiten Datensatzes. Abbildung 1a zeigt einen Ausschnitt einer Sentinel-2-Szene für Berlin, Abbildung 1b in einem herangezoomten Ausschnitt die einzelnen 10 x 10 m großen Sentinel-2-Pixel.

Abbildung 1

a) Ausschnitt Sentinel-2-Szene Berlin, b) Zoom auf Sentinel-2-Pixelgröße



Quelle: DLR

3.1.2 Referenz- und Trainingsdaten

Als Referenzpunkte für das Trainieren des Klassifikationsalgorithmus werden die Information der europäischen Landbedeckungs- und Landnutzungserfassung LUCAS genutzt. Bei LUCAS (Land Use/Cover Area frame Survey) handelt es sich um eine europaweite statistische Erhebung, die durch Eurostat im Jahr 2001 erstmals durchgeführt wurde (d'Andrimont et al. 2020). Für die Ersterhebung wurden über eine Million gitterförmig über Europa verteilte Punkte durch Photointerpretation einem definierten Katalog von Landbedeckungsklassen zugeordnet. Seit 2006 wird in einem Dreijahreszyklus eine Auswahl dieser Punkte in situ (d. h. durch Vor-Ort-Begehung) systematisch für die EU-Staaten aktualisiert. Dabei wird die Landbedeckungsklasse nach einem hierarchischen Klassifikationssystem bestimmt sowie ökologische Parameter des Punktores dokumentiert (Eurostat). Auf Deutschland entfallen etwa 26.000 Punkte.

Die Landbedeckungsnomenklatur umfasst die folgenden acht Hauptklassen:

- Künstliche Flächen (Urban),
- Landwirtschaftliche Anbauflächen (Cropland),
- Bewaldete Flächen (Woodland),
- Gebüsche (Shrubland),
- Gras- und Grünflächen (Grassland),
- Vegetationslose Flächen (Bareland),
- Gewässer (Water),
- Feuchtgebiete (Wetland).

Eine weitere Untergliederung, wie beispielsweise die Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelwald, ist möglich. Zusätzlich werden zu jedem Punkt visuelle Informationen angeboten, u. a. Fotos des Punktes selbst sowie jeweils ein Bild in jede Himmelsrichtung. Die Punktdaten sind frei im Internet zugänglich. Die Fotos können kostenfrei separat angefordert werden.

Der LUCAS-Punkt Datensatz ist somit eine wertvolle Quelle für die Bereitstellung von bundes- und europa-weiten Informationen zur Landoberfläche und wurde bereits in vorangegangenen Studien als Trainings- und Validierungsgrundlage für Landbedeckungsklassifikationen verwendet (Pflugmacher et al. 2019; Mack et al. 2017; Zillmann et al. 2014; Conrad et al. 2010).

3.2 Methodik

3.2.1 Vorverarbeitung der Referenzpunkte

Die LUCAS-Referenzpunkte von 2018 lagen zum Projektstart noch nicht vor. Daher wurden zunächst die LUCAS-Referenzpunkte aus dem Jahr 2015 sowie ausgewählte Satellitenszenen aus dem entsprechenden Zeitraum verwendet. Im weiteren Projektverlauf konnte dann mittels Sentinel-2-Daten und LUCAS-Punkten aus dem Jahr 2018 dieser Zeitschnitt erstellt werden.

Für die Klassifikation von urbanen Grünflächen sind nach eingehender Betrachtung besonders die Klassen *Landwirtschaftliche Anbauflächen (B)*, *Bewaldete Flächen (C)*, *Gebüsche (D)* und *Gras- und Grünflächen (E)* entscheidend, wobei der Großteil der Punkte in den Klassen *Bewaldete Flächen* und *Gras- und Grünflächen* vorhanden ist. Für eine bessere Differenzierung der restlichen Flächen werden auch zusätzliche LUCAS-Klassen, wie z. B. *künstliche Flächen (A)*, *offener Boden (F)* und *Gewässer (G)* in die Klassifikation einbezogen. Die Buchstaben repräsentieren die Hauptklassen der LUCAS-Punkte. Eine Aufteilung des Datensatzes in einen Trainings- und einen Validierungsdatensatz, bevor der Klassifikationsalgorithmus trainiert wird, ist essentiell.

Neben den Koordinaten wird den LUCAS-Punkten eine Vielzahl von Parametern zugeordnet. Vergleichbare Studienprozessieren zunächst die LUCAS-Punkte vor, um anhand der Metadaten geeignete Punkte auszuwählen (Mack et al. 2017). Der für diese Klassifikation neu entwickelte Ansatz bezieht sich auf die hochauflösenden Sentinel-2-Daten. Dabei müssen sich alle Punkte, außer den Punkten in der Klasse *künstliche Flächen*, in homogenen Flächen größer als 0,5 ha befinden. Punkte mit multiplen Landbedeckungen in kleineren Flächen als 20 x 20 m werden ausgenommen. Des Weiteren werden die Punkte, die sich auf einer Grenze, Ecke oder linearen Struktur befinden, entfernt. Außerdem werden alle *Gewässer (G)* und *Feuchtgebiete (H)*, die bei der Aufnahme als trocken/überflutet aufgenommen wurden, nicht genutzt, da sie sehr heterogene Landbedeckungen widerspiegeln. Es wurde eine neue Nomenklatur erstellt, da manche LUCAS Punkte sehr heterogene Landbedeckungen zeigen. Insbesondere werden die Vegetationsklassen nach ihrer Höhe und Saisonalität differenziert. LUCAS-Klassen, welche eine zu erwartende schlechte Unterscheidung aufweisen, bspw. aufgrund ihrer spektralen Reflexion, werden nicht berücksichtigt. Die entsprechende Zuordnung der LUCAS-Klassen zu der neuen Nomenklatur mit den Klassen *Bebaut*, *Offener Boden*, *Laubholz*, *Nadelholz*, *Wiese*, *Acker* und *Wasser* kann dem Anhang 10.1 entnommen werden.

Die Differenzierung der Grünklassen hat sich an den LUCAS-Klassen sowie deren spektralen Eigenschaften orientiert. Eine ursprünglich geplante Klasse für Sträucher wurde nicht gebildet, da nur ca. 1 Prozent der LUCAS-Referenzpunkte reine Strauchlandschaften darstellen und dadurch deren Anzahl für ein Training des Klassifikators nicht ausreicht. Durch den Vergleich mit vorliegenden hochauflösenden Daten aus früheren Studien konnte festgestellt werden, dass sich der Flächenanteil von Sträuchern an der Stadtfläche im unteren einstelligen Bereich bewegt, wobei es sich auch fast immer um sehr eng begrenzte Areale handelt, so dass die Mindestkartiereinheit eines Sentinel-2-Pixels von 100 m² besonders in urbanen Gebieten oft nicht gegeben ist.

3.2.2 Erstellung eines Bildmosaiks für die Klassifikation

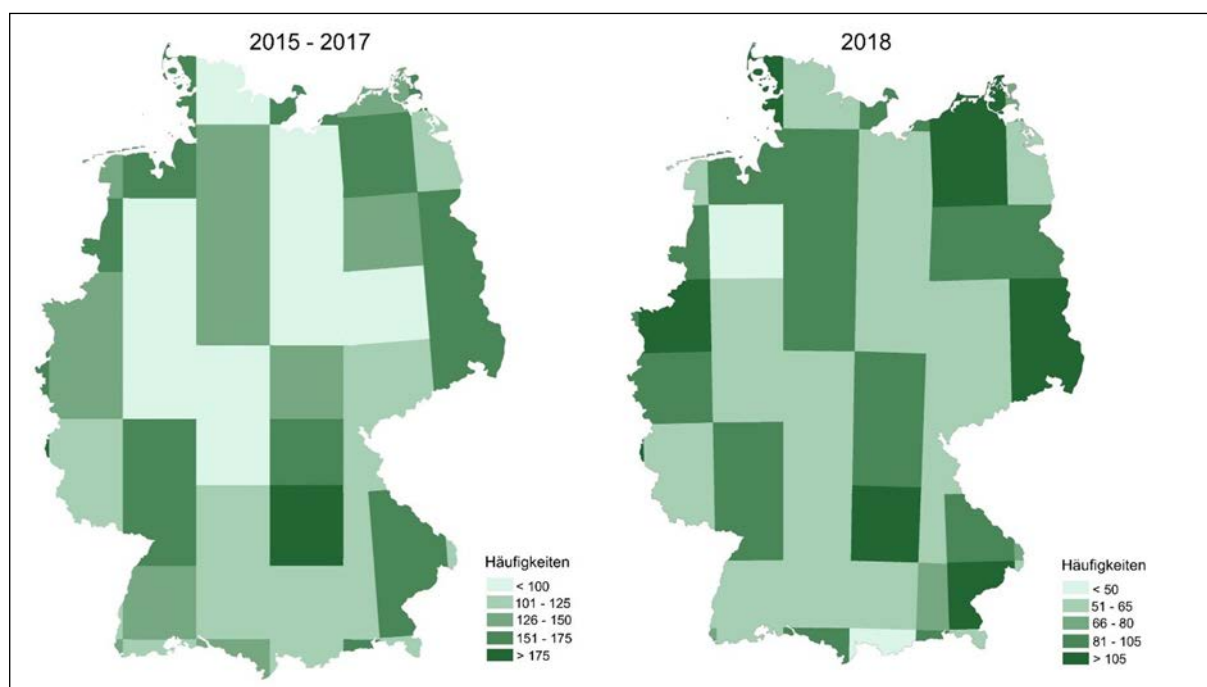
Die als Eingangsdaten zur Erstellung der Landbedeckungsklassifikation genutzten Sentinel-2-Daten wurden zuerst hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit für Deutschland analysiert.

Sentinel-2A startete im Juni 2015 und im März 2017 folgte Sentinel-2B, mit welchem sich die verfügbaren Szenen für Deutschland von ca. 20 auf ca. 30 pro Monat erhöhten. Die aufgezeichneten Szenen können allerdings nicht vollständig in die Bildanalyse einfließen, da in mitteleuropäischen Breitengraden viele Satellitenaufnahmen durch atmosphärische Einflüsse (v. a. in Form von Wolkenbedeckung) keine ausreichende Betrachtung der Erdoberfläche zulassen. Eine Festlegung des maximalen Wolkenbedeckungsschwellwertes auf weniger als 60 % und eine Konzentration auf die Vegetationsperiode Mai bis September reduzierte die Auswahl der verwertbaren Szenen. Aufgrund dessen mussten für die Landbedeckungsklassifikation 2015 auch Szenen bis einschließlich 2017 genutzt werden, um eine genügend große Abdeckung Deutschlands zu gewährleisten. Die Bereitstellung der Sentinel-2-Szenen erfolgt in 100 x 100 km Kacheln durch verschiedene Online-Plattformen, wie z. B. CODE-DE².

Abbildung 2 zeigt die Abdeckungshäufigkeit der einzelnen Satellitenbildkacheln für das Ausgangsprodukt für die nachfolgende Klassifikation unter Anwendung des o. g. Wolkenbedeckungsschwellwert von unter 60 %. Trotz regionaler Unterschiede wurden alle Regionen in Deutschland mit ausreichender Häufigkeit aufgenommen.

Abbildung 2

Abdeckungshäufigkeiten der Sentinel-2-Daten für Deutschland mit einem Wolkenbedeckungsschwellwert <60 % im Zeitraum 2015 bis 2017 und im Jahr 2018



Quelle: DLR

Mithilfe der Quality-Assurance-Informationen (QA-Band) der Satellitendaten wird für jede Bildkachel eine Wolkenmaske erstellt. Wolkenbedeckte Bereiche werden aus der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen, und anschließend kann durch die Überlagerung der Kacheln jeweils ein wolkenfreies Bildmosaik aus dem Median aller sich überlagernden Grauwerte pro Bildpunkt (Pixel) für beide Zeiträume (2015-2017 und 2018) gebildet werden. Die Verwendung des Median bietet gegenüber dem arithmetischen Mittelwert den Vorteil, dass keine statistischen Ausreißer die Analyse beeinflussen.

Für die Erstellung dieses Medianmosaik wurden die spektralen Bänder 2, 3, 4 und 8 verwendet. Aufgrund der entsprechenden Datenmengen werden sehr hohe Anforderungen an die IT-Infrastruktur gestellt (Tabelle 3).

(2)
<https://code-de.org/>

Tabelle 3

Anforderung an die IT-Infrastruktur

	Großrechner	Desktop-PCs
CPU	32 Kerne (@ 3,2 GHz)	16 Kerne (@ 3,0 GHz)
RAM	512 GB	32 GB
Festplatte	50 TB (Anbindung via 10 Gbit LAN)	50 TB (via 1 Gbit LAN)
OS	Ubuntu 18.04	Ubuntu 16.04/18.04, Linux Mint (19.1)

Quelle: DLR

In weiteren Schritten wurden aus den Spektralbändern des Medianmosaiks drei normalisierte Differenzindizes berechnet und deren 25-, 50- und 75-Perzentile gebildet:

Der Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) dient der Identifikation aktiver Vegetation und wird aus dem roten Wellenlängenbereichs (665 nm, Band 4) und des nahen Infrarots (842 nm, Band 8) gebildet (Tucker 1979):

$$NDVI = \frac{NIR - Rot}{NIR + Rot} = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

Der Normalised Difference Water Index (NDWI) dient der Abgrenzung von Wasserflächen und wird aus dem nahen Infrarots (842 nm, Band 8) und des Grünkanals Kurzwellen-Infrarots (1300 nm) berechnet und hilft Wasserflächen abzugrenzen (McFeeters 1996):

$$NDWI = \frac{Grün - NIR}{Grün + NIR} = \frac{B3 - B8}{B3 + B8}$$

Normalised Difference Built-Up Index (NDBI): Da urbane Strukturen im SWIR Bereich eine höhere Rückstrahlung als in anderen Wellenlängenbereichen haben, kann die Berechnung des NDBI zur Identifikation städtischer Strukturen genutzt werden (Zha et al. 2003):

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} = \frac{B11 - B8}{B11 + B8}$$

Um die Vorhersagekraft des Machine-Learning-Algorithmus zu verbessern, wurden zusätzliche Bildmerkmale aus den 13 Bildlayern generiert. Studien belegen, dass Texturmerkmale die Genauigkeit von Landbedeckungsklassifikationen signifikant verbessern (Khatami al. 2016). Da mit einer Granularität von 10 m Pixelgröße viele Landbedeckungsklassen stark durch ihre Nachbapixel definiert werden, wurden auch fokale Texturmerkmale erster Ordnung berechnet. Dabei erfolgte die Berechnung von Median, Mittelwert und die Standardabweichung für drei Kernelfenstergrößen von 3, 5 und 9 für alle 13 Layer. Außerdem wurden auch Gray Level Co-Occurrence Matrix (GLCM) Texturmerkmale für die vier spektralen Layer berechnet. Insgesamt wurden mehr als 200 Bildlayer aus den Sentinel-2-Daten abgeleitet. In besonders kleinteilig strukturierten urbanen Gebieten konnte durch Hinzunahme von weiteren Geodaten, OpenStreetMap oder Gebäudemodellen im Level of Detail 1 (LoD1; „Klötzchenmodell“) die Landbedeckungsklassifikation verbessert werden.

3.2.3 Klassifikation

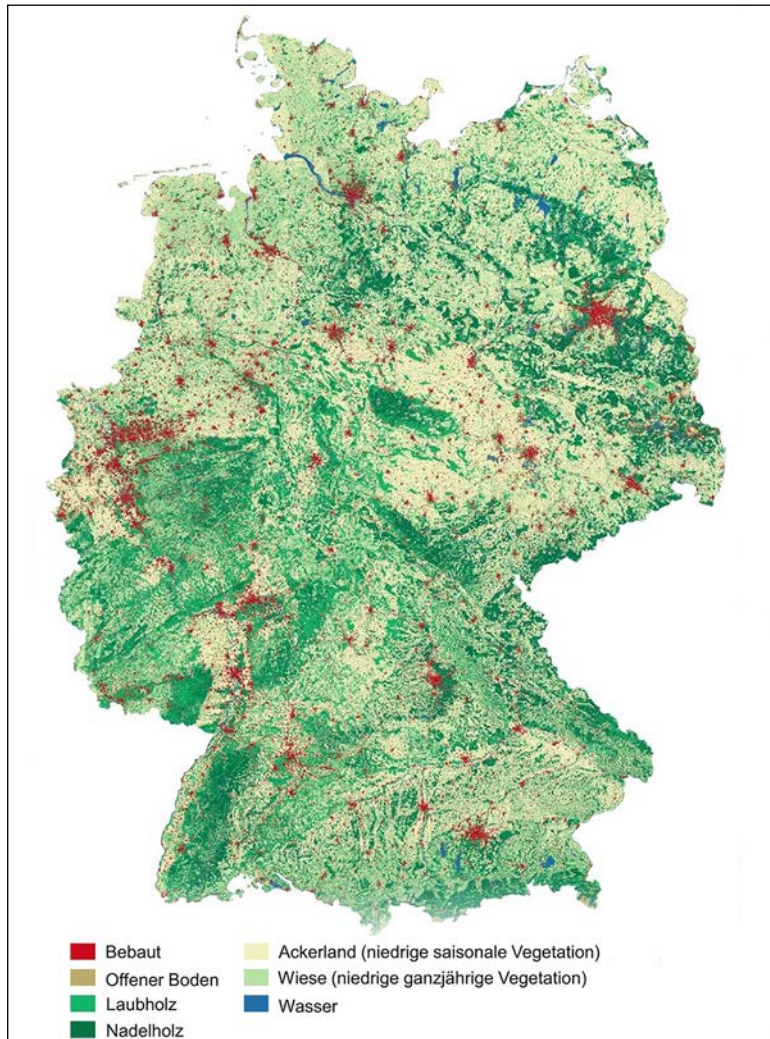
Die Klassifikation basiert auf dem maschinellen Lernverfahren Random Forest (Breiman 2001). Dieser überwachte und nicht-parametrische Algorithmus basiert auf einer Vielzahl von Entscheidungsbäumen, die durch verschiedene Trainings gebildet werden. Die Klassenzuordnung wird durch den Majority Vote bestimmt, d. h. das Pixel wird derjenigen Klasse zugeordnet, die der Mehrheit aller Entscheidungsbäume entspricht. Der große Vorteil des Random-Forest-Algorithmus liegt in seiner relativ einfachen Anwendung, welcher auch verglichen zu anderen bekannten Klassifikationsmethoden, nachgewiesen sehr gute Ergebnisse liefert (Fernández-Delgado et al. 2014).

Die Klassifikation erfolgte lokal mit der DLR-Infrastruktur, hauptsächlich in der Programmiersprache R. Die Berechnung des gesamten Gebiets der Bundesrepublik erfolgte kachelweise (50 x 50 km).

3.3 Ergebnisdatensatz

Die Klassifikation der Sentinel-2-Szenen lieferte für beide Zeitschnitte 2015-2017 bzw. 2018 Gesamtgenauigkeiten von mehr als 90 %. Abbildung 3 zeigt die bundesweite Landbedeckungsklassifikation 2018.

Abbildung 3
Landbedeckungsklassifikation 2018



Quelle: DLR

Einen Detailausschnitt des Stadtgebietes München in beiden Datensätzen zeigt die Abbildung 4. Größere städtische Grünflächen wie der Englische Garten werden deutlich erkennbar wiedergegeben. Erwartungsgemäß sind aber in dem kurzen Zeitraum auf dieser Maßstabsebene keine wesentlichen Veränderungen feststellbar.

Durch Verschneidung mit Landnutzungsinformationen erlaubt das Stadtgrünraster die Charakterisierung der Bodenbedeckung des Siedlungsraumes (vgl. Tabelle 4 und Abbildung 5). Für eine deutschlandweite Bemessung wurden Daten des Monitors der Siedlungs- und Freiraumentwicklung (IÖR-Monitor) 2018 verwendet, welche auf dem ATKIS Basis-DLM basieren und die Erdoberfläche in 38 Landnutzungskategorien lückenlos und überschneidungsfrei abbilden.

Abbildung 4

Stadtgebiet München; a) Klassifikation 2015, b) Klassifikation 2018



Quelle: DLR

Die Auswertung des Verschneidungsergebnisses wurde für die wesentlichen Komponenten des Siedlungsraums (Siedlungs- und Verkehrsfläche) durchgeführt:

- Baulich geprägte Siedlungsfläche, bestehend aus den Flächennutzungen Wohnbau, gemischte Nutzung, Industrie- und Gewerbeflächen und Flächen besonderer funktionaler Prägung,
- Siedlungsfreifläche, bestehend aus Flächen für Sport, Freizeit und Erholung und Friedhöfen,
- Verkehrsfläche, bestehend aus Flächen für Straßen-, Bahn- und Flugverkehr inkl. den zugehörigen Verkehrsleitflächen.

Die Kategorien des Stadtgrünrasters wurden für diese Analyse wie folgt aggregiert:

- Großgrün: Vereinigungsmenge von Laub- und Nadelbaumflächen
- Niedrige (ganzjährige) Vegetation: Übernahme der entsprechenden Bedeckungsklasse aus dem Stadtgrünraster
- Dicht bebaut: Bedeckungsklasse Bebaut
- Locker bebaut (durchgrünt): Bedeckungsklasse Bebaut/stark durchgrünt (siehe Kapitel 3.6)
- Sonstige: Vereinigungsmenge der Bedeckungsarten Offener Boden, Wasser, Niedrige saisonale Vegetation (Acker)

Insgesamt ist die Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV) im Mittel zu etwa 22 % durch dichte Bebauung bzw. Bodenversiegelung gekennzeichnet, während rund 13 % der SuV ebenfalls als bebaut mit einer erheblichen Durchgrünung klassifiziert werden. Baulich geprägte Flächen sind zu 34,4 % mit dichter Bebauung bedeckt, weitere 22,7 % der Flächen weisen eine lockere (durchgrünte) Bebauung auf. Siedlungsfreiflächen weisen für beide Bebauungstypen einstellige Anteilswerte auf (9,5 % dicht bebaut, 7,3 % bebaut mit hohem Grünanteil). Verkehrsflächen sind im Mittel zu 20,2 % als dicht bebaut (bzw. versiegelt) klassifiziert, ein Flächenanteil von 8,2 % wird als durchgrünt bebaut eingestuft. Der vergleichsweise hohe Anteil der sonstigen Bodenbedeckungsarten ist der Tatsache geschuldet, dass Verkehrsflächen v. a. durch gepufferte Trassenverläufe definiert

werden, die unterschiedlichste Flächennutzungsarten durchschneiden und damit die in die Analyse einfließenden Pixel des Rasterdatensatzes alle vorhandenen Bodenbedeckungsarten beinhalten können.

Im Vergleich der Vegetationsbedeckung ist die niedrige ganzjährige Vegetation (Wiese) in allen Nutzungskategorien der Siedlungs- und Verkehrsfläche dominant gegenüber dem Baumbestand. Besonders ausgeprägt ist das Verhältnis in den baulich geprägten Flächen, wo die Bedeckung mit niedriger Vegetation im Mittel mit 34,3 % mehr als die fünffache Fläche der baumbestandenen Fläche (6,4 %) einnimmt. Siedlungsfreiflächen sind zu 62,8 % ihrer Flächen von Wiese bedeckt, Großgrün folgt hier mit 18 % (Verhältnis ca. 1:3,5).

Insgesamt lässt sich aus diesen Zahlen ermitteln, dass in Deutschland die Siedlungs- und Verkehrsflächen insgesamt über die Hälfte mit 57,4 % mit Vegetation bedeckt ist (Anteil Großgrün 13,5 %, Wiese 43,9 %).

Tabelle 4

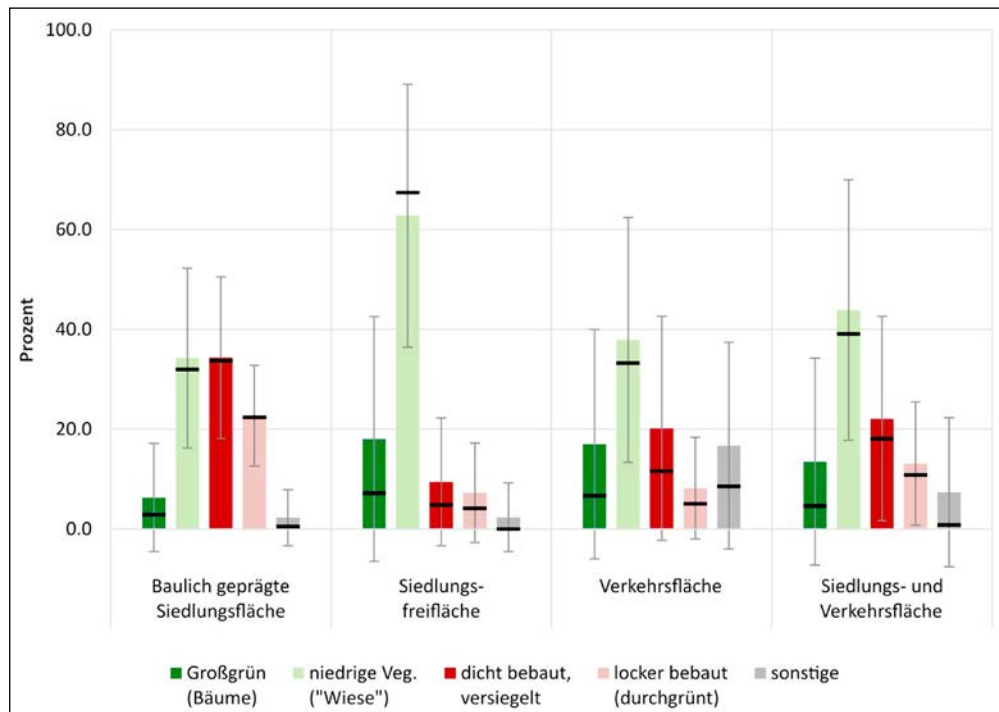
Anteil Bodenbedeckung im Siedlungsraum nach der Landbedeckungsklassifikation

Landnutzung (IÖR-Monitor)	Landbedeckung (Stadtgrünraster)	Flächenanteile in Prozent		
		Median	Mittelwert	Std.-abw.
Baulich geprägte Siedlungsfläche	Großgrün (Bäume)	2.9	6.4	10.8
	Niedrige Vegetation („Wiese“)	32.0	34.3	18.0
	Dicht bebaut, versiegelt	33.7	34.4	16.2
	Locker bebaut, stark durchgrünt	22.4	22.7	10.1
	Sonstige	0.5	2.3	5.6
Siedlungsfreifläche	Großgrün (Bäume)	7.2	18.0	24.5
	Niedrige Vegetation („Wiese“)	67.4	62.8	26.3
	Dicht bebaut, versiegelt	4.8	9.5	12.8
	Locker bebaut, stark durchgrünt	4.2	7.3	10.0
	Sonstige	0.0	2.4	6.9
Verkehr	Großgrün (Bäume)	6.7	17.0	23.0
	Niedrige Vegetation („Wiese“)	33.2	37.9	24.6
	Dicht bebaut, versiegelt	11.6	20.2	22.4
	Locker bebaut, stark durchgrünt	5.1	8.2	10.2
	Sonstige	8.5	16.7	20.7
Siedlungs- und Verkehrsfläche	Großgrün (Bäume)	4.6	13.5	20.8
	Niedrige Vegetation („Wiese“)	39.1	43.9	26.1
	Dicht bebaut, versiegelt	18.1	22.1	20.5
	Locker bebaut, stark durchgrünt	10.8	13.1	12.4
	Sonstige	0.9	7.4	14.9

Quelle: IÖR

Abbildung 5

Bodenbedeckung des Siedlungsraumes nach der Landbedeckungsklassifikation 2018. Die Kategorie Großgrün umfasst Laub- und Nadelbäume aus dem Stadtgrünraster; Sonstige Bedeckung umfasst saisonale niedrige Vegetation (Acker), Wasserflächen und offenen Boden. Dargestellt sind die Mittelwerte der Anteile der Bodenbedeckungsarten an den Teilkomponenten der Siedlungs- und Verkehrsfläche mit indizierten Standardabweichungen. Die schwarzen Linien markieren die jeweiligen Medianwerte.



Quelle: IÖR

3.4 LUCAS-basierte Validierung

Während 80 % der LUCAS-Referenzpunkt als Trainingsdaten für den Klassifikator verwendet wurden, dienten die verbleibenden 20 % der Punkte für die Validierung, welche nach einer definierten Konzeption und objektiv angelegten Qualitätskriterien durchgeführt wurde (vgl. Weigand et al. 2020). Die Ermittlung der Genauigkeit des Klassifikationsproduktes anhand der Validierungspunkte erfolgt in tabellarischer Form über Konfusionsmatrizen. Diese zeigen die Anzahl der richtig und falsch klassifizierten Pixel jeder Klasse (Tabelle 5 und Tabelle 6) zur Ermittlung der Klassifikationsgüte. Korrekt klassifizierte Pixel in der Diagonalen der Tabelle sind hervorgehoben. Die Gesamtgenauigkeit (Overall Accuracy) weist einen Wert von 93,6 % für 2015 bzw. von 91,4 % für 2018 auf.

Die LUCAS-Punkte 2018 haben sich in der räumlichen und semantischen Verteilung im Vergleich zum Jahr 2015 stark verändert. Auf diese Tatsache wird in dem Kapitel 6.2 noch ausführlicher eingegangen. Ein Vergleich der Konfusionsmatrix (Tabelle 5 und Tabelle 6) zeigt, dass in der Klasse *Offener Boden* und in der Klasse *Wasser* für 2018 deutlich weniger Punkte vorhanden sind. Die Anzahl der LUCAS-Punkte für die Klasse *Wasser* hat sich von 628 (2015) auf 127 (2018) reduziert. Auch die verwendbaren LUCAS-Punkte für die Klasse *Offener Boden* haben sich von 113 (2015) auf 57 (2018) verringert. Aufgrund der geringen Anzahl für ein Training und eine Validierung in der Klasse *Offener Boden* für die Klassifikation 2018 muss diese Klasse kritisch interpretiert werden.

Tabelle 5

Konfusionsmatrix zwischen LUCAS-Referenzpunkten (Spalten) und der klassifizierten Klassen (Zeilen) in der Klassifikation 2015 mit Overall Accuracy (OA), User's Accuracy (UA) and Producer's Accuracy (PA)

Klassifikation	Referenzklassen							UA [%]
	1	2	3	4	5	6	7	
1 Bebaut	137	3	3	1	0	4	3	90,7
2 Offener Boden	0	11	0	0	0	2	0	84,6
3 Laubholz	4	0	467	28	2	20	9	88,1
4 Nadelholz	1	0	15	564	2	8	0	95,6
5 Ackerland	1	1	3	0	1581	52	0	96,5
6 Wiese	3	2	28	7	35	761	8	90,2
7 Wasser	0	1	0	0	0	2	92	96,8
PA [%]	93,8	61,1	90,5	94,0	97,6	89,6	82,1	OA=93,6

Quelle: DLR

Tabelle 6

Konfusionsmatrix zwischen LUCAS-Referenzpunkten (Spalten) und der klassifizierten Klassen (Zeilen) in der Klassifikation 2018 mit Overall Accuracy (OA), User's Accuracy (UA) and Producer's Accuracy (PA)

Klassifikation	Referenzklassen							UA [%]
	1	2	3	4	5	6	7	
1 Bebaut	169	2	1	0	1	12	0	91,4
2 Offener Boden	0	1	0	0	0	0	0	100
3 Laubholz	2	0	474	46	7	26	2	85,1
4 Nadelholz	1	1	27	520	2	8	3	92,3
5 Ackerland	2	4	1	2	1641	61	1	95,9
6 Wiese	10	0	33	19	59	763	3	86,0
7 Wasser	0	0	0	0	0	0	13	100
PA [%]	91,8	12,5	88,4	88,6	96,0	87,7	59,1	OA=91,4

Quelle: DLR

Um die Gesamtgenauigkeit der Klassifikationen zu verbessern, wurden die Klassifikationen in zwei Klassen (grün/nicht grün) unterteilt. Die Referenzpunkte müssen dementsprechend nach den neuen Klassen eingeteilt werden und die gleichen 20 % der LUCAS-Punkte, die für die Klassifikation als Validierung genutzt wurden, dienen auch für diese Klassifikation als Validierung. Dies resultiert in eine Gesamtgenauigkeit über 96 % (2015) bzw. über 95 % (2018), wenn die Grünflächen aus den Klassen *Laubholz*, *Nadelholz* und *Wiese* definiert werden. Wenn auch die Klasse *Ackerland* zu den Grünflächen gezählt wird, erreichen die Gesamtgenauigkeiten Werte von 99 % (2015) und 98 % (2018).

Der Hintergrund dieser Überlegung ist, den Fokus auf die Grünflächen als Ganzes zu legen und auf die Differenzierung der Grünklassen zu verzichten. Innerhalb dieser Klassen sind auch die größten Streuungen in den Konfusionsmatrizen (Tabelle 5 und Tabelle 6) zu erkennen. Dies liegt an der hohen Übereinstimmung der spektralen Signaturen der Klassen Laubbaum, Nadelbaum sowie Ackerland und Wiese. Damit stellt die Trennung dieser Klassen eine größere Herausforderung dar als die Trennung zwischen bebauten und vegetationsbestandenen Flächen. In der Veränderungsanalyse (siehe Kapitel 6.2) bringt dieser Ansatz gegenüber den im entsprechenden Produktbericht dargestellten Ergebnissen jedoch keinen Mehrwert, da die Klassen der Grünflächen bereits zusammen betrachtet wurden und sich das Verhältnis durch die Reklassifizierung nicht ändert.

3.5 Zusätzliche Validierung über Grünvolumendaten

Eine zusätzliche Validierung des Klassifikationsproduktes wurde anhand von Daten zweier Fallstudienstädte (Leipzig und Potsdam) durchgeführt, für die im Rahmen des Projektes durch den Projektpartner LUP zwei räumlich sehr hochauflösende Grünvolumenklassifikationen erstellt wurden. Dabei wurde der Fokus auf den prozentualen Grünanteil der Referenzkartierung an den Sentinel-2-Pixeln gelegt. Es wird deutlich, dass Pixel, die in der deutschlandweiten Landbedeckungsklassifikation als Vegetation klassifiziert sind, zu über 90 % auch in den hochauflösenden Grünvolumendaten als vegetationsbestandene Bereiche ausgewiesen sind. Damit kann eine hohe Güte auch aus diesem Vergleich der Datensätze konstatiert werden. Beide Zeitschnitte wurden nach diesem Verfahren validiert und liefern sehr ähnliche Ergebnisse. Da es im Grünvolumen dieser beiden Städte vom Jahr 2016 auf das Jahr 2018 kaum Änderungen gab, konnten dieselben Referenzdaten genutzt werden, die auch für die Validierung des Klassifikationsproduktes 2015 verwendet wurden.

Im Zuge der Validierung wurde deutlich, dass vor allem in urbanen Gebieten mit lockerer Bebauung und hohem Grünanteil (z. B. Ein- und Zweifamilienhausbebauung, oder auch teilweise Blockbebauung), die räumliche Auflösung von 10 Metern in den Sentinel-2-Daten eine große Herausforderung darstellt. Abbildung 6 zeigt ein locker bebautes Gebiet in München mit der Klassifikation 2018 (a) und mit einer sehr hochaufgelösten Klassifikation (b) (DLR). Die darunter liegenden Satellitenszenen (c, d) sind die Daten, auf welchen die jeweilige Klassifikation basiert. Die hochaufgelöste Klassifikation wurde mit WorldView3 Szenen mit einer räumlichen Auflösung von 50 cm berechnet. Das graue Gitternetz stellt die Pixelgröße der Sentinel-2-Daten von 10 m dar. Dies zeigt die Herausforderung bzw. auch Grenzen, heterogene Gebiete in dieser Pixelgröße semantisch korrekt zu klassifizieren. Viele Pixel in Abbildung 5b weisen Anteile mehrerer Klassen wie Vegetation oder Gebäude auf.

Abbildung 6

Ausschnitt locker bebautes Gebiet in München mit Sentinel-2-Pixelgröße;

a) Klassifikation 2018, b) hochauflösende Klassifikation, c) Sentinel-2-Aufnahme, d) WorldView3 Aufnahme



Quelle: DLR

3.6 Einführung der Klasse Bebaut – stark durchgrünt

Vor dem Hintergrund der Heterogenität urbaner Strukturen wurde aus der Klasse Bebaut eine weitere Klasse mit der Bezeichnung Bebaut – *stark durchgrünt* ausgegliedert. Dies trägt dem Umstand Rechnung, dass städtische Siedlungsbereiche oft durch einen engen Wechsel von Bebauung und Vegetationsbestand geprägt sind.

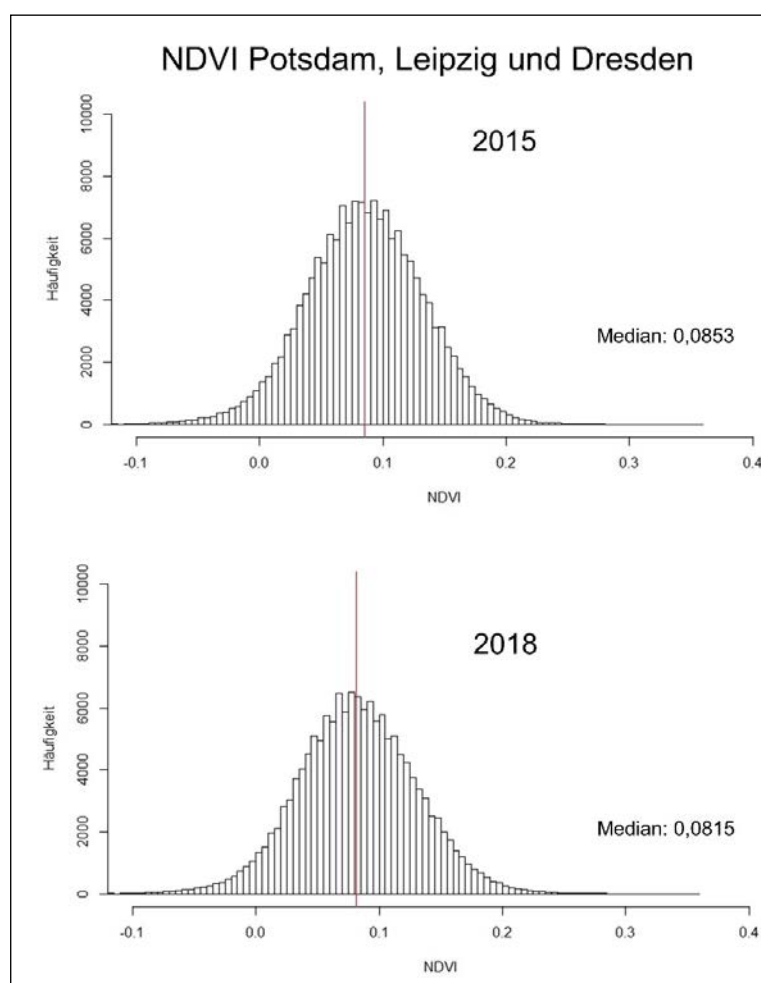
Auf Basis des NDVI, welcher bereits für den ersten Schritt der Klassifikation berechnet wurde, wurden die Bereiche, welche zunächst der Klasse *Bebaut* zugeordnet wurden, weiter qualifiziert. Dieser Index stellt ein etabliertes Maß zur Vegetationserkennung, basierend auf Fernerkundungsdaten, dar. Überschreitet der NDVI ein bestimmtes Maß, so ist im Pixel mit einem hohen Vegetationsanteil zu rechnen.

Mittels vorliegender sehr hochauflösender Referenzdaten für die Fallstudienstädte Potsdam und Leipzig sowie aufgrund der Verfügbarkeit von entsprechenden Daten zusätzlich auch für die Stadt Dresden konnte empirisch ein NDVI-Schwellwert abgeleitet werden, für den innerhalb der Klasse Bebaut mit einem prägenden Grünanteil im Pixel ausgegangen werden kann.

Die folgenden zwei Histogramme (Abbildung 7) zeigen die NDVI-Verteilung für diejenigen Pixel innerhalb der Klasse Bebaut, für welche anhand der hochauflösenden Grünklassifizierungen der Städte Leipzig, Dresden und

Abbildung 7

NDVI Verteilung in den Städten Potsdam, Leipzig und Dresden in der Landbedeckungsklasse Bebaut 2015 und 2018 bezogen auf Pixel, welche einen Grünflächenanteil von 50-60 % aufweisen bezogen auf die Referenzdaten



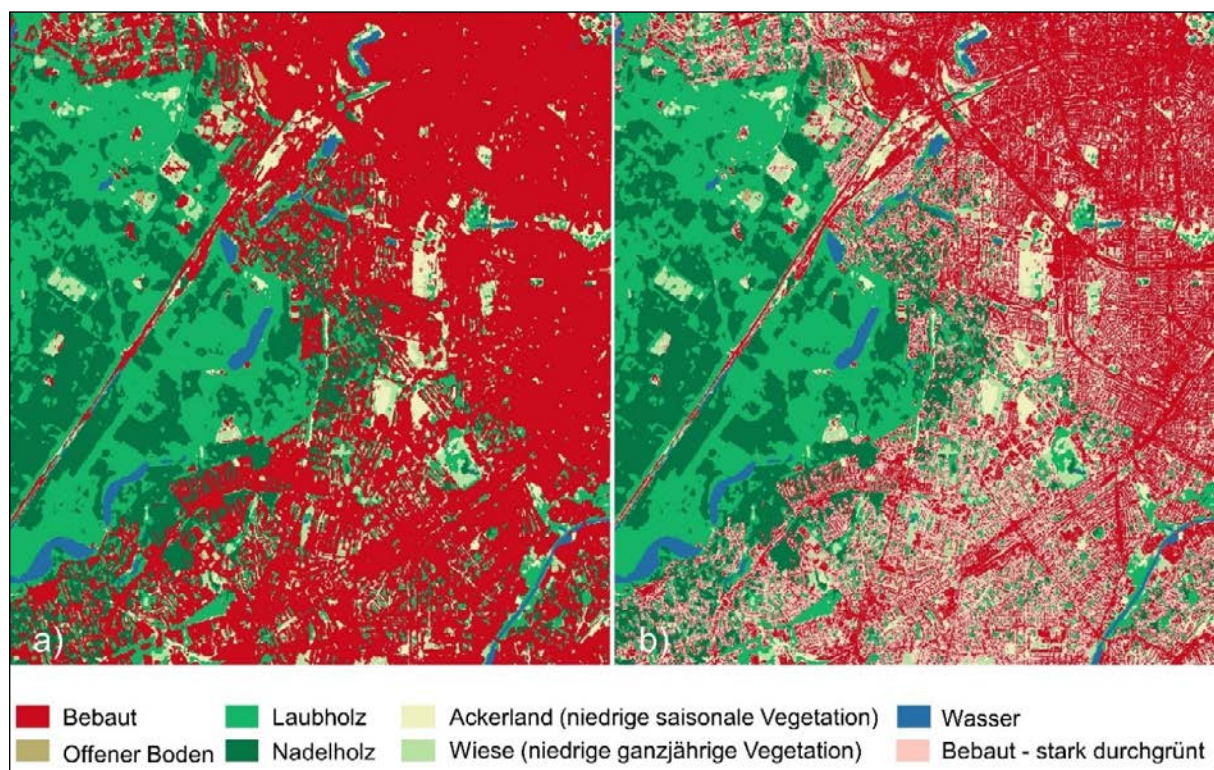
Quelle: DLR

Potsdam ein Grünflächenanteil von 50-60 % im Sentinel-2-Pixel ermittelt werden konnte. Die Histogramme weisen eine fast identische NDVI-Verteilung auf, was für die Robustheit der Klassifikationsmethode spricht. Der Median-Wert wird als Schwellwert für den jeweiligen Zeitabschnitt genutzt. Da sich diese Werte erst in der dritten Nachkommastelle unterscheiden, wird von der Generalisierbarkeit des Schwellwertes auf andere Gebiete ausgegangen.

Abbildung 8a zeigt ein Beispiel der Klassifikation 2015 aus Berlin Grunewald und Abbildung 8b zeigt den gleichen Ausschnitt mit der Hinzunahme der weiteren Klasse durchgrünte Bebauung. Die Differenzierung der vorher überrepräsentierten Klasse 1 (*Bebaut*), welche sich durch die Hinzunahme der Klasse 8 (*Bebaut – stark durchgrünt*), ergibt, wird deutlich sichtbar. Innerhalb von geschlossenen bebauten Gebieten wird somit beispielsweise auch die Strukturierung durch Straßengevierte erkennbar (b).

Abbildung 8

Ausschnitt aus der Landbedeckungsklassifikation in Berlin Grunewald;
a) Beispiel ohne durchgrünte Bebauung b) Beispiel mit durchgrünter Bebauung



Quelle: DLR

Für die Validierung der zusätzlichen Klasse *Bebaut – stark durchgrünt* wurden für alle drei Städte der prozentuale Grünflächenanteil pro Sentinel-2-Pixel der Klasse 8 in der Landbedeckungsklassifikation, bezogen auf die hochauflösenden Referenzdaten, berechnet. Für den Zeitschnitt 2015 liegt der Großteil der Werte im Bereich von ca. 50-90 %. Für den Zeitschnitt 2018 liegen die Werte etwas niedriger im Bereich von ca. 40-85 %. Aufgrund dieser Werte wurde die zunächst sieben Klassen umfassende Landbedeckungsklassifikation um die Klasse stark durchgrünter Bebauung erweitert. Das führt zu einem differenzierteren und besser interpretierbaren Geodatenprodukt. Jedoch kann aufgrund der Streuung der tatsächlichen Grünanteilswerte in diesen Pixeln kein sinnvoller Mittelwert angenommen werden, so dass sie für die Quantifizierung des Grünanteils einer Stadt nicht verwendet werden kann.

3.7 Bereinigung von Fehlklassifikationen

Teilweise fallen in urbanen Bereichen Fehlklassifikationen auf, die durch einen weiteren Schritt der Postklassifikation zu minimieren sind. Insbesondere weisen die thematischen Klassen *Offener Boden* und *Bebaut* oftmals sehr ähnliche spektrale Signaturen auf, was zu Fehlklassifikationen im innerstädtischen Bereich führen kann. Niedrige Vegetation (Landbedeckungsklasse „Wiese“) und Landwirtschaft sowie Wasserflächen und verschattete Bereiche können ebenfalls nicht immer eindeutig voneinander getrennt werden. In der Fernerkundung stellt dies grundsätzlich eine Herausforderung dar, denn die spektrale Reflexion von Schattenbereichen ist sehr gering und ähnelt dadurch sehr stark Wasserflächen.

Für die Bereinigung des originären Klassifikationsergebnisses wurden Geobasisdaten des ATKIS-Basis-DLMs herangezogen, um wahrscheinliche Fehlklassifikationen, z. B. wenig plausible Acker- und Wasserflächen innerhalb von Siedlungen, zu reduzieren.

Dabei erfolgt eine Bewertung der Klassenzugehörigkeit der Pixel anhand zweier ATKIS-basierter Suchmasken „Wasser“ und „Landwirtschaft“. Die Suchmasken werden durch Selektion der relevanten flächenhaft modellierten ATKIS-Objekte gebildet. Für die Wasserflächen sind dies die Objektarten 44001 ‚Fließgewässer‘, 44006 ‚Stehendes Gewässer‘, für die Landwirtschaftsflächen die Objektart 43001 ‚Landwirtschaft‘. Die Objekte liegen als Polygone vor und werden, passend zum Klassifikationsprodukt, auf 10 m Pixelgröße gerastert.

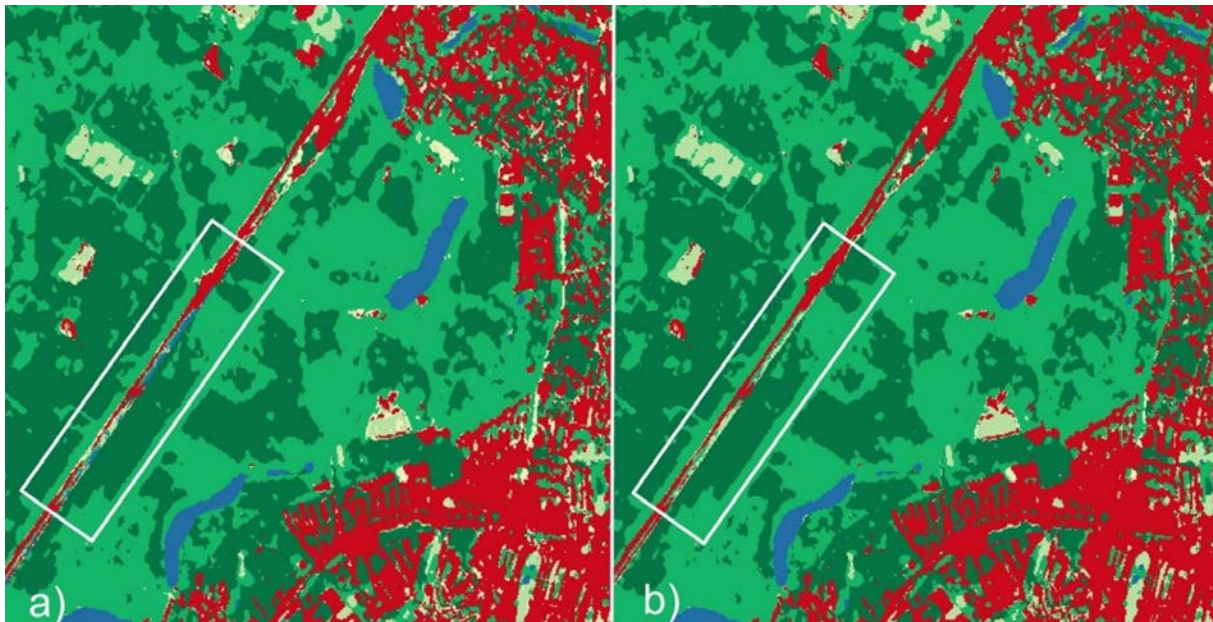
Zusätzlich zu den ATKIS-Daten wird ein hierarchischer Zugehörigkeits-Layer benötigt, welcher pixelweise die Zuordnungshäufigkeiten für jede Landbedeckungsklasse anzeigt, welche sich aus dem Random-Forest-Klassifikator ergeben. Die Zuordnungshäufigkeiten werden als Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit des Pixels zu den einzelnen Landbedeckungsklassen interpretiert.

Die ATKIS-Suchmasken dienen in dem verfolgten Ansatz der Postklassifikation als Kriterium, um die Wahrscheinlichkeitswerte für die Klassen 5 (*Ackerland*) und 7 (*Wasser*) zu halbieren, wenn sich diese außerhalb der ATKIS-Suchmasken Landwirtschaftsflächen bzw. Wasserflächen befinden. Die Klassifikation des betreffenden Pixels wurde anschließend neu durchgeführt. Dadurch werden Acker- und Wasser-Pixel außerhalb der Suchmasken, deren Zuordnungswahrscheinlichkeit nicht mindestens doppelt so hoch ist wie die der nachfolgenden Klasse, geändert und der ursprünglich als zweitbeste Möglichkeit ermittelten Klasse zugeordnet. Mit dieser Methode kann ein Großteil der Fehlklassifikationen im urbanen Bereich eliminiert werden, während Pixel, die mit einer hohen Wahrscheinlichkeit Ackerland oder Wasser zugeordnet wurden, ihre Klassenzugehörigkeit (auch im Siedlungsraum) behalten.

Die folgende Abbildung zeigt zwei identische Ausschnitte aus Berlin Grunewald. Abbildung 8a stellt das Ergebnis der originären Klassifikation aus dem Jahr 2015 dar und Abbildung 8b zeigt die geänderte Situation nach der Postklassifikation 2015. Der mit einem weißen Rahmen markierte Bereich zeigt im Original fehlerhafte Wasserpixel, bedingt durch Schatteneffekte entlang der Straße. In diesem Beispiel wurden die fehlerhaften Pixel Wasser zu Laubholz und Wiese reklassifiziert.

Abbildung 9

Ausschnitt Grunewald Berlin, a) Original Landbedeckungsklassifikation 2015,
b) Postklassifikation auf Basis der Landbedeckungsklassifikation 2015



Quelle: DLR

Die bereinigte Landbedeckungsklassifikation kann als gute Grundlage für die Berechnung verschiedener Grünindikatoren dienen, wie das Kapitel 4 aufzeigt.

4 Indikatorbasierte Auswertung des Stadtgrünrasters

4.1 Indikatordefinition

Als Indikator (lat. *indicare* „anzeigen“) wird ein sichtbares oder empirisch fassbares quantitatives Merkmal bezeichnet, welches in der Geographie, Raumordnung und Umweltforschung auf nicht unmittelbar zugängliche Raumaspekte, Begriffe oder Prozesse (das *Indikandum*) hinweist. Indikatoren bieten die Möglichkeit, Zielerreichungsgrade zu messen sowie die Messergebnisse zu kommunizieren und tragen zur Identifizierung von Fortschritten gegenüber vereinbarten Zielen bei. So lassen sich mittels Indikatoren Verbesserungen bzw. Verschlechterungen lokalisieren und Handlungsbedarfe ableiten. Mittels raumbezogener Indikatoren können Vergleiche zwischen verschiedenen Regionen bzw. Städten ermöglicht werden. Hierfür müssen sich Indikatoren durch Zielkonformität, Aussagekraft, Verständlichkeit, räumliche Vergleichbarkeit und Praktikabilität auszeichnen (IÖR 2019).

Für die Erfassung des Ist-Zustandes des Stadtgrüns, des Erkennens von Defiziten und der Beobachtung von Entwicklungen können geeignete Indikatoren als Grundlage dienen. Die Auswahl von entsprechenden Indikatoren muss die Multifunktionalität des Grüns widerspiegeln. So sind die Erholung, Klimaregulation und Lebensraum zentrale Funktionen des Stadtgrüns, welche es zu erhalten und zu fördern gilt.

Die Eignung von Indikatoren für einen bundesweiten Vergleich und das Monitoring von urbanem Grün wird durch folgende Kriterien beschrieben:

- Relevanz für die Fragestellung,
- Erfassbarkeit durch geeignete Geodatenprodukte (z. B. Geobasisdaten, Fernerkundungsdaten),
- zeitliche Verfügbarkeit (langfristige Bezugsmöglichkeiten der Datenquellen),
- flächendeckende Verfügbarkeit in einheitlicher Qualität für das gesamte Bundesgebiet,
- Verlässlichkeit (Auflösung, semantische Genauigkeit),
- skalenmäßige Übertragbarkeit sowie die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Raumeinheiten.

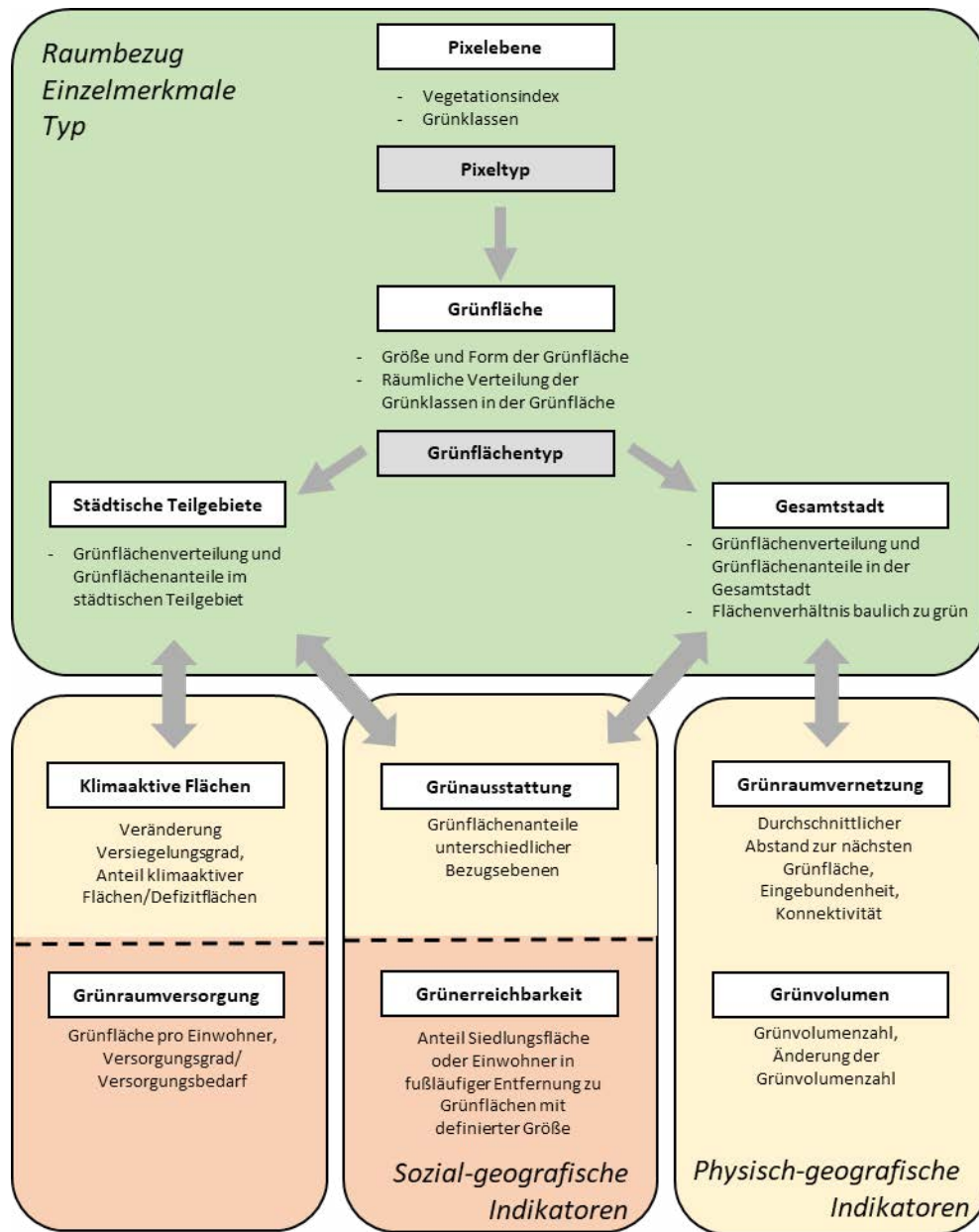
Als Ausgangsdaten zur Klassifizierung des Stadtgrüns dienen die in Kapitel 3 beschriebenen Sentinel-2-Satellitendaten. Somit ist eine flächendeckende Klassifizierung des Stadtgrüns für die Bundesrepublik Deutschland in einheitlicher Qualität bei hoher Auflösung (10 x 10 m) und für verschiedene Zeitstände möglich, wodurch die Grundlage für eine Erfassung der urbanen Grünausstattung für deutsche Städte geschaffen wird. Ausgangsprodukt der nachfolgenden Indikatorberechnung ist das Produkt *Stadtgrünraster Deutschland*.

Bei der Entwicklung und Einordnung der Indikatoren wurde ein multiskalarer Ansatz verfolgt, welcher in der Abbildung 10 dargestellt wird.

Die Pixel mit einer räumlichen Auflösung von 10 x 10 m werden entsprechend ihrer Vegetationsbedeckung klassifiziert und den Grünklassen Nadelholz, Laubholz oder Wiese (ganzjährige niedrige Vegetation) zugeordnet (Pixeltyp). Auf Pixelebene sind somit Aussagen zur Zugehörigkeit zu einer der Vegetationstypen der Landbedeckungsklassifikation sowie (eingeschränkt) zur Vegetationsschicht möglich.

Die klassifizierten Pixel bilden die Grundlage für die Bildung von zusammenhängenden Objekten, welche hier als „Grünfläche“ adressiert werden. Diese können sich hinsichtlich ihrer Größe und Form unterscheiden.

Abbildung 10
Übersicht Indikatorenentwicklung



Quelle: IÖR

Abhängig von der Vegetationsausstattung und der räumlichen Verteilung der Grünklassen in der Grünfläche unterscheiden sich Grünflächen auch in ihrer Funktion beispielsweise für das Stadtklima oder als Erholungsfläche. Angereichert durch ergänzende Informationen, wie Landnutzungsinformationen aus Geobasisdaten oder anderen Kartierungen, können weitere Eigenschaften mit den einzelnen Grünflächen verknüpft werden.

Bei Betrachtung der Grünflächen in Teilgebieten (z. B. Stadtteilen) können Aussagen zu deren Anzahl und räumlicher Verteilung getroffen werden. So sind auch Aussagen zum Flächenverhältnis von baulich geprägt zu grün geprägt möglich. Städtische Teilgebiete lassen sich mit diesen Informationen in Grünstrukturtypen differenzieren (Hennersdorf/Lehmann 2014).

Eine entsprechende räumliche Gliederung der Städte in Teilgebiete kann nach unterschiedlichen Kriterien erfolgen. Hierzu bieten sich verschiedene Möglichkeiten der Abgrenzung an:

- Stadtbezirke/Stadtteile,
- Wahlkreise/Wahlbezirke,
- Postleitzahlengebiete,
- Gemarkungen und eingemeindete Ortsteile,
- Siedlungsstrukturelle Merkmale,
- Topografische Gegebenheiten,
- INSPIRE-konforme Gitter.

Insbesondere die Untergliederung in Stadtbezirke/Stadtteile wird als zweckmäßig angesehen, da diese der Verwaltungsorganisation entsprechen, Identifikation stiften und für diese Einheiten die Einwohnerzahlen bekannt ist, so dass auch einwohnerbezogene Indikatoren berechnet werden können.

Generell lassen sich alle Indikatoren sowohl auf gesamtstädtischer Ebene als auch auf der Ebene der Teilgebiete berechnen. In der Abbildung 10 sind die Indikatoren der räumlichen Ebene zugeordnet, für die eine Berechnung des Indikators als besonders aussagekräftig erscheint.

Auf Basis des Stadtgrünrasters wurden die Indikatoren Grünausstattung, Grünraumvernetzung, Klimaaktive Flächen, Grünvolumen, Grünraumversorgung und Grünerreichbarkeit berechnet. Die Indikatoren selbst werden durch einen oder mehrere Kennwerten (Teilindikatoren) beschrieben. In der Tabelle 7 sind die Kennwerte der Indikatoren Grünausstattung, Grünraumversorgung, Grünerreichbarkeit, Grünraumvernetzung und Klimaaktive Flächen aufgeführt, welche mit dem Stadtgrünraster für alle deutschen Städte berechnet wurden.

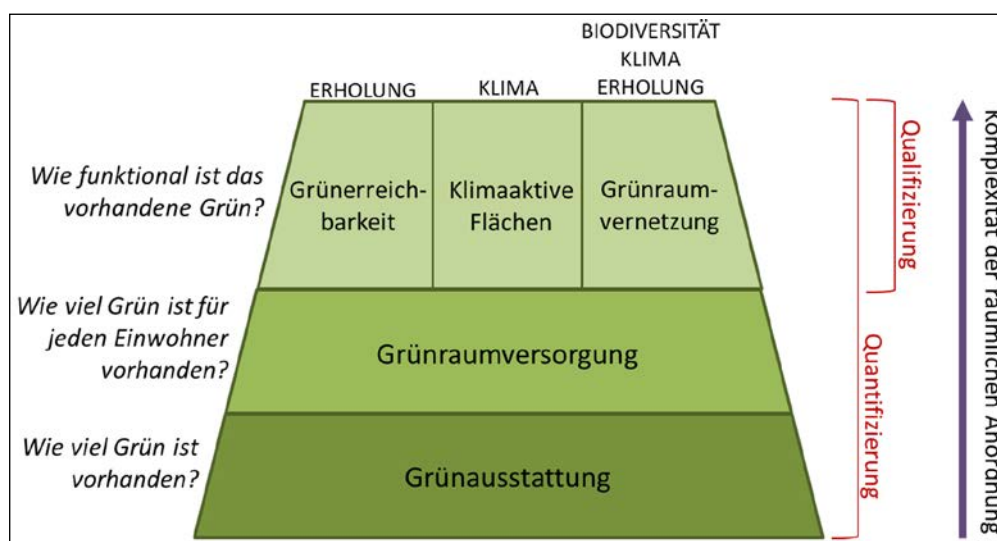
Tabelle 7
Bundesweit berechenbare Indikatoren

Indikator	Kennwert (Teilindikator)	Einheit	Berechnung	Ebene
Grünausstattung	Grünanteil bezogen auf das administrative Stadtgebiet	%	Fläche Grün/ administrative Fläche *100	Gesamtstadt, Stadtteile
	Grünanteil bezogen auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV)	%	Fläche Grün/Siedlungs- und Verkehrsfläche *100	Gesamtstadt, Stadtteile
Grünraumversorgung	Grünbedeckte Fläche pro Einwohner bezogen auf das administrative Stadtgebiet	m ²	Fläche Grün/Einwohnerzahl	Gesamtstadt, Stadtteile
Grünerreichbarkeit	Anteil der Siedlungsfläche in definierter Entfernung zu grünbedeckter Fläche mit definierter Mindestgröße	%	Siedlungsfläche innerhalb eines definierten Radius um Grünflächen/Gesamtsiedlungsfläche * 100	Gesamtstadt, Stadtteile
	Euklidische Distanz	m	Mittlere euklidische Distanz baulich geprägter Siedlungsfläche zu nächstgelegener Grünfläche	Gesamtstadt, Stadtteile
Grünraumvernetzung	Isolation von anderen Grünflächen: durchschnittlicher Abstand zur nächsten Grünfläche	m	Durchschnitt aller euklidischen Distanzen von Grünflächen zu benachbarten Grünflächen	Gesamtstadt, Stadtteile
	Proximity	m	Median aller Proximity-Werte für die Grünflächen in einer Stadt (Summe der Quotienten aus Flächengröße und Distanz aller Grünflächen im festgelegten Suchradius um eine Grünfläche)	Gesamtstadt
Klimaaktive Flächen	Bodenversiegelungsgrad	%	0,71* bebaute Fläche/ Gesamtfläche *100	Gesamtstadt, Stadtteile
	Anteil potenzieller (klimaaktiver) Defizitflächen bezogen auf das administrative Stadtgebiet*	%	Defizitfläche/Fläche administrative Fläche *100	Gesamtstadt, Stadtteile

* Für Ermittlung Defizitfläche Verwendung der Klasse „Bebaut – stark durchgrünt“ und Pufferradius von 75 m um Grünfläche
Quelle: IÖR

Dieses Indikatorensystem adressiert unterschiedliche Fragestellungen zum urbanen Grün und lässt sich in einem Stufenmodell darstellen, welches den systematischen Zusammenhang der Indikatoren verdeutlicht (Abbildung 11).

Abbildung 11
Schematischer Zusammenhang der einzelnen Indikatoren



Quelle: IÖR

Der Indikator **Grünausstattung** bildet die Basis des Modells. Er beschreibt die Menge des vorhandenen Grüns als Flächenanteil quantitativ unabhängig von der Flächennutzung sowie der Funktionalität des Grüns. Ein Monitoring der Entwicklung des insgesamt verfügbaren Grüns wird somit ermöglicht. Mit den zwei Kennwerten *Grünanteil bezogen auf das administrative Stadtgebiet* und *Grünanteil bezogen auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV)* wird die Grünausstattung auf zwei unterschiedlichen Bezugsebenen berechnet. Während ersterer das gesamte Grün im Stadtgebiet widerspiegelt, konzentriert sich der zweite auf Grün im unmittelbaren Siedlungsraum.

In der nächsten Stufe wird das vorhandene Grün zur Einwohnerzahl in Beziehung gesetzt. Der Indikator **Grünraumversorgung** beschreibt die Versorgung der Stadtbewohner mit urbanem Grün. Unter dem Aspekt der Umweltgerechtigkeit wird mit dem Kennwert *Grünbedeckung pro Einwohner bezogen auf das administrative Stadtgebiet* deutlich, wieviel Grün jedem Einwohner theoretisch zur Verfügung steht. Hieraus lassen sich Schlüsse auf Versorgungsunterschiede, -defizite und -bedarfe ziehen.

Mit den Indikatoren **Grünerreichbarkeit**, **Klimaaktive Flächen** und **Grünraumvernetzung** werden unterschiedliche Funktionen des Grüns für die Einwohner näher betrachtet.

Neben dem Vorhandensein von Grünflächen ist auch deren fußläufige Erreichbarkeit für die Nutzung wichtig und hat einen entscheidenden Einfluss auf die Häufigkeit und Dauer des Aufenthalts im Stadtgrün. Somit steht die Erreichbarkeit unmittelbar auch mit Erholung und Gesundheitsvorsorge in Verbindung. Dies wird durch den Indikator **Grünerreichbarkeit** mit den Kennwerten *Anteil der für Wohnen genutzten Siedlungsfläche in definierter Entfernung zu grünbedeckter Fläche mit definierter Mindestgröße* und *der Mittleren euklidischen Distanz* adressiert. Zur Berechnung werden euklidische Distanzen (Luftlinienlänge) bestimmt und als Näherung der fußläufigen Entfernung bzw. Erreichbarkeit interpretiert. Barrierewirkungen wie Baublöcke, Verkehrsstrassen, verkehrs- oder eigentumsrechtlichen Restriktionen oder topographischen Gegebenheiten werden dadurch nicht abgebildet. Für eine landesweite vergleichende Analyse im Sinne einer Potentialanalyse ist der Ansatz jedoch geeignet.

Die Bodenversiegelung kann als Schlüssel für den Indikator **Klimaaktive Flächen** durch die Identifikation von nicht klimawirksamen Flächen angesehen werden, denn über den Bodenversiegelungsgrad lassen sich Aussagen zur mikroklimatischen Situation im städtischen Raum ableiten (Hennersdorf/Lehmann 2014). Im Weiteren ist auch die Nähe zu entsprechend großen Grünflächen entscheidend, um von deren Klimaregulation zu profitieren. Mit den beiden Kennwerten *Versiegelungsgrad* und *Anteil potentieller (klimaaktiver) Defizitflächen bezogen auf das administrative Stadtgebiet* werden für den Indikator Klimaaktive Flächen diese beiden Aspekte näher beleuchtet.

Vernetzte Grünräume tragen insbesondere durch Habitatverbund zur ökologischen Aufwertung und damit zum Schutz der Biodiversität, der Erhöhung des Erholungswertes und zu einem positiven Einfluss auf das Stadtklima sowie der Aufwertung des Stadtbildes bei (BBSR 2017). Der Indikator **Grünraumvernetzung** beschreibt die Verknüpfung bestehender Grünräume und spiegelt verschiedene Funktionen des Stadtgrüns wider. Mit den beiden Kennwerten *Durchschnittlicher Abstand zur nächsten Grünfläche* und *Proximity (Eingebundenheit der Grünflächen)* werden die Abstände der Grünflächen zueinander und ihre Eingebundenheit in das Stadtgefüge der Grünflächen in der näheren Umgebung betrachtet (vgl. Lehmann et al. 2017).

4.2 Indikatorwerte und Interpretation

Eine Berechnung der einzelnen Kennwerte unter Verwendung des Stadtgrünrasters wurde für alle deutschen Städte ab 5.000 Einwohnern auf administrativer Gebietskulisse durchgeführt. Somit ist ein Vergleich der Städte hinsichtlich ihrer Ausstattung mit Stadtgrün nach verschiedenen Aspekten möglich. Um innerstädtische Vergleiche zu ermöglichen, erfolgte zudem die Berechnung der Kennwerte für Städte mit mehr als 50.000 Einwohnern auf Stadtteil- bzw. Stadtbezirksebene sofern entsprechende Gebietsgrenzen vorlagen.

Für vergleichende Auswertungen wurden die Städte entsprechend der Stadt- und Gemeindetypen des BBSR³ kategorisiert:

- Große Großstädte: ab 500.000 Einwohner
- Kleine Großstadt: ab 100 000 Einwohner bis 500.000 Einwohner
- Große Mittelstadt: ab 50 000 Einwohner bis 100.000 Einwohner
- Kleine Mittelstadt: ab 20 000 Einwohner bis 50.000 Einwohner
- Große Kleinstadt: ab 10 000 Einwohner bis 20.000 Einwohner
- Kleine Kleinstadt: ab 5 000 Einwohner bis 10.000 Einwohner

Im Sentinel-2-basierten Stadtgrünraster für 2018 waren rund 203.076 km² der Landesfläche mit Grünklassen bedeckt, was 56,8 % der Gesamtfläche entspricht. Dabei entfallen rund 60.457 km² (29,8 %) auf die Klasse Laubholz, 60.123 km² (29,6 %) auf Nadelholz und 82.496 km² (40,6 %) auf Wiese (ganzjährig niedrige Vegetation). Ackerland wird nicht in die Grünbedeckung einbezogen, da dessen Grünzustand von saisonalen Bewirtschaftungszyklen abhängig ist.

Es zeigt sich, dass vor allem kleine Mittelstädte und Kleinstädte von dem Grün im Umfeld, lockerer Bebauung und stärkerer Verzahnung des Umfelds mit der Siedlungsfläche profitieren. Großstädte und große Mittelstädte weisen durch ihre dichte Bebauung und ihre stärkeren Besiedlung bis an die Stadtgrenzen hin weniger Grün auf.

Nachfolgend werden für die Indikatoren beispielhaft Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

Grünausstattung

Die Grünausstattung wird mittels zweier Kennwerte berechnet: *Grünanteil bezogen auf das administrative Stadtgebiet* und *Grünanteil bezogen auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV)*.

Die Vorteile des erstgenannten Kennwertes liegen in der einfachen Berechnung, es werden nur die administrativen Stadtgrenzen und die Grünklassen der Landbedeckungsklassifikation benötigt. Der Fokus dieses Kennwertes bezieht sich auf die gesamte Stadt, womit auch das Umfeld des eigentlichen Siedlungsraums, sofern es innerhalb der administrativen Stadtgrenze liegt, einbezogen wird. Dies erschwert jedoch die Vergleichbarkeit von Städten. Denn diese unterscheiden sich stark in der Größe ihres zum Stadtgebiet gehörenden, oft durch Grün geprägten, Umfelds, abhängig durch Eingemeindungen, direkten Nachbarschaften zu anderen Städten und ihrer Lage im ländlichen oder urbanen Raum.

(3)

<https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/raumbeobachtung/Raumabgrenzungen/deutschland/gemeinden/StadtGemeindetyp/StadtGemeindetyp.html>

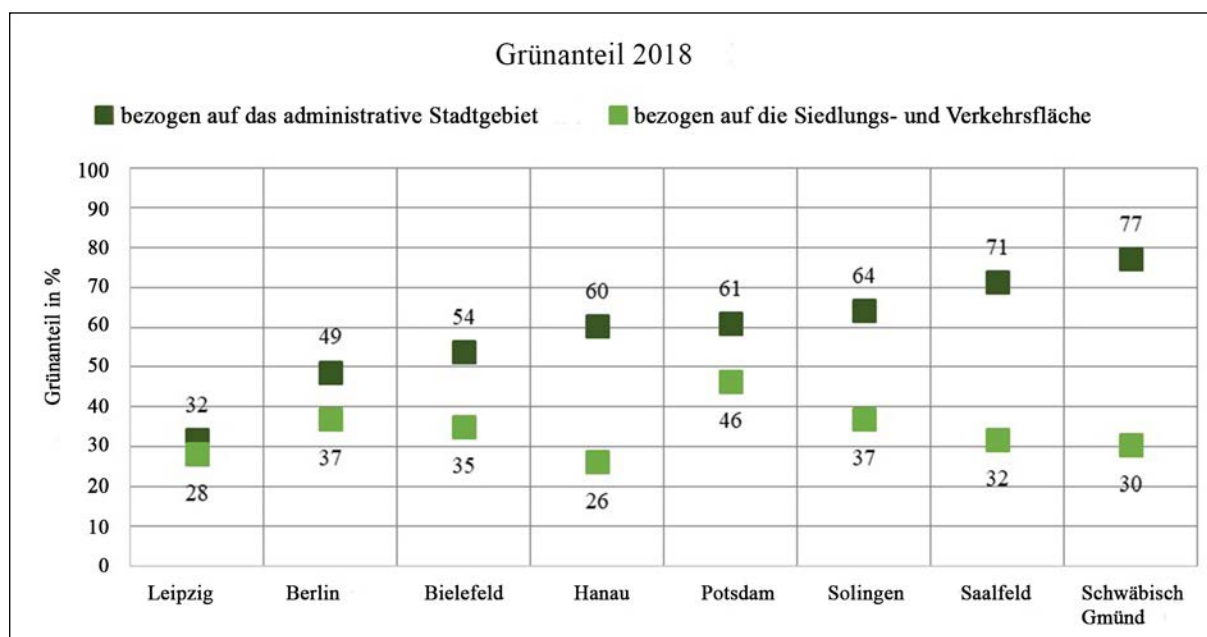
Die Begrenzung auf den Siedlungs- und Verkehrsraum beim zweiten Kennwert bedingt eine bessere Vergleichbarkeit von Städten hinsichtlich ihres Grünanteils, da hierbei der Fokus auf dem „innerstädtischen“ Grün liegt und Effekte durch die Größe des grünen Umfelds ausgeschlossen werden. Die Abgrenzung der Siedlungs- und Verkehrsfläche erfolgt durch die Auswahl der entsprechenden Objekte aus dem ATKIS Basis-DLM.

Für Städte ab 5.000 Einwohnern entfallen 2018 rund 74.124 km² Grün auf das administrative Stadtgebiet. Davon befinden sich rund 7 649 km² innerhalb der Siedlungs- und Verkehrsfläche. Der Grünanteil an der Gesamtfläche des administrativen Stadtgebiets beträgt im Bundesdurchschnitt 56,7 %. Für die Siedlungs- und Verkehrsfläche beträgt der Durchschnitt 35,0 %.

In der Abbildung 12 ist beispielhaft der Unterschied zwischen den beiden Kennwerten für die Fallstudienstädte, für die zahlreiche weitere Sonderauswertungen durchgeführt wurden (vgl. Kapitel 5.1.1), dargestellt. Insbesondere kleinere Städte, wie Saalfeld oder Schwäbisch Gmünd weisen bezogen auf das administrative Stadtgebiet einen wesentlich höheren Grünanteil aufgrund ihres ländlich geprägten Umfelds auf, als große Städte wie Berlin oder Leipzig, deren urbane Strukturen bis an die Grenze des Stadtgebietes reichen. In Bezug auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche hingegen zeigt sich für Berlin ein höherer Anteil an innerstädtischen Grün als in Schwäbisch Gmünd oder Saalfeld.

Abbildung 12

Vergleich der Grünanteile in der administrativen Stadtgebietsfläche und der Siedlungs- und Verkehrsfläche für das Jahr 2018 am Beispiel der Fallstudienstädte



Quelle: IÖR

Neben der Stadtstruktur ist auch die naturräumliche Ausstattung der umliegenden Region für die Grünausstattung entscheidend. Insbesondere in waldreichen Gegenden weisen die Städte unabhängig von ihrer Größe einen hohen Grünanteil im administrativen Stadtgebiet auf. So zeigt die Abbildung 13, dass vor allem in den waldreichen Gebieten der Mittelgebirge (z. B. Sauerland, Rothaargebirge, Schwarzwald, Harz, Thüringer Wald, Erzgebirge/Vogtland) und dem waldreichen Brandenburg Städte einen hohen Grünanteil aufweisen. In landwirtschaftlich geprägten Gebieten, wie z. B. in großen Teilen Sachsen-Anhalts und in Nordsachsen, oder in Ballungsräumen, wie dem Ruhrgebiet, zeigt sich bei den Städten hingegen ein geringerer Grünanteil am Stadtgebiet.

Abbildung 13
Waldgebiete von Deutschland und Grünanteil der Städte



Quelle: Verwaltungsgrenzen, Waldgebiete © Geobasis-DE/BKG 2019

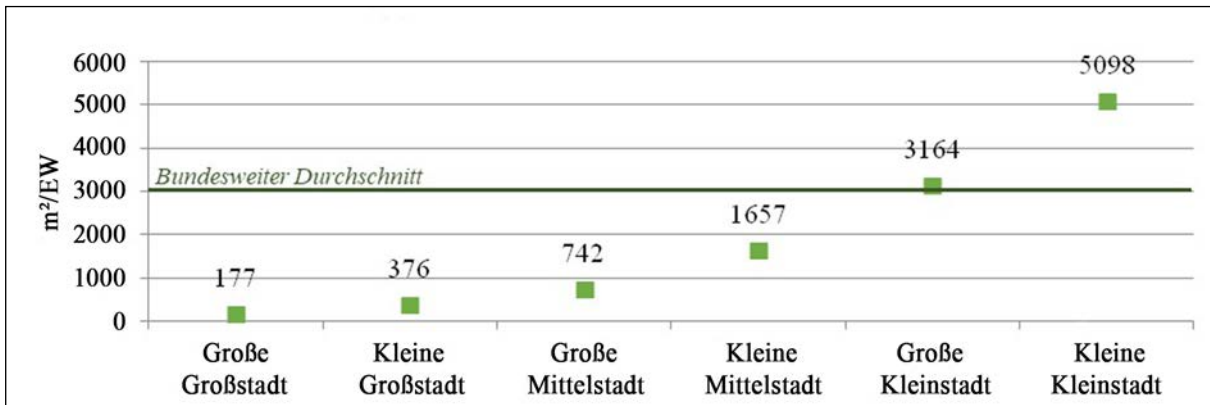
Grünraumversorgung

Durch Einbeziehung der Einwohnerzahl kann die Grünbedeckung pro Einwohner bezogen auf das administrative Stadtgebiet berechnet werden.

Statistisch gesehen stehen bundesweit jedem Stadtbewohner durchschnittlich 3.000 m² Grün zur Verfügung. Generell steigt bei kleiner werdender Stadtgröße die Verfügbarkeit grünbedeckter Flächen je Einwohner (Abbildung 14).

Abbildung 14

Vergleich der durchschnittlichen grünbedeckten Fläche pro Einwohner nach Stadttypen (2018)

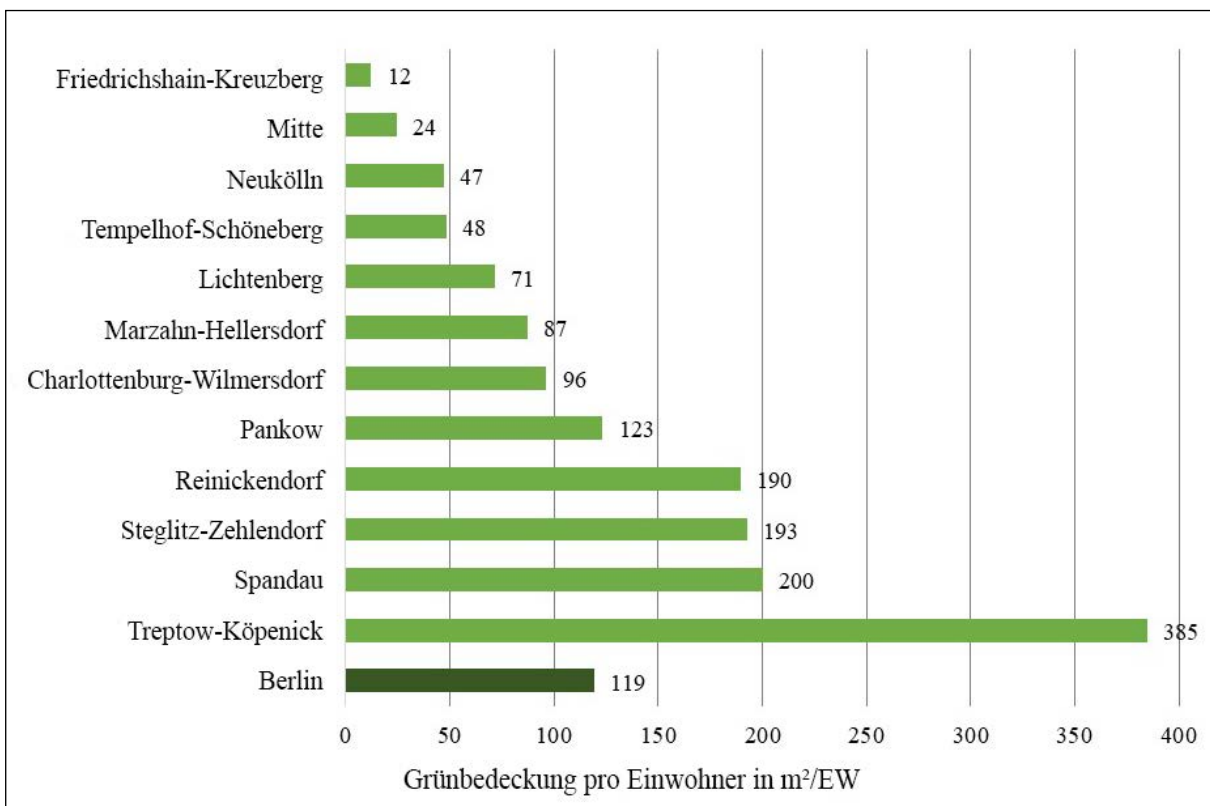


Quelle: IÖR

Auf Stadtbezirksebene bietet sich dieser Kennwert für innerstädtische Vergleiche an, da die Grünausstattung ins Verhältnis zur Einwohnerzahl gesetzt wird. In Bezirken, welche sich unterhalb des gesamtstädtischen Durchschnitts bewegen, könnten potentielle Defizitgebiete vermutet werden. Abbildung 15 zeigt beispielhaft für Berlin eine sehr ungleiche Verteilung: vier der zwölf Berliner Bezirke liegen deutlich oberhalb des Gesamtdurchschnittswertes, sieben deutlich darunter und ein Bezirk im durchschnittlichen Bereich. Aus dieser Werteverteilung kann auf die sehr heterogene urbane Grünstrukturierung von Berlin geschlossen werden.

Abbildung 15

Vergleich Grünbedeckung pro Einwohner bezogen auf die administrativen Stadtbezirke Berlins für das Jahr 2018



Quelle: IÖR

Für eine spezifische Aussage zur Grünraumversorgung im eigentlichen urbanen Siedlungsraum sollte als Bezugsfläche die Siedlungs- und Verkehrsfläche anstelle des administrativen Stadtgebietes verwendet werden. Der Fokus liegt damit auf dem innerstädtischen Grün, und der Einfluss des grünen Umfelds wird bei der Berechnung eliminiert.

Grünerreichbarkeit

Die Erreichbarkeit des Grüns vom Wohnort aus kann mittels der Kennwerte *Anteil der für Wohnen genutzten Siedlungsfläche in definierter Entfernung zu grünbedeckter Fläche mit definierter Mindestgröße* und der *mittleren euklidischen Distanz* berechnet werden.

Beim erstgenannten Kennwert erfolgt die Fokussierung auf den für Wohnzwecke genutzten Siedlungsraum, wodurch Aussagen zur Erholungsmöglichkeit im Stadtgrün getroffen werden können. Unterschieden wird dabei zwischen fußläufig erreichbaren, d. h. maximal 300 m von Wohngebieten entfernten, Grünflächen mit einer Mindestgröße von 1 ha, die sich für einen täglichen Gang ins Grün wegen ihrer Nähe besonders eignen. Für die Wochenenderholung eignen sich v. a. deutlich größere Grünflächen mit einer Mindestgröße von 10 ha, die aber mit einer mittleren Entfernung von bis zu 700 m Luftliniendistanz entfernter liegen dürfen (Grunewald et. al. 2016). Die Wohnstandorte werden dabei dem ATKIS Basis-DLM entnommen.

Beim Anteil der Wohnfläche, welche sich in fußläufiger Erreichbarkeit bis zu 300 m von grünbedeckten Flächen mit einer Mindestgröße von 1 ha befindet und die damit als gut versorgt gelten können, konnte über alle Stadttypen ein Durchschnittswert von über 90 % ermittelt werden. Bei den kleinen Kleinstädten beträgt der Durchschnittswert sogar fast 100 %. Auch für den Anteil der Wohnfläche in maximaler Entfernung von 700 m zu grünbedeckter Fläche mit mehr als 10 ha Größe konnten ebenfalls hohe Werte ermittelt werden. Von den großen Mittelstädten bis hin zu den kleinen Kleinstädten betragen die Durchschnittswerte dabei nahezu 100 %.

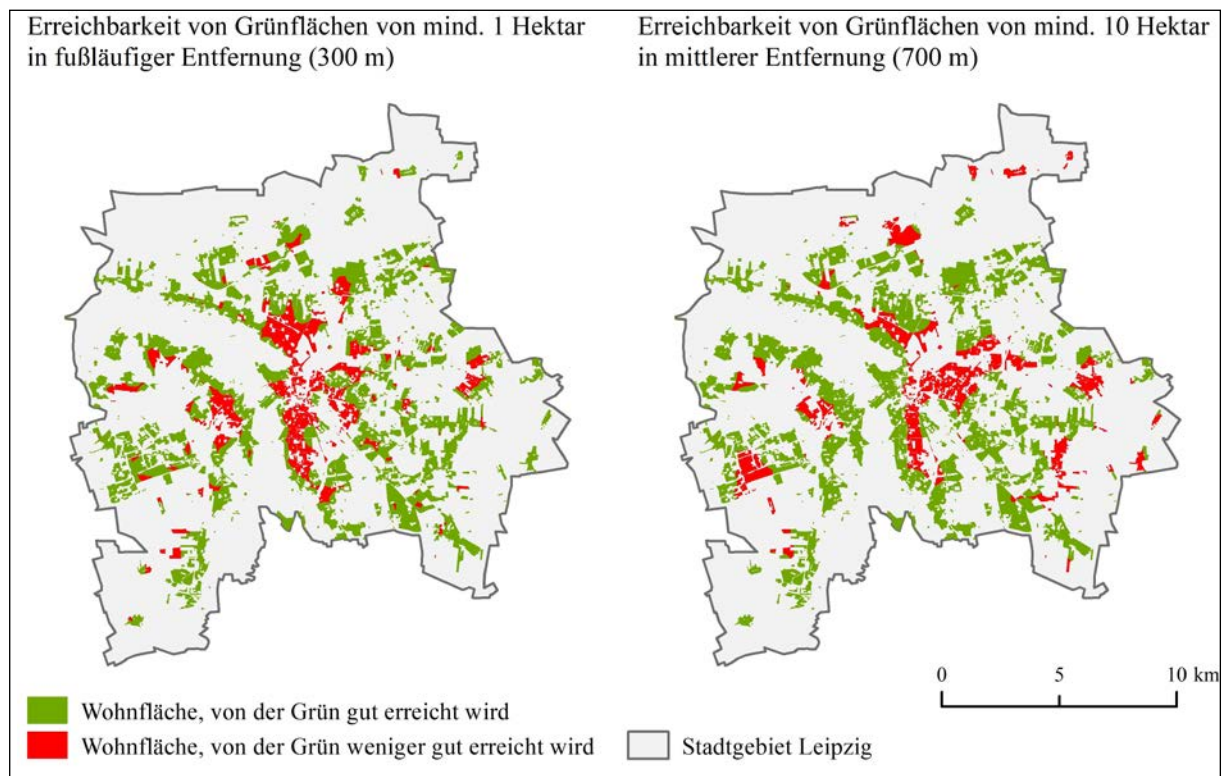
In der Abbildung 16 werden beispielhaft für die Stadt Leipzig die Wohnflächen, welche sich in den 300 m bzw. 700 m großen Zonen um Grünflächen ab 1 ha bzw. 10 ha befinden, dargestellt. Der Wohnflächenanteil im definierten Umkreis der Grünflächen beträgt jeweils 91 % an der Gesamtwohnfläche. Dabei ist zu beachten, dass hier keine Aussagen über die tatsächliche Nutzbarkeit der betrachteten Grünflächen getroffen werden können. Barrieren in Form von nicht querbaren Verkehrsstrassen oder Umzäunungen, die einen Zutritt zu Grünflächen verhindern, Eigentumsverhältnisse und damit verbundene Betretungsbeschränkungen sowie der qualitative Ausstattungsgrad der Grünflächen werden nicht berücksichtigt. Der Indikator stellt generalisierend heraus, welche Städte bzw. Stadtteile im Hinblick auf die Größe und Verteilung ihrer Grünflächen gut mit erreichbarem Grün ausgestattet sind.

Die *mittlere euklidische Distanz* gibt an, wie weit Grünflächen durchschnittlich von den Siedlungsflächen entfernt sind. Dabei werden Grünflächen erst ab einer Mindestgröße von 1 ha in die Berechnung einbezogen, um den Einfluss von (Fehl-) Klassifikationen unterschiedlich vieler einzelner Grünpixel auf das Ergebnis zu minimieren. Die Begrenzung dieses Kennwertes auf den Siedlungsraum erfolgt implizit anhand der Verwendung der Klasse *Bebaut/versiegelt* aus dem Stadtgrünraster. Die Berechnung erfolgt unabhängig von administrativen Grenzen durch Anwendung eines Radius von zwei Kilometern um die Pixel der Klasse *Bebaut/versiegelt*. Dies spiegelt die Tatsache wider, dass auch Grünflächen außerhalb der Stadt zur Erholung aufgesucht werden und darum einbezogen werden müssen. Für Leipzig beträgt der Wert 130 m (2018).

Alternativ zur Erfassung der Siedlungsfläche durch die Klasse *Bebaut* des Stadtgrünrasters kann die Siedlungs- und Verkehrsfläche dem ATKIS-Basis-DLM entnommen werden, die vorab entsprechend der räumlichen Auflösung der Fernerkundungsdaten zu rastern wäre. Vorteilhaft wäre hier die Möglichkeit der Fokussierung auf die Wohnflächen und damit eine Homogenität zum Kennwert *Anteil der für Wohnen genutzten Siedlungsfläche in definierter Entfernung zu grünbedeckter Fläche mit definierter Mindestgröße*.

Abbildung 16

Erreichbarkeit von Grünflächen für die Wohnflächen der Stadt Leipzig für das Jahr 2018



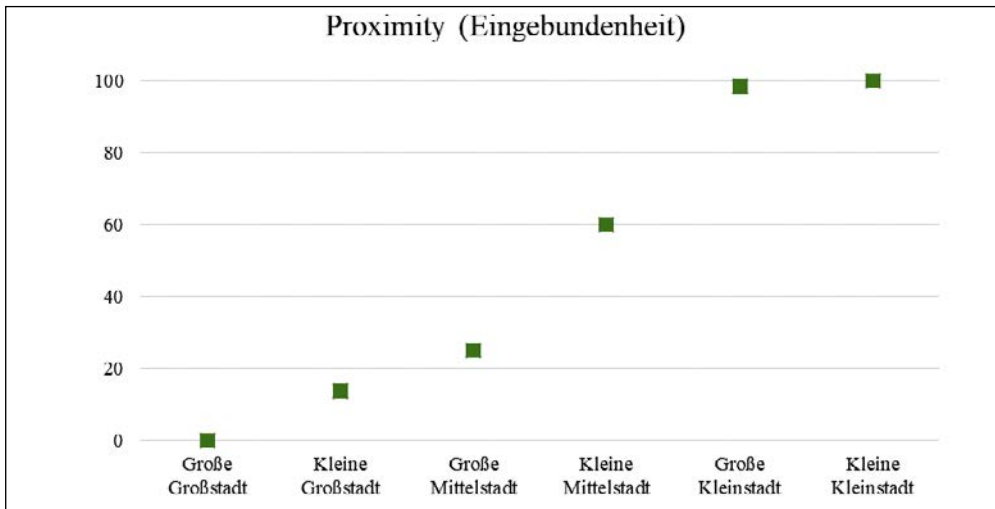
Quelle: IÖR

Grünraumvernetzung

Die Grünraumvernetzung kann mit den beiden Kennwerten *Durchschnittlicher Abstand zur nächsten Grünfläche* und *Proximity (Eingebundenheit der Grünflächen)* berechnet werden. Bei letzterem Kennwert wird neben den Abständen der Grünflächen zueinander auch deren Größe einbezogen (vgl. Lang/Tiede 2003). Bei der Berechnung beider Kennwerte zeigt sich folgende Problematik: Für die Betrachtung des Biotopverbundes sind auch sehr kleine Grünflächen als Trittsteine von großer Bedeutung. Je nach Grünsensivität des Klassifikators kann es jedoch bei der Erstellung der Landbedeckungsklassifikation zur (Fehl-) Klassifikation unterschiedlich vieler separater Grünpixel kommen. Wird keine Mindestgröße für die in die Berechnung eingehenden Grünflächen verwendet, hängt das Ergebnis zum Teil von Zufällen ab. Um diesen verfälschenden Einfluss zu reduzieren, kann bei der Berechnungsvorschrift für diesen Kennwert eine Mindestgröße für Grünflächen von 1 ha angegeben werden.

Insbesondere kleinere Städte weisen oftmals weniger dichte Stadtstrukturen auf, Stadtkerne sind oftmals klein, das Stadtgebiet ist stärker mit dem Umfeld verzahnt. So sind kleine Kleinstädte häufig eher ländlich als städtisch geprägt. Dies spiegelt sich auch bei deren Vernetzung des Grüns wieder. So steigt bei kleiner werdender Einwohnerzahl die Vernetzung der Grünflächen, welche durch die Proximity (Eingebundenheit der Grünflächen) wiedergegeben wird (Abbildung 17).

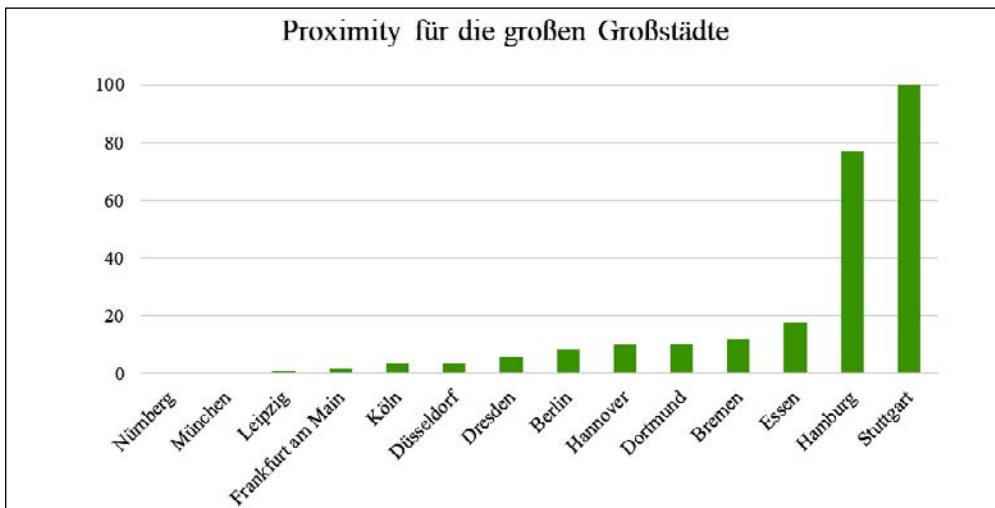
Abbildung 17
 Vergleich der Proximity (Median, normiert) der Stadttypen (2018)



Quelle: IÖR

Die Interpretation eines singulären Proximity-Wertes für eine Bezugsfläche (Stadt oder Stadtbezirk) ist schwierig. Insofern liegt die Stärke dieses Kennwertes eher im Vergleich mehrerer Gebietseinheiten. Mittels einer Reihung der Werte für die 14 großen Großstädte Deutschlands wird dies in Abbildung 18 aufgezeigt. Je höher der Proximity-Wert, desto stärker können die städtischen Grünflächen als untereinander eingebunden betrachtet werden, d. h. es befinden sich viele große Grünflächen in gegenseitiger Nähe. Entsprechend Literaturangaben (vgl. Lehmann et al. 2017) wurde ein Suchradius bei der Berechnung der Proximity einer Grünfläche von 750 m gewählt, welcher die fußläufige Erreichbarkeit widerspiegelt. Innerhalb dieses Radius um eine Grünfläche werden für alle sich darin befindlichen Grünflächen Quotienten aus Flächengröße und Distanz gebildet und addiert. Eine Beschränkung der Mindestgröße der Grünflächen fand dabei nicht statt.

Abbildung 18
 Proximity (Mittlere Eingebundenheit von Grünflächen) (Median, normiert) der großen Großstädte Deutschlands innerhalb eines Suchradius von 750 m für das Jahr 2018



Quelle: IÖR

Klimaaktive Flächen

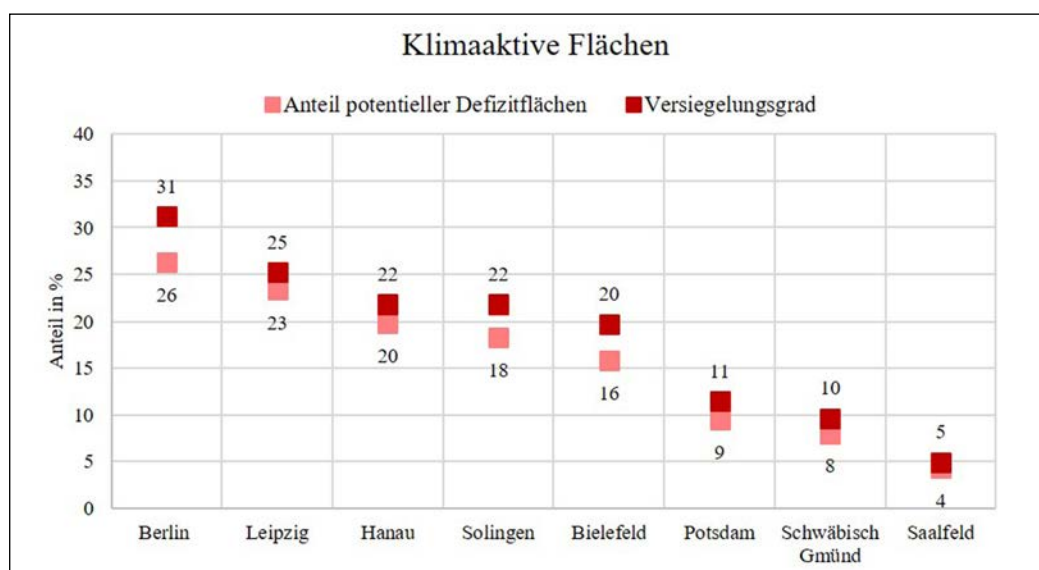
Mit den beiden Kennwerten *Versiegelungsgrad bezogen auf das administrative Stadtgebiet* und *Anteil potenzieller (klimaaktiver) Defizitflächen bezogen auf das administrative Stadtgebiet* werden für den Indikator Klimaaktive Flächen die Bodenversiegelung als fehlende klimatisch positive Fläche und in Ergänzung die von Grün ausgehende Gunstwirkung näher beleuchtet.

Der *Versiegelungsgrad* kann unter Verwendung des Stadtgrünrasters über die Verwendung der Klasse „Bebaut“ näherungsweise bestimmt werden. Durch Verschneidung eines 50x50 km großen Ausschnitt des Stadtgrünrasters mit einem europäischen Versiegelungsdatensatz konnten die mittleren Versiegelungsgrade für alle Landbedeckungsklassen aus dem Stadtgrünraster ermittelt werden. Bei dem Versiegelungsdatensatz handelt es sich um den High Resolution Layer Imperviousness Degree aus dem europäischen Copernicus-Erdbeobachtungsprogramm. Dieser wird seit 2006 im Dreijahresabstand aus Satellitenbilddaten erzeugt und bildet europaweit hochauflösend die Bodenversiegelung ab. Daraus resultiert für die Landbedeckungsklasse der Bebauung ein Bodenversiegelungsgrad von 70,8 %. Der Versiegelungsgrad verhält sich im Wesentlichen umgekehrt proportional zum Grünanteil. So wird in der Abbildung 18 ersichtlich, dass sich große Städte mit wenig Grün im Stadtgebiet durch einen hohen Versiegelungsgrad auszeichnen. Der Anteil der versiegelten Fläche an der Gesamtfläche des administrativen Stadtgebietes nimmt bei kleiner werdender Stadtgröße ab. So beträgt der durchschnittliche Versiegelungsgrad bei den großen Großstädten 29,6 %, während dieser bei den kleinen Kleinstädten im Mittel nur bei 5,6 % liegt. Auch hier sollte für Vergleiche der eigentlichen urbanen Situation die Bezugsfläche der Siedlungs- und Verkehrsfläche Verwendung finden. Bei vergleichenden Darstellungen zwischen Grünausstattung und Versiegelungsgrad sind stets identische Bezugsflächen zu verwenden.

Als *klimaaktive Defizitflächen* werden baulich geprägte Flächen mit einem Überbauungsgrad größer 30 % ohne Nachbarschaft zu Grünflächen oder dem Freiraumrand betrachtet. Im Stadtgrünraster Deutschland wird dies durch die Landbedeckungsklasse „Bebaut – stark durchgrünt“ klassifiziert sind, werden in stadtklimatischer Hinsicht ebenfalls als klimaaktive Defizitflächen angesehen, sofern sie sich außerhalb eines Radius von 75 m um Grün- und Wasserflächen befinden (vgl. Lehmann et al. 2017). Innerhalb dieser Entfernung wird davon ausgegangen, dass die hier vorherrschende lockere Bebauung mit hohem Grünanteil einen für die positive klimatische Gunstwirkung von Grünflächen durchlässigen Raum darstellt.

Abbildung 19

Versiegelungsgrad und Anteil potenzieller (klimaaktiver) Defizitflächen bezogen auf das administrative Stadtgebiet der Fallstudienstädte für das Jahr 2018



Quelle: IÖR

Kaltluftentstehungsgebiete und Frischluftkorridore finden hingegen keinen ausreichenden Niederschlag in diesem Kennwert, sodass dieser nur eine grobe Approximation der Defizitflächen bietet. Für genauere lokale Analysen sind für die jeweilige Stadt angepasste Klimamodelle zu verwenden. In der Abbildung 19 zeigt sich, dass der Anteil der Defizitflächen, welche nicht von einer Gunstwirkung des Grüns profitieren (dicht bebaut sowie locker bebaut außerhalb des Radius der Gunstwirkung), unterhalb des Anteils der versiegelten Fläche an der Gesamtfläche des Stadtgebietes liegt. Ähnlich dem Versiegelungsgrad verhält sich auch der Durchschnittswert des Anteils der potentiellen (klimaaktiven) Defizitflächen bezogen auf die Stadtgröße. So liegt der Mittelwert hier bei den großen Großstädten bei 26,9 % und bei den kleinen Kleinstädten bei 4,7 %.

Erfassung defizitärer Räume mittels der Grünkennwerte auf Stadtbezirksebene

Für die Erfassung von defizitären Räumen bietet sich die Betrachtung der Grün-Kennwerte auf Stadtteil-/Stadtbezirksebene an. Aufgrund der Heterogenität bei Größe und Struktur der Stadtteile/Stadtbezirke (vgl. Kapitel 3) ist nur ein innerstädtischer Vergleich möglich. Ein Vergleich der Teilgebiete verschiedener Städte miteinander ist nicht sinnvoll. Nachfolgend werden an drei Beispielstädten exemplarisch die Grün-Kennwerte der Stadtteile/Stadtbezirke ausgewertet.

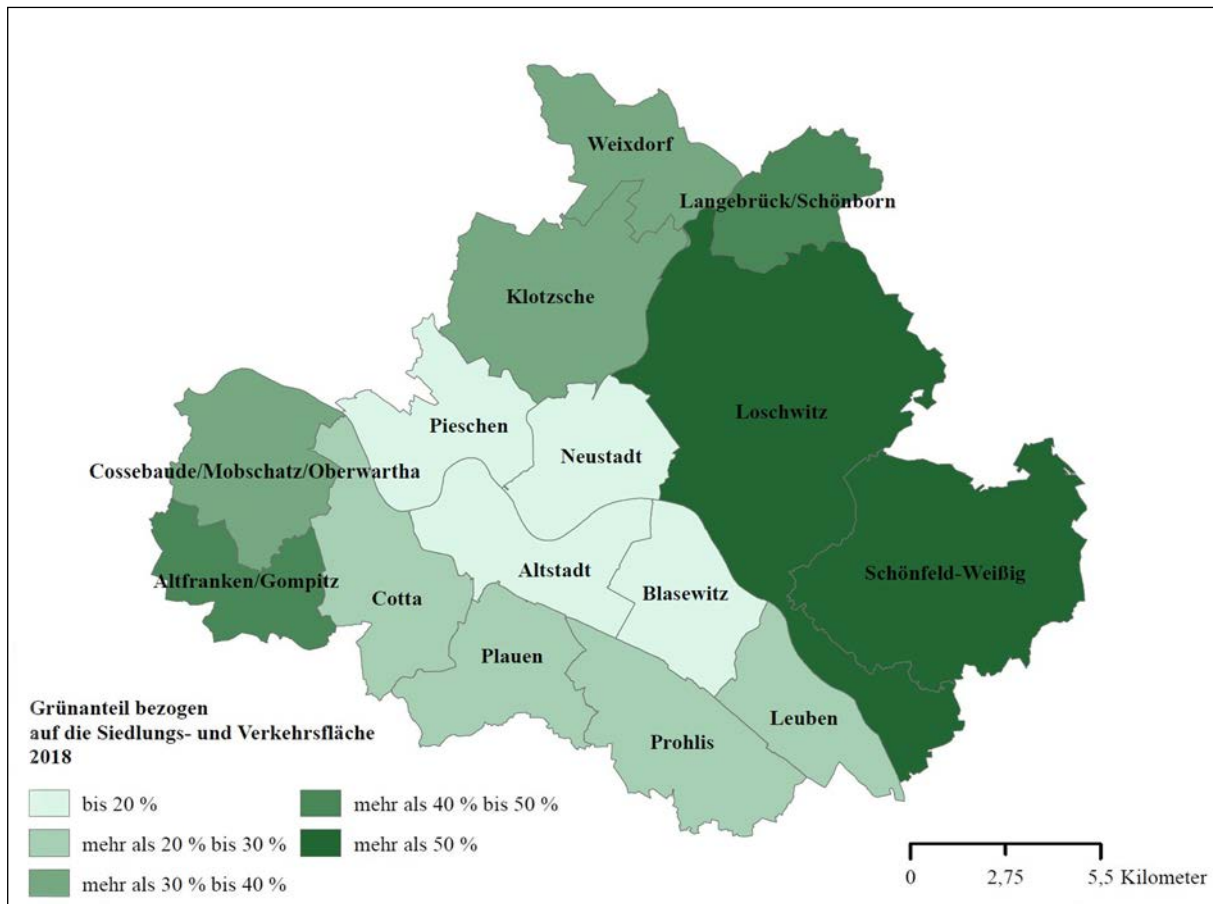
Beispiel Dresden

In der nachfolgenden Abbildung sind die Ortschaften und Ortsamtsbereiche von Dresden dargestellt, die sich aufgrund ihrer Bebauungsstruktur durch unterschiedliche Grünanteile auszeichnen. An den Randbereichen der Stadt befinden sich mit den Ortschaften *Schönfeld-Weißig*, *Weixdorf*, *Cossebaude/Mobschatz/Oberwartha*, *Altfranken/Gompitz* und *Langebrück/Schönborn* ländliche bzw. kleinstädtische Siedlungsstrukturen, eingebettet in landwirtschaftliche Flächen und Wälder. Auffällig hinsichtlich seines Grünanteils ist der Ortsamtsbereich *Loschwitz*, welcher die Dresdner Heide umfasst, einen der flächenmäßig größten Stadtwälder in Deutschland. An die Dresdner Heide schließt sich im Westen *Klotzsche* an, ein Ortsamtsbereich, welcher neben dem Flughafen und einigen Industrie- und Gewerbeflächen vorrangig durch eine lockere Bebauung mit Einfamilienhäusern geprägt ist. Südlich davon befinden sich *Pieschen* und die *Neustadt*. Beide Ortsamtsbereiche sind durch eine dichte Bebauung geprägt, die *Neustadt* weist überwiegend eine Blockbebauung auf. Das Stadtzentrum bildet der Ortsamtsbereich *Altstadt*, welcher die historische Altstadt und angrenzende zentrale Quartiere umfasst und ebenfalls durch eine dichte Blockbebauung gekennzeichnet ist. Im Südwesten der Stadt befinden sich die Ortsamtsbereiche *Cotta* und *Plauen*. In beiden finden sich schachbrettartig angelegte Straßen, es dominieren freistehende Mehrfamilienhäuser. Die anzutreffende klassische Bauweise stellt ein drei- bis viergeschossiges würfelförmiges Mietshaus dar („Kaffeemühlen“). Zwischen den Häusern befinden sich zumeist Bäume, Rasen oder Gärten, so dass ein Villencharakter entsteht. Diese Bauform ist auch in *Leuben* und dem nördlichen *Blasewitz* anzutreffen. Der südliche Teil von *Blasewitz* zeichnet sich hingegen durch eine Zeilenbebauung aus. Südlich von *Blasewitz* befindet sich der Ortsamtsbereich *Prohlis*, welcher durch Plattenbau, Industrie- und Gewerbeflächen sowie Ein- und Zweifamilienhausansiedlungen geprägt ist.

Die Abbildung 20 zeigt, dass sich in Dresden die Bebauungsstruktur auch am Grünanteil der Siedlungs- und Verkehrsflächen widerspiegelt.

Abbildung 20

Grünanteil bezogen auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche der Ortschaften und Ortsamtsbereiche der Stadt Dresden 2018

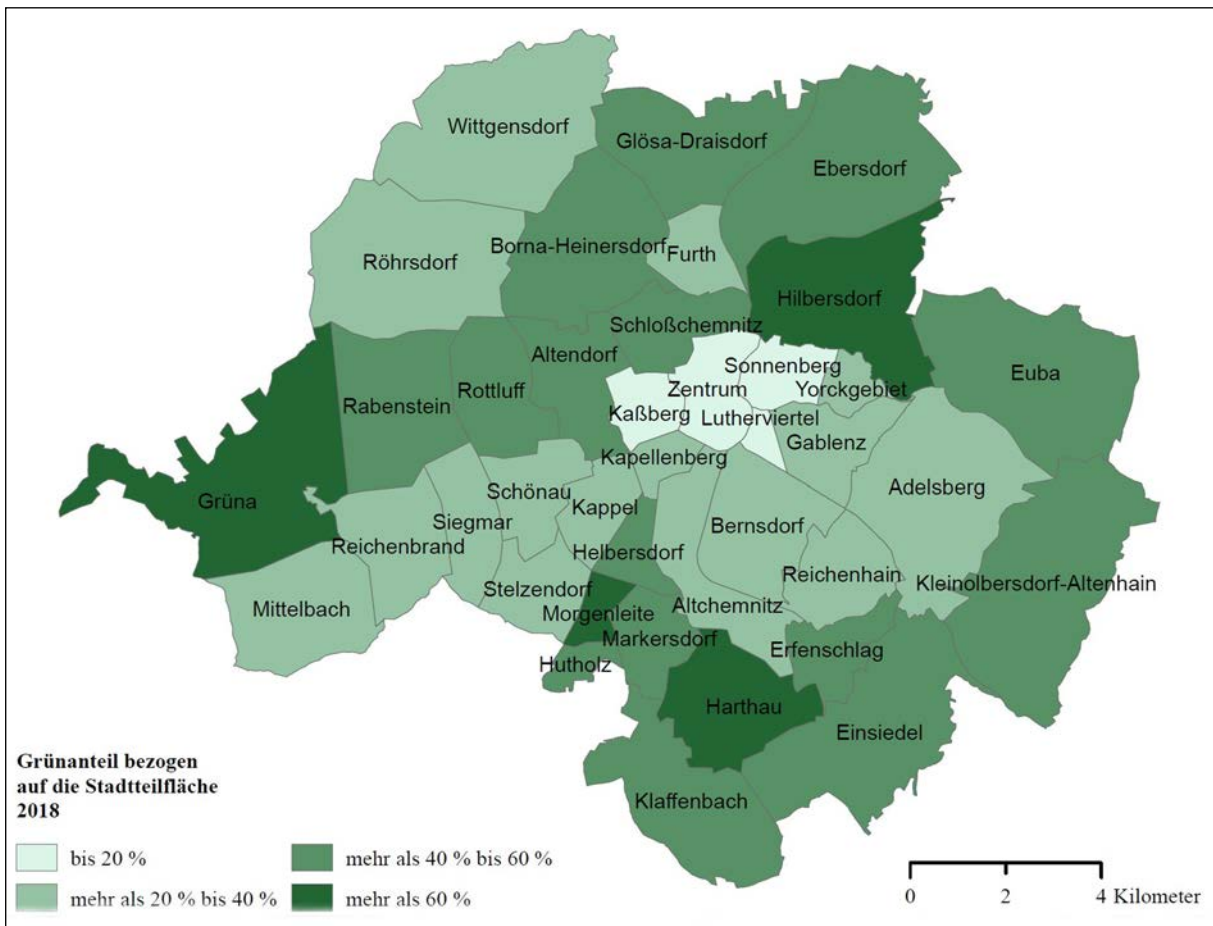


Quelle: IÖR

Beispiel Chemnitz

Am Beispiel der Stadt Chemnitz wird deutlich, dass neben dem Vorhandensein von Grünflächen auch die Einwohnerzahl hinsichtlich der Bestimmung defizitärerer Räume entscheidend ist. Die Abbildung 21 zeigt den Grünanteil an der Fläche der einzelnen Stadtteile von Chemnitz. Die dicht bebauten Stadtteile im direkten Zentrum weisen einen vergleichsweise geringen Grünanteil auf. Stadtteile mit großen Parks wie *Schlosschemnitz* (Küchwaldpark) und *Helbersdorf* (Stadtpark) oder Stadtteile mit großen innerstädtischen Grünflächen wie *Bernsdorf* (Friedhof) und *Morgenleite* (innerstädtisches Waldgebiet) zeichnen sich durch höhere Grünanteile aus.

Abbildung 21
Grünanteil bezogen auf die Fläche der Stadtteile von Chemnitz 2018

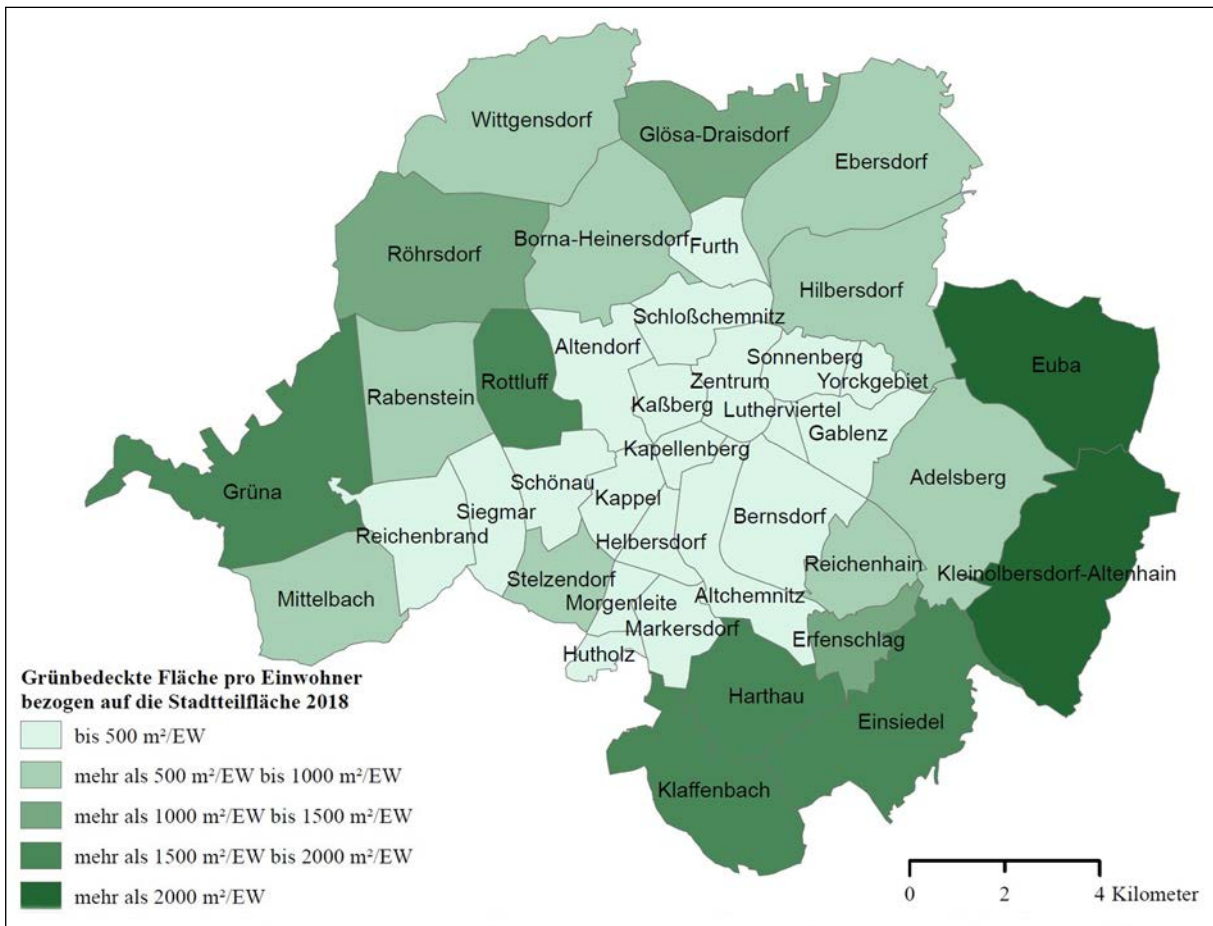


Quelle: IÖR

Werden die grünbedeckten Flächen zur Einwohnerzahl in Bezug gesetzt, so zeigt sich, dass Stadtteile trotz hoher Grünanteile aufgrund hoher Einwohnerzahlen eine vergleichsweise geringe Grünraumversorgung bieten (Abbildung 22). So weisen *Schlosschemnitz* und *Bernsdorf* mit 14.028 bzw. 15.232 hohe Einwohnerzahlen auf (Stand 31.12.2018). Auch *Helbersdorf* und *Morgenleite* zeichnen sich durch eine hohe Einwohnerzahl im Vergleich zu ihrer Fläche aus (6.300 bzw. 4.995 Einwohner).

Abbildung 22

Grünbedeckte Fläche pro Einwohner bezogen auf die Fläche der Stadtteile von Chemnitz 2018



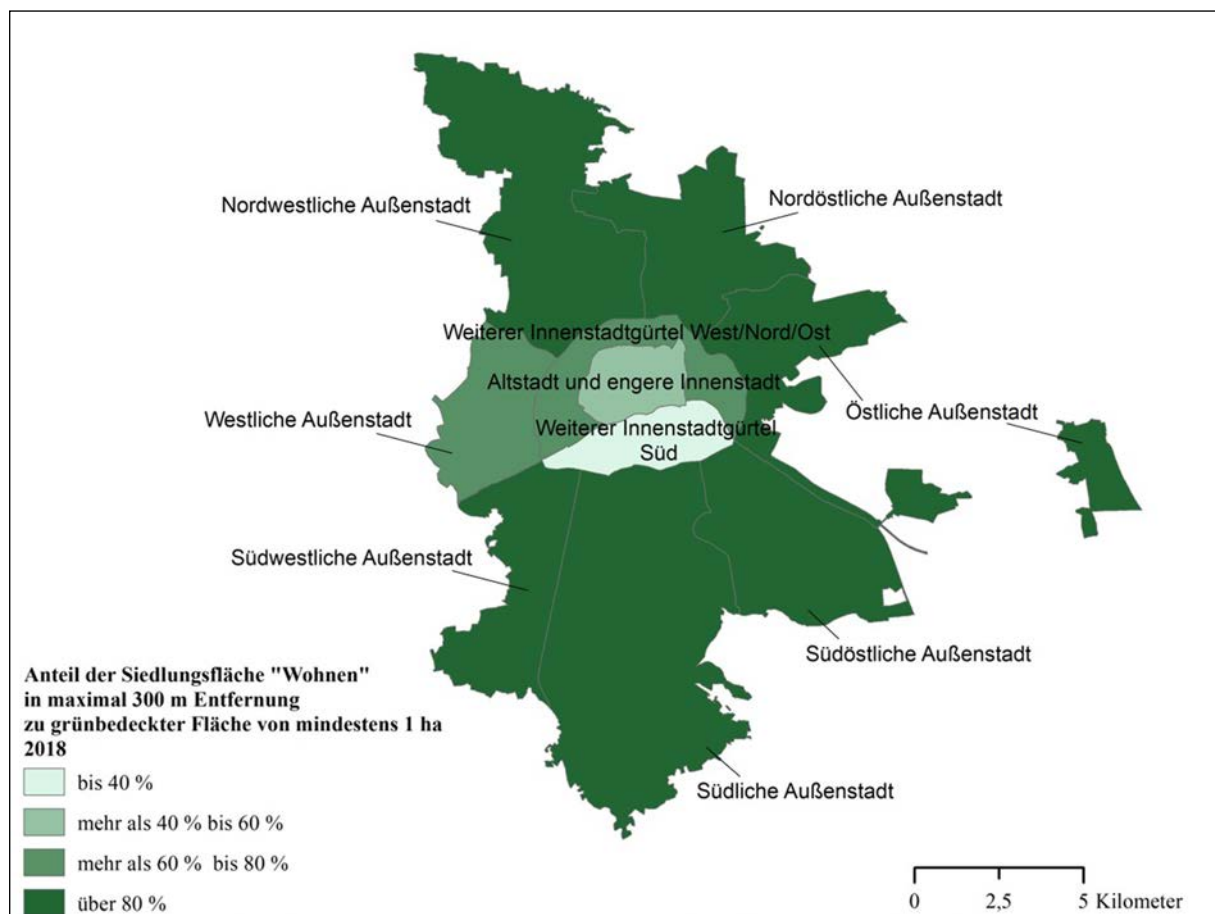
Quelle: IÖR

Beispiel Nürnberg

Entscheidend für die Nutzung von Grünflächen ist auch deren Erreichbarkeit. Der Kennwert Anteil der für Wohnen genutzten Siedlungsfläche in definierter Entfernung zu grünbedeckter Fläche mit definierter Mindestgröße kann zwar keine „echten“ Erreichbarkeiten angeben, da Barrieren, Zuwegungen und Nutzbarkeiten der Flächen unberücksichtigt bleiben. Im Fall der Stadt Nürnberg zeigt sich aber, dass der Kennwert für die grobe Lokalisierung von Bereichen defizitärer Grünerreichbarkeiten genutzt werden kann. Die Abbildung 23 zeigt die Stadtteile von Nürnberg und gibt den Anteil der für Wohnen genutzten Fläche innerhalb einer Entfernung von 300 m zu einer mindestens einen Hektar großen Grünfläche an. Im Stadtteil Weiterer Innenstadtgürtel Süd beträgt dieser Wert weniger als 40 %, d. h. ausgehend von mehr als der Hälfte der Wohnflächen dieses Stadtteils sind keine entsprechenden Grünflächen in kurzer Zeit erreichbar. Auch für die Altstadt und engere Innenstadt ist der Wert vergleichsweise gering. Begründet liegt dies an der sehr dichten Blockbebauung, dem Fehlen größerer Grünflächen innerhalb der Stadtteile und zum Teil am Stadtteilrand. Dies ist besonders im Weiteren Innenstadtgürtel Süd auffällig. Hier finden sich nur sehr wenige Freiflächen. Diese sind zudem teilweise fast vollständig versiegelt, wie der Aufseßplatz, oder werden als Spielplätze mit entsprechenden Spielbereichen und -anlagen genutzt.

Abbildung 23

Anteil der für Wohnen genutzten Siedlungsfläche, die grünbedeckte Flächen von mindestens 1 ha Größe innerhalb 300 m erreicht, am Beispiel der Stadtteile Nürnbergs 2018



Quelle: IÖR

5 Fallstudien zu Grünvolumen und sozialräumlichen Aspekten

5.1 Fallstudien zur physischen Grünstruktur deutscher Städte

Nachfolgend soll anhand von Fallstudien unter Verwendung von hochaufgelösten Daten des Grünvolumens die Bandbreite von spezifischen Aspekten der urbanen grünen Infrastruktur vertieft erläutert werden.

Hierfür wurden acht deutsche Städte für Fallstudien ausgewählt. Die Kooperation der Städte bestand insbesondere in der Lieferung relevanter Referenzdaten und Informationen zum urbanen Grün, der Kooperation bei der Erörterung und Validierung von Zwischenergebnissen sowie in der Teilnahme an Veranstaltungen.

5.1.1 Fallstudienauswahl

Um durch die Fallstudienstädte eine möglichst repräsentative Auswahl der in Deutschland vertretenen unterschiedlichen Stadttypen zu erreichen, wurden verschiedene Kriterien definiert:

- Größe nach Einwohnerzahl (Metropole, große Großstadt, kleine Großstadt, große Mittelstadt, kleine Mittelstadt, kleine Mittelstadt)
- Einwohnerdichte
- Wachstum der Stadt
- Verteilung des Stadtgrüns

Ein limitierender Faktor für die Auswahl der Städte war neben strukturellen Merkmalen auch die Datenverfügbarkeit und Mitwirkungsbereitschaft der jeweiligen Verwaltungen. Schließlich konnten acht Kooperationsvereinbarungen mit folgenden Städten zwischen 29.000 und 3,5 Millionen Einwohnern geschlossen werden (Tabelle 8). Die geographische Verteilung der Städte ist aus Abbildung 24 ersichtlich.

Tabelle 8
Überblick Fallstudienstädte

Fallstudienstadt	Stadttyp	Flächengröße [km ²]	Bevölkerungszahl
Berlin	Metropole	890,5	3 500 000
Leipzig	Große Großstadt	297,8	560 000
Bielefeld	Große Großstadt	258,6	341 000
Potsdam	Kleine Großstadt	188,2	171 000
Solingen	Kleine Großstadt	89,5	160 000
Hanau	Große Mittelstadt	76,4	93 000
Schwäbisch Gmünd	Große Mittelstadt	113,6	61 000
Saalfeld	Kleine Mittelstadt	48,1	29 000

Quelle: LUP

Abbildung 24
Lage der Fallstudienstädte



Quelle: IÖR

5.1.2 Überblick zu den Eingangsdaten

Für die tiefer gehenden Analysen zum urbanen Grün, wie z. B. dem Grünvolumen, sind hochauflösende Daten notwendig, die aus Luftbildbefliegungen oder Laserscanningkampagnen der jeweiligen Landesämter oder der Kommunen selbst stammen.

Tabelle 9 gibt einen Überblick zur verwendeten Datengrundlage zur Berechnung des Grünvolumens für die Fallstudienstädte.

Tabelle 9

Überblick der Datengrundlage für die Fallstudienstädte für die Berechnung des Grünvolumens

Fallstudienstadt	Bezugsjahr	Datensatz	Auflösung [m]	Format	Aufnahmezeitpunkt	Urheber
Potsdam	2016	Stereo-RGBI-Luftbilder	0,25	TIFF	07.09.2016	LGB
	2018	Stereo-RGBI-Luftbilder	0,2	TIFF	05.05.2018	LGB
Berlin	2016	Sentinel2 L1C	10	TIFF	02.05.2016 27.08.2016	ESA
	2018	Stereo-RGBI-Luftbilder	0,2	TIFF	19.03.2018	Stadt Berlin
Leipzig	2012	RGBI-Orthophotos	0,2	TIFF	18.05.2012	GeoSN
	2010	Laserscan	3/m ²	LAZ	Frühjahr 2010	GeoSN
	2018	RGBI-Orthophotos	0,2	TIFF	07.07.2018	GeoSN
	2018	Laserscan	7/m ²	LAZ	Frühjahr 2018	GeoSN
Hanau	2017	Stereo-RGBI-Luftbilder	0,2	TIFF	23.08.2017	HVBG
Schwäbisch Gmünd	2018	Stereo-RGB-Luftbilder	0,2	TIFF	März 2017	LGL
		RGB-Orthophotos	0,2		01.07.2018	
Solingen	2018	Stereo-RGBI-Luftbilder	0,2	TIFF	01.07.2018	Stadt Solingen
Bielefeld	2017	Stereo-RGBI-Luftbilder	0,2	TIFF	23.08.2017,	Land NRW, Stadt Bielefeld
	2018				April 2018	
Saalfeld	2018	Stereo-RGB-Luftbilder	0,4	TIFF	06.05.2018	TLBG

LGB: Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg, ESA: European Space Agency, GeoSN: Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen, HVBG: Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation, LGL: Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung, TLBG: Thüringer Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation

Quelle: LUP

Weitere Aspekte des Grüns, wie z. B. Oberflächentemperaturen oder Vitalitätskennzahlen, erfordern folgende Eingangsdatensätze für deren Berechnung:

- Oberflächentemperatur

Wolkenfreie Landsat-5/8 Daten der Monate April bis September im Zeitraum 1984-2011

Wolkenfreie Landsat-8-Daten der Monate April bis September im Zeitraum 2013-2017

Eine wolkenfreie Landsat-8-Aufnahme für den Zeitraum Juni bis August aus den Jahren 2018 oder 2019

- Vitalität

Wolkenfreie Sentinel-2-Daten der Monate Juni und Juli für die Jahre 2018 und 2019

- Multitemporale Auswertung

Grünvolumen der verschiedenen Zeitpunkte

Zur Bestimmung der Oberflächentemperatur wurden Landsat-Thermaldaten verwendet. Durch die Konsistenz der Landsat-Satellitenserie stehen vergleichbare Daten seit 1984 zur Verfügung. Durch diese Zeitreihe lässt sich bei Betrachtung der wolkenfreien Aufnahmen ein langjähriges Mittel berechnen. Die Thermaldaten haben eine räumliche Auflösung von 120 m (Landsat-5) bzw. 100 m (Landsat 8) und werden als Resampling-Daten in einem 30-m-Raster von der NASA kostenfrei zur Verfügung gestellt. Da der Überflugzeitpunkt über Deutschland, bedingt durch die Orbits der Satelliten, jeweils bei etwa 10 Uhr vormittags liegt, ist zu beachten, dass die jeweilige maximale Tagestemperatur zu diesem Zeitpunkt noch nicht erreicht ist und die Daten die tatsächlich erreichten Maximalwerte etwas unterschätzen. Zur Verwendung kamen nur Landsat-Aufnahmen, die das jeweilige Untersuchungsgebiet vollständig und wolkenfrei abdecken.

Die Berechnung der Vitalität basiert, analog zur Ableitung des Stadtgrünrasters, auf multispektralen Sentinel-2-Daten (vgl. Kapitel 3.1).

In der nachfolgenden Tabelle 10 wird eine Übersicht über die verwendeten Satellitendaten für die Fallstudienstädte gegeben, welche für die Berechnung der Oberflächentemperatur und Vitalität verwendet wurden. In die Langzeitreihe gingen die Jahre 1984-2017 ein, aus 2018 und 2019 wurden nur einzelne exemplarische sehr heiße Tage für die Defizitanalyse ausgewählt.

Tabelle 10
Anzahl der verwendeten Satellitenaufnahmen

	Landsat 5 (Thermal)	Landsat 8 (Thermal)	Sentinel-2 (Vitalität)
Potsdam	50	11	4
Berlin	51	11	4
Leipzig	61	3	2
Hanau	115	19	4
Schwäbisch Gmünd	48	5	2
Bielefeld	35	6	2
Solingen	50	14	2
Saalfeld	57	6	2

Quelle: LUP

Die für die Berechnung der Vitalität verwendeten Sentinel-2-Szenen sind in der Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11
Übersicht über die verwendeten Sentinel-2-Daten zur Vitalitätsberechnung

Vitalität	
Potsdam	30.08.2017, 31.07.2018, 07.08.2018, 26.07.2019
Berlin/Teltow	30.08.2017, 31.07.2018, 07.08.2018, 26.07.2019
Leipzig	28.07.2018, 26.07.2019
Hanau	19.07.2017, 09.07.2018, 04.07.2019, 24.07.2019
Schwäbisch Gmünd	19.07.2017, 24.07.2019
Bielefeld	23.08.2017, 23.08.2019
Solingen	23.08.2017, 23.08.2019
Saalfeld	01.07.2018, 26.06.2019

Quelle: LUP

Multitemporale Auswertungen zur Entwicklung des Grünvolumens erfordern Datensätze verschiedener Zeitschnitte. Für die Fallstudienstädte Berlin und Leipzig konnten innerhalb des Projektes jeweils zwei Grünvolumendatensätze berechnet werden, für Potsdam lagen inkl. früherer Erhebungen vier Datensätze vor (Tabelle 12).

Tabelle 12
Übersicht über die verwendeten Grünvolumendatensätze zur Auswertung der Vitalität

Multitemporale Auswertung	
Potsdam	Grünvolumen 2018 Grünvolumen 2016 Grünvolumen 2010 Grünvolumen 1992
Berlin	Grünvolumen 2018 Grünvolumen 2016
Leipzig	Grünvolumen 2018 Grünvolumen 2012

Quelle: LUP

Ein Sommer-Winter-Vergleich des Grünvolumens konnte auf Basis der in Tabelle 13 aufgeführten Grünvolumen-Datensätze, welche innerhalb des Projektes erstellt wurden, für einen Ausschnitt von Potsdam berechnet werden.

Tabelle 13

Übersicht über die verwendeten Grünvolumendatensätze für einen Sommer-Winter-Vergleich

Jahreszeitlicher Vergleich	
Potsdam/ Ausschnitt	Grünvolumen 2018 Sommer Grünvolumen 2018 Winter

Quelle: LUP

5.1.3 Methodik

Berechnung des Grünvolumens aus digitalen Oberflächenmodellen und Luftbildern

Die Bestimmung des Grünvolumens in den Fallstudienstädten erfolgte auf Grundlage von digitalen Oberflächenmodellen und einer überwachten Klassifikation der RGBI-Orthophotos.

Die Oberflächenmodelle wurden entweder aus Laserscandaten oder anhand von Stereoluftbildern erzeugt (vgl. Tabelle 9). Die Laserscandaten (Beispiel Leipzig) lagen als unklassifizierte Punktwolken vor. Nach Klassifikation der Punktwolke in Bodenpunkte, Gebäude und Vegetation und der Festlegung der Ausgabegröße des Oberflächenmodells (Pixelgröße 0,2 m) wurden diese aggregiert und gerastert.

Die Ableitung von digitalen Oberflächenmodellen aus Stereoluftbildern erfolgte mittels SemiGlobal-Matching (z. B. in den Fallstudienstädten Potsdam, Hanau, Bielefeld, Saalfeld, Solingen und Schwäbisch Gmünd). Die digitalen Oberflächenmodelle (DOM) wurden mit einem digitalen Geländemodell (DGM) normalisiert (nDOM), d. h. es werden die wahren Geländehöhen von den ermittelten Höhen im Oberflächenmodell subtrahiert, um somit Objekthöhen von Gebäuden und Vegetation zu ermitteln.

Die überwachte Klassifikation beruht auf dem Random-Forest-Klassifikator (Breiman 2001), der für die Ableitung der neun Landbedeckungsklassen in Tabelle 14 trainiert wurde. Die Klassen zu den Fallstudienanalysen unterscheiden sich von den Klassen des Stadtgrünrasters (vgl. Kapitel 3.3), da aufgrund der um Faktor 20 bis 50 höheren Auflösung (0,2/0,5 m zu 10 m bei Sentinel2) genauere Klassenzuweisungen möglich sind. Vorbereitend mussten die Orthophotos mosaikiert sowie Referenzgebiete für die verschiedenen Klassen festgelegt werden. Diese wurden anschließend im Verhältnis 70/30 in Trainings- und Validierungsgebiete aufgeteilt.

Die Klassifikationsergebnisse wurden wenn möglich mit Zusatzdaten (bspw. ATKIS, InVeKoS) und Expertenwissen verbessert. Auch zusätzliche Indizes wie der NDVI können dafür verwendet werden. Sofern die Orthophotos nicht gebietsdeckend vorliegen, erfolgte die Klassifizierung der Teilgebiete verschiedener Aufnahmezeitpunkte getrennt. Die Ergebnisse werden anschließend zusammengeführt.

Zur Bestimmung des Grünvolumens für bestimmte Bodenbedeckungsklassen, die aus der Klassifikation hervorgehen, wurden zur Berechnung des Grünvolumens [m^3] Pauschalhöhen verwendet und mit der Pixelgröße multipliziert (Klassen 1-6, Tabelle 14). Für Büsche und Bäume (Klassen 7-9, Tabelle 14) gehen die tatsächlichen Höhenwerte des normalisierten Oberflächenmodells in die Berechnung ein. Dabei wird für Bäume und Büsche mit einer Höhe über 5 m ein bestimmter Prozentsatz (10 bzw. 25 %) für das Stamm-/Holzvolumen abgezogen.

Tabelle 14
Übersicht über die Klassen

Klasse		Vegetationshöhe [m]	Grünvolumen [m ³]
1	Wasser	0,00	Pixelgröße x Vegetationshöhe
2	Schwimmbrett	0,05	Pixelgröße x Vegetationshöhe
3	Versiegelt/offener Boden	0,00	Pixelgröße x Vegetationshöhe
4	Grünland	0,50	Pixelgröße x Vegetationshöhe
5	Röhricht	1,50	Pixelgröße x Vegetationshöhe
6	Acker	1,00	Pixelgröße x Vegetationshöhe
7	Büsche < 5 m	Oberflächenmodell	Pixelgröße x Vegetationshöhe
8	Büsche und Bäume 5-9 m	Oberflächenmodell	Pixelgröße x Vegetationshöhe – 10 %
9	Bäume > 9 m	Oberflächenmodell	Pixelgröße x Vegetationshöhe – 25 %

Quelle: LUP

Unter Hinzunahme von Flächenvektoren kann das Grünvolumen pro Fläche, die sogenannte Grünvolumenzahl, bestimmt werden [m³/m²].

Abbildung 25
Methodische Schritte der Grünvolumenberechnung – Ausschnitt Leipzig



links oben: RGBI-Orthophoto (NIR, R, G), rechts oben: Vegetationsklassifizierung aus den RGBI-Orthophoto auf Pixelbasis, links unten: Vegetationshöhen aus dem normalisierten Oberflächenmodell auf Pixelbasis in m, rechts unten: Grünvolumenzahl [m³/m²] pro statistischem Block

Quelle: LUP

Abbildung 25 zeigt anhand eines Ausschnitts in Leipzig die Bestimmung des Grünvolumens aus den mosaikierten RGBI-Orthophotos und dem normalisierten Oberflächenmodell. Das Orthophotomosaik wird zunächst überwacht klassifiziert und anschließend mit dem normalisierten Oberflächenmodell für Büsche und Bäume (Klassen 7-9) kombiniert. Mit dem Ergebnis des Grünvolumens [m³] auf Pixelebene kann dieses auf andere Geometrien aggregiert werden (z. B. statistische Blöcke).

Alternative Berechnung des Grünvolumens aus Sentinel-2-Daten

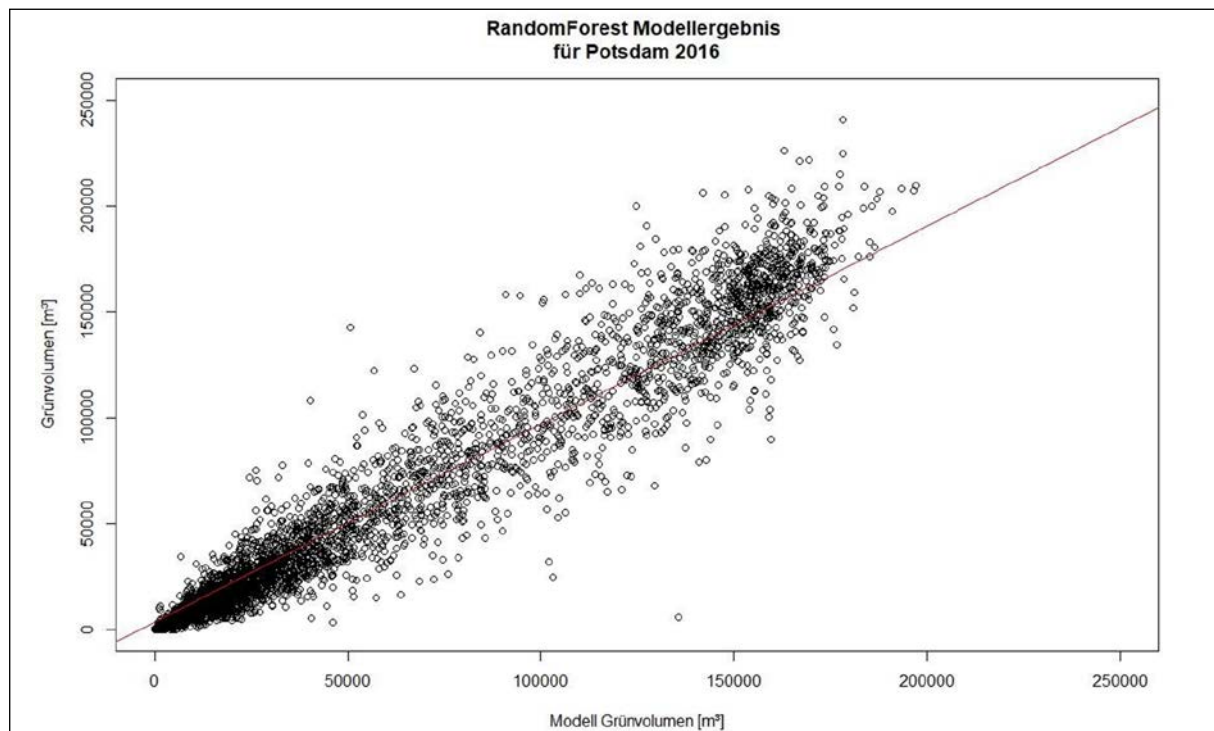
Die Verfügbarkeit von höchstaflösenden Fernerkundungsdaten aus der Vegetationsperiode ist nicht immer gegeben. Stereo-Luftbilder oder Laserscandaten, die die Gehölze in unbelaubtem Zustand erfassen, sind nur sehr eingeschränkt für die Berechnung des Grünvolumens geeignet. Sind jedoch aus angrenzenden Gebieten oder in Teilbereichen 3D-Informationen im belaubten Zustand vorhanden, so kann mittels Modellbildung und Übertragung dieses Modells eine Gesamtanalyse durchgeführt werden.

Zur Berechnung des Grünvolumens für Berlin wurde deshalb anhand von Trainingsdaten aus Potsdam ein Regressionsmodell auf multitemporale Sentinel-2-Daten angewendet. Hierzu erfolgte die Erstellung eines überwachten Random-Forest-Modells für das Grünvolumen Potsdam 2016.

Das Grünvolumen von 2016 von Potsdam (0,25 m Auflösung, siehe Abbildung 25) wurde hierzu zunächst durch zonale Statistik zu einem 100 m aufgelösten Raster aufsummiert. Die 10 m aufgelösten Sentinel-2-Daten verschiedener Zeitpunkte, sowie die daraus berechneten Indizes (Normalized difference vegetation index NDVI, Normalized difference red edge index NDRE) wurden ebenfalls mittels zonaler Statistik (beschrieben durch Minimum, Maximum, Mittelwert, Standardabweichung) für das 100 m Raster aggregiert. Es erfolgt anschließend eine Aufteilung in 70 % Trainings- und 30 % Validierungsflächen. Das daraus erstellte Regressionsmodell konnte auf das Gesamtgebiet von Berlin angewandt werden. Die Genauigkeit des Modells wird mittels des RMSE (Root Mean Squared Error) und R² bestimmt.

Abbildung 26

Validierung des Random Forest-Modellergebnisses für Potsdam 2016 (R²=0,95 ; RMSE=12.597 m)



Quelle: LUP

Der Anteil, der durch die Prädiktor-Variablen aus den Sentinel-2-Daten erklärt werden kann, beträgt 94 % ($R^2=0,94$). Abbildung 26 stellt den linearen Zusammenhang der Modellergebnisse mit den Ausgangsdaten für Potsdam 2016 dar.

Identifikation von Stadträumen mit defizitärer Grünausstattung

Für einige Fallstudienstädte wurde der Zusammenhang von Grünvolumenzahl (Grünvolumen pro Fläche), Versiegelungsanteil und Oberflächentemperatur empirisch ermittelt. Mithilfe des dabei abgeleiteten linearen Modells können nachfolgend Richtwerte für das potenzielle Grünvolumen bestimmt werden, welches notwendig wäre, um eine Absenkung der Oberflächentemperatur um einen maximal zulässigen Wert an sehr heißen Tagen zu erreichen. Als Bezugseinheit wurde für alle Fallstudienstädte ein einheitliches Raster mit 100 m Zellgröße gewählt, für welches die vorgenannten Größen aggregiert werden.

Die Grünvolumenzahl wurde entsprechend der vorgestellten Berechnungsmethoden ermittelt. Der Versiegelungsanteil leitet sich aus den versiegelten Flächen der Klassifikation (vgl. Tabelle 14) ab. Die Oberflächentemperatur wird für einen heißen Tag der Jahre 2018 oder 2019 bestimmt. Die Werte wurden auf ein 100 m-Raster aggregiert. Im weiteren Verlauf wurden nur die Zellen betrachtet, in denen der Versiegelungsanteil 10 % übersteigt.

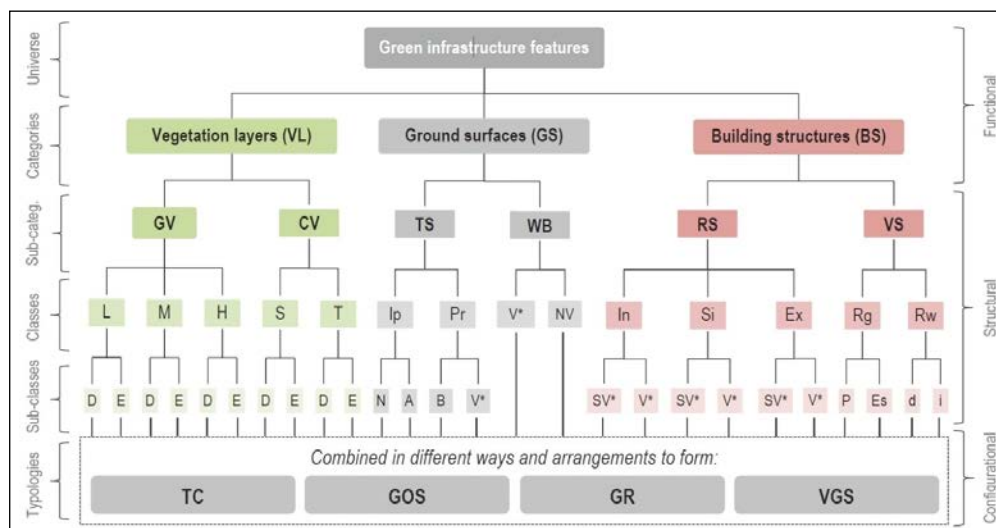
Nach Analyse der so erhaltenen Einteilung der Messwerte wurde ein lineares Modell der Form $T(s, g) = T_0 + c_s \cdot s - c_g \cdot g$ zur Beschreibung der Temperatur T einer Zelle in Abhängigkeit ihres Versiegelungsgrades s und der Grünvolumenzahl g gewählt. Dabei sind T_0 , c_s und c_g die freien Parameter des Modells, welche für jede Stadt einzeln bestimmt wurden. Weiterhin erfolgte die Erstellung eines linearen Modells aller Fallstudien-Messdaten mit für alle Städte identischen Werten für die Parameter c_s und c_g . Dadurch konnten für c_s und c_g die optimalen Werte ermittelt werden, um den mittleren Fehler des Regressionsmodells für alle Städte zu minimieren.

Erstellung einer Typologie des Stadtgrüns

Die Klassifikationen aus Tabelle 14 dienen als Grundlage zur Erstellung einer Typologie des Stadtgrüns. Die Klassifikationen weisen eine räumliche Auflösung von 0,2 bzw. 0,5 m, je nach Grünvolumendatensatz in der jeweiligen Stadt, auf. Die Typologisierung von Stadtgrün kann aus funktionalen, strukturellen oder kontextbasierten Blickwinkeln erfolgen (Abbildung 27).

Abbildung 27

Unterteilung von Stadtgrün anhand der klimatischen Funktion, Struktur und Anordnung



Quelle: Bartesaghi Koc et al. 2016

Die Klassifikation der hochaufgelösten Orthophotos nach Tabelle 15 ermöglicht verschiedene darauf aufbauende Typisierungen des urbanen Grüns. Eine erste strukturelle Typisierung (Typ 1) nach Vegetation (Vegetation Layer VL), Bodenbedeckung (Ground surfaces GS- terrestrisch (TS) oder Wasserkörper (WB)) und Versiegelung (Building structures BS) ist beispielhaft für Leipzig im Kapitel 5.1.4 dargestellt.

Die Vegetation (VL) kann weiterhin strukturell z. B. nach der Höhe (geringe, mittlere, hohe Vegetation) unterschieden werden (Typ 2). Dies wird entsprechend der Vegetationshöhe in Tabelle 15 bei der Bestimmung des Grünvolumens einbezogen. Die Differenzierung der versiegelten Flächen nach vertikalen Strukturen (VS) (Typ 3) kann durch die 2D-Datenstruktur der Orthophotos nicht erfolgen. Dennoch können die 3 Hauptgruppen von städtischem Grün „offene Grünflächen“, „Gehölz“ und „begrünte Dachstrukturen“ (green roofs GR) erfasst werden. Unter Hinzunahme von weiteren Flächennutzungsdaten (z. B. ALKIS, ATKIS etc.) kann das mittlere spezifische Grünvolumen verschiedener Flächennutzungstypen, z. B. Friedhof, Park, Sport-, Freizeit- und Erholungsflächen, baulich geprägte Flächen etc., bestimmt werden.

Tabelle 15

Übersicht über die Klassen und Typisierungen

Klasse	Vegetationshöhe [m]	Typ 1	Typ 2	Typ 3
1	Wasser	WB	WB	WB
2	Schwimmblatt	WB	WB	-
3	Versiegelt/offener Boden	BS/TS	BS/TS	BS
4	Grünland	VL	VL-gering	Offene Grünfläche
5	Röhricht	VL	VL-mittel	-
6	Acker	VL	VL-mittel	-
7	Büsche <5 m	VL	VL-mittel	Gehölz
8	Büsche und Bäume 5-9 m	VL	VL-mittel-hoch	Gehölz
9	Bäume >9 m	VL	VL-hoch	Gehölz
10				Gründach

Quelle: LUP

Oberflächentemperatur

Die Temperaturbestimmung erfolgte auf Grundlage von Landsat-Thermaldaten, wobei zu beachten ist, dass es sich hierbei um Oberflächentemperaturen handelt. Diese steht nicht im unmittelbaren Zusammenhang mit der sensorischen Temperaturwahrnehmung des Menschen. Jedoch stellt sie, im Vergleich mit lokalen Messstellen, eine flächendeckende Approximation dar, welche zur Abschätzung der Hitzebelastung bei Stadtklimamodellierungen verwendet werden kann, wenn flächendeckende Aussagen zu treffen sind (Krüger et al. 2013).

Aus allen wolkenfreien Landsat-Aufnahmen ab 1984 bis 2017 wurde das jährliche Mittel der Oberflächentemperatur für die vegetationsrelevanten Monate April bis September berechnet. Anschließend konnte daraus das langjährige Mittel der Oberflächentemperatur der Sommermonate bestimmt werden. Für die Jahre 2018 und 2019 wurde jeweils die beste wolkenfreie Aufnahme der Sommermonate Juni, Juli oder August als Repräsentant eines Tages in einer heißen Periode verwendet. Durch die Relation dieser Werte zum langjährigen Mittel ergaben sich stark veränderte Bereiche, beispielsweise durch eine Zunahme der Versiegelung oder Verlust von Grün- oder Wasserflächen.

Die Oberflächentemperatur wird cloudbasiert anhand des Single-Channel (SC) Algorithmus nach Jiménez-Muñoz u. a. (2009) und Jiménez-Muñoz u. a. (2014) berechnet. Eingangsdaten sind das jeweilige thermische Infrarotband und die Bänder Rot und Nahes Infrarot im optischen Aufnahmebereich der Landsat-Sensoren. Bei Landsat 8 wird Band 10 im thermischen Infrarot verwendet, da dieser Bereich eine höhere atmosphärische Transmissivität aufweist (Jiménez-Muñoz u. a. 2014). Nach U.S. Geological Survey (2016) ist Band 10 zudem weniger durch Streulichtfehler betroffen als Band 11.

Vitalität

Nach einer Literaturstudie wurden mehr als 150 Indizes und Bandkombinationen getestet, um besonders geeignete Vegetationsindizes herauszufiltern. Einen Überblick zu den getesteten Indizes ist dem Anhang 10.3 zu entnehmen. Insbesondere der Disease Water Stress Index DSWI (Galvão et al. 2005) konnte als geeigneter Vitalitätsindikator identifiziert werden:

$$DSWI = (NIR + Green) / (SWIR + Red)$$

Die gewählten Bänder bilden folgendes ab:

- reduzierte Chlorophyll-Konzentration (Pigment-degradierung) und veränderte Chlorophyll/Carotinoid Verhältnisse – sichtbar im Grün und Rot sowie *NIR* und
- verringerter Blattwassergehalt – sichtbar im *SWIR*.

Der *DSWI* wurde cloudbasiert aus atmosphären-korrigierten und wolkenmaskierten Sentinel-2-Aufnahmen aus den Sommermonaten 2018 und 2019 (Juni bis August) bestimmt. Durch die prozentuale Änderung des *DSWI* von phänologisch vergleichbaren Aufnahmen der beiden Jahre kann Rückschluss auf die Vitalitätsänderung der Vegetation gezogen werden. Zur Darstellung wurden nicht-Baumflächen maskiert.

Multitemporale Auswertung

Das Grünvolumen ist eine variable Größe in urbanen Räumen. Durch die Abbildung zweier oder mehrere Zeitpunkte lassen sich Aussagen über die Änderung des Grünvolumens über einen Zeitraum hinweg treffen. Dadurch können Bereiche hinsichtlich der Veränderungen ihrer Grünausstattung bzw. ihres Grünvolumens identifiziert und quantifiziert werden.

Für die Ableitung plausibler Aussagen zur Veränderung des Grüns sind Vergleiche von flächenaggregierten Daten hochaufgelösten, pixelbasierten Berechnungen vorzuziehen. Daher wird aus den vorhandenen Grünvolumina zunächst die Grünvolumenzahl für verschiedene Flächenkulissen bestimmt. Diese können verschiedene Aggregationsstufen abbilden, beispielsweise die Gesamtfläche, die Ortslage oder statistische Block- bzw. ATKIS-Polygone. Anschließend wird durch die Differenz des aktuellen und des früheren Zustands der Zuwachs bzw. die Abnahme bestimmt.

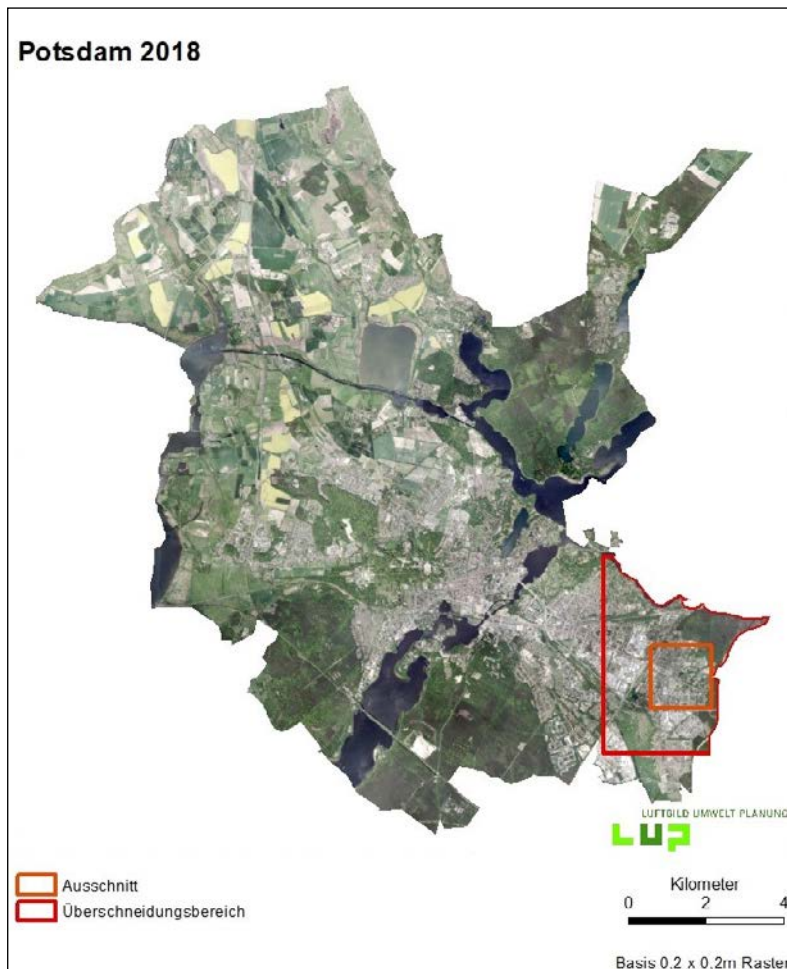
Saisonaler Vergleich

Ein hochaufgelöster Grünvolumenvergleich im belaubten und unbelaubten Zustand ist nur möglich, wenn für dasselbe Gebiet zeitnah eine Sommer- und Winterbefliegung durchgeführt wurde. Da Luftbildbefliegungen aus Kostengründen meist nur in mehrjährigen Intervallen (meist 3-4 Jahre) von den Landesvermessungsverwaltungen durchgeführt werden, ist dieser Umstand oft nicht gegeben. Winterbefliegungen werden meist am Jahresbeginn mit dem Ziel, den Gebäude- und Wegebestand aufzuzeigen, durchgeführt. Später im Jahr ist dies nur eingeschränkt möglich, da Baumkronen die entsprechende Infrastruktur überschirmen können. Für die Bestimmung des maximal wirksamen Grünvolumens sind hingegen Sommerbefliegungen aussagekräftiger.

Zur Untersuchung der Änderung des Grünvolumens im jahreszeitlichen Verlauf wurde ein Sommer-Winter-Vergleich exemplarisch für Potsdam durchgeführt. Dort liegen für ein Quartier für 2018 sowohl Winter- als auch Sommerstereoluftbilder vor. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Befliegungszeiten der Länder Berlin und Brandenburg. Das Gebiet stellt den Überschneidungsbereich (ca. 1309 ha) beider Befliegungen dar. Für einen Vergleich in der Ortslage wurde daraus zusätzlich ein Ausschnitt im Stadtbezirk „Am Stern“ gewählt,

welcher Abbildung 28 entnommen werden kann. Aus beiden Luftbildaufnahmen wurde mittels Dense-Stereo-Matching jeweils ein Oberflächenmodell erstellt und mit der Landnutzungsklassifikation der Sommeraufnahme das Grünvolumen berechnet. Die Differenz der beiden Zeitpunkte ermöglicht eine Abschätzung der saisonalen Variabilität des Grünvolumens.

Abbildung 28
Ausschnitt aus Potsdam für Sommer-Winter-Vergleich



Quelle: LUP

5.1.4 Ergebnisse

Berechnung des Grünvolumens

Im Folgenden sind in Tabelle 16 und Abbildung 29 die Ergebnisse zum Grünvolumen bzw. Grünvolumen pro Fläche (Grünvolumenzahl) für alle Fallstudienstädte aufgeführt mit einer Unterscheidung zwischen Gesamtgebiet und Ortslage (Grundlage ATKIS 2015). Bei Schwäbisch Gmünd ist auf die schwierige Datengrundlage mit einem Oberflächenmodell im unbelaubten Zustand (März 2017) und einer Klassifikation auf Grundlage eines RGB-Orthobilds hinzuweisen. Die Ergebnisse sind daher fehleranfällig. Ebenso ist die scheinbare Zunahme bei Leipzig von 2012 auf 2018 auf die geringere Punktdichte der Laserscandaten 2012 zurückzuführen. Insgesamt zeigt sich ein größeres Grünvolumen bezogen auf das Gesamtgebiet im Gegensatz zur Ortslage, was durch

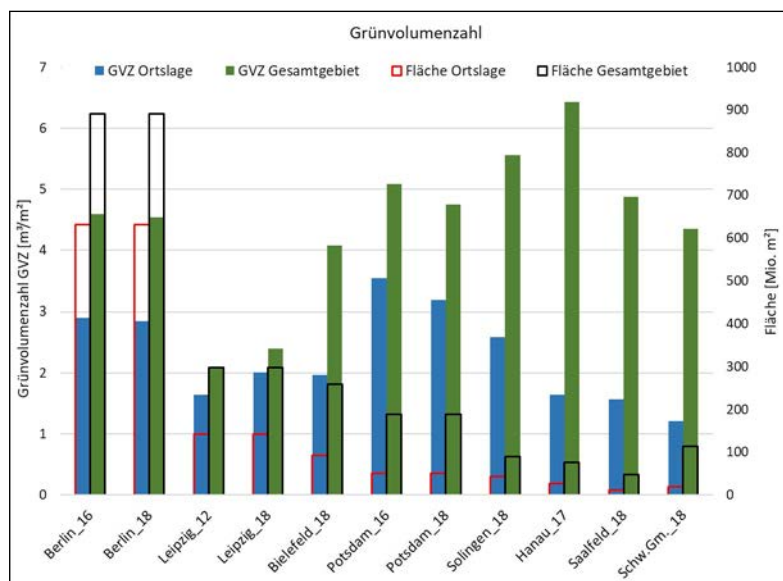
die Berücksichtigung von Wald und Ackerflächen im Gesamtgebiet erklärt werden kann. Deutlich wird jedoch auch die positive Wirkung auf das Grünvolumen durch die großen Parklandschaften in Potsdam.

Tabelle 16
Ergebnisse zur Grünvolumenzahl aller Fallstudienstädte

	Grünvolumenzahl [m ³ /m ²]	
	Gesamtgebiet	Ortslage
Berlin	2016: 4,60 2018: 4,54	2016: 2,90 2018: 2,85
Leipzig	2012: 2,07 2018: 2,40	2012: 1,65 2018: 2,01
Bielefeld	2018: 4,08	2018: 1,96
Potsdam	2016: 5,08 2018: 4,75	2016: 3,54 2018: 3,19
Solingen	2018: 5,56	2018: 2,58
Hanau	2017: 6,43	2017: 1,64
Saalfeld	2018: 4,87	2018: 1,56
Schwäbisch Gmünd	2018: 4,35	2018: 1,21
Teltow (Zusatz)	2016: 2,73 2018: 2,56	2016: 2,51 2018: 2,27

Quelle: LUP

Abbildung 29
Darstellung der Ergebnisse zum Grünvolumen pro Gesamtgebiet bzw. Ortslage (GVZ: Grünvolumenzahl m³/m²)



Quelle: LUP

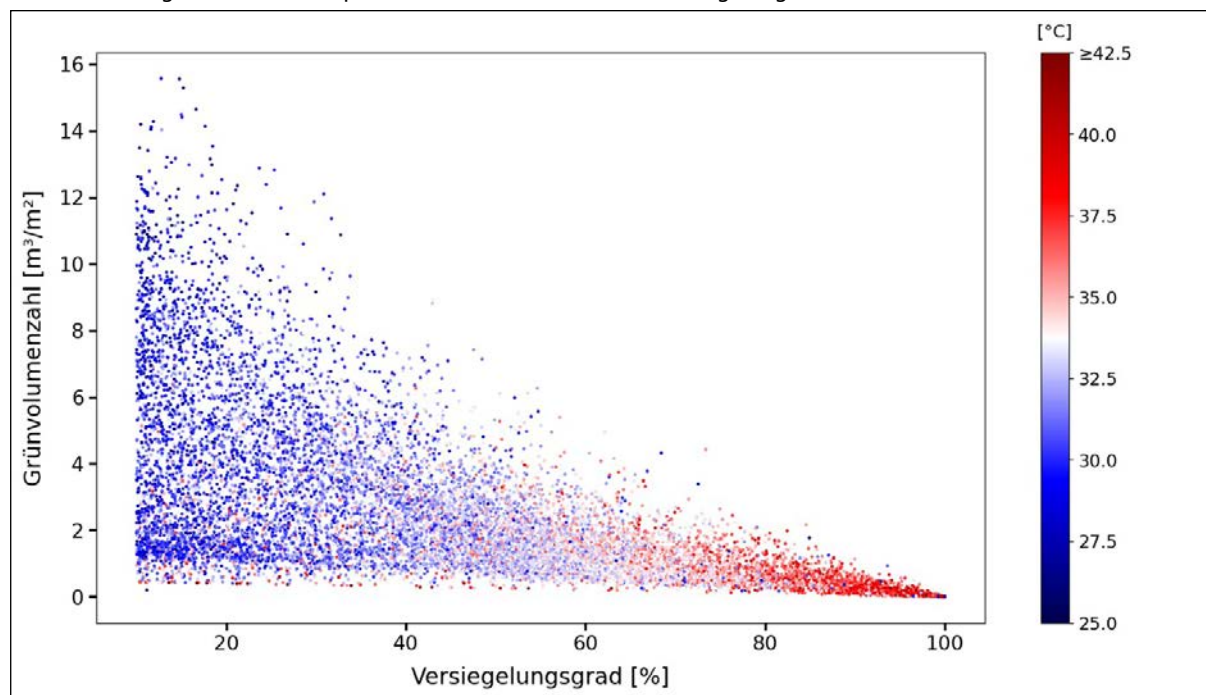
Identifikation von Stadträumen mit defizitärer Grünausstattung

Für die Identifikation von Stadträumen mit defizitärer Grünausstattung ist der Zusammenhang der Messwerte in Abbildung 30 dargestellt. Es zeigt sich erwartungsgemäß eine Zunahme der Oberflächentemperatur mit dem Grad der Versiegelung sowie eine Abnahme mit zunehmendem Grünvolumen pro Fläche. Bei der qualitativen Betrachtung der Messwerte ist eine Streuung in den Temperaturmesswerten für Positionen mit vergleichbarem Grünvolumen und Versiegelungsgrad erkennbar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass neben den gemessenen Indikatoren Versiegelungsgrad und Grünvolumenzahl weitere, hier nicht erfasste, Größen den tatsächlichen lokalen Temperaturwert beeinflussen. So wirken sich einerseits lokale Eigenschaften der Messor-

te, wie zum Beispiel Albedo, Art der Versiegelung, Bodenfeuchte und Abschattungseffekte auf die tatsächliche Temperatur aus, aber auch Nachbarschaftswechselwirkungen zwischen verschiedenen Bereichen bzw. Nutzungen, z. B. durch Wind und Konvektion.

Abbildung 30

Zusammenhang Oberflächentemperatur, Grünvolumenzahl und Versiegelung



Quelle: LUP

Das generalisierte Modell ermöglicht nun auch eine Anwendung auf weitere, hier nicht untersuchte Städte. Beispielsweise wird in einer Stadt an einem heißen Tag in einem bestimmten Bereich mit gegebener Grünvolumenzahl g_{ist} und Versiegelungsgrad s_{ist} eine lokale Maximaltemperatur T_{ist} gemessen. Unter der Annahme der Gültigkeit des Modells ergibt sich somit die Beziehung.

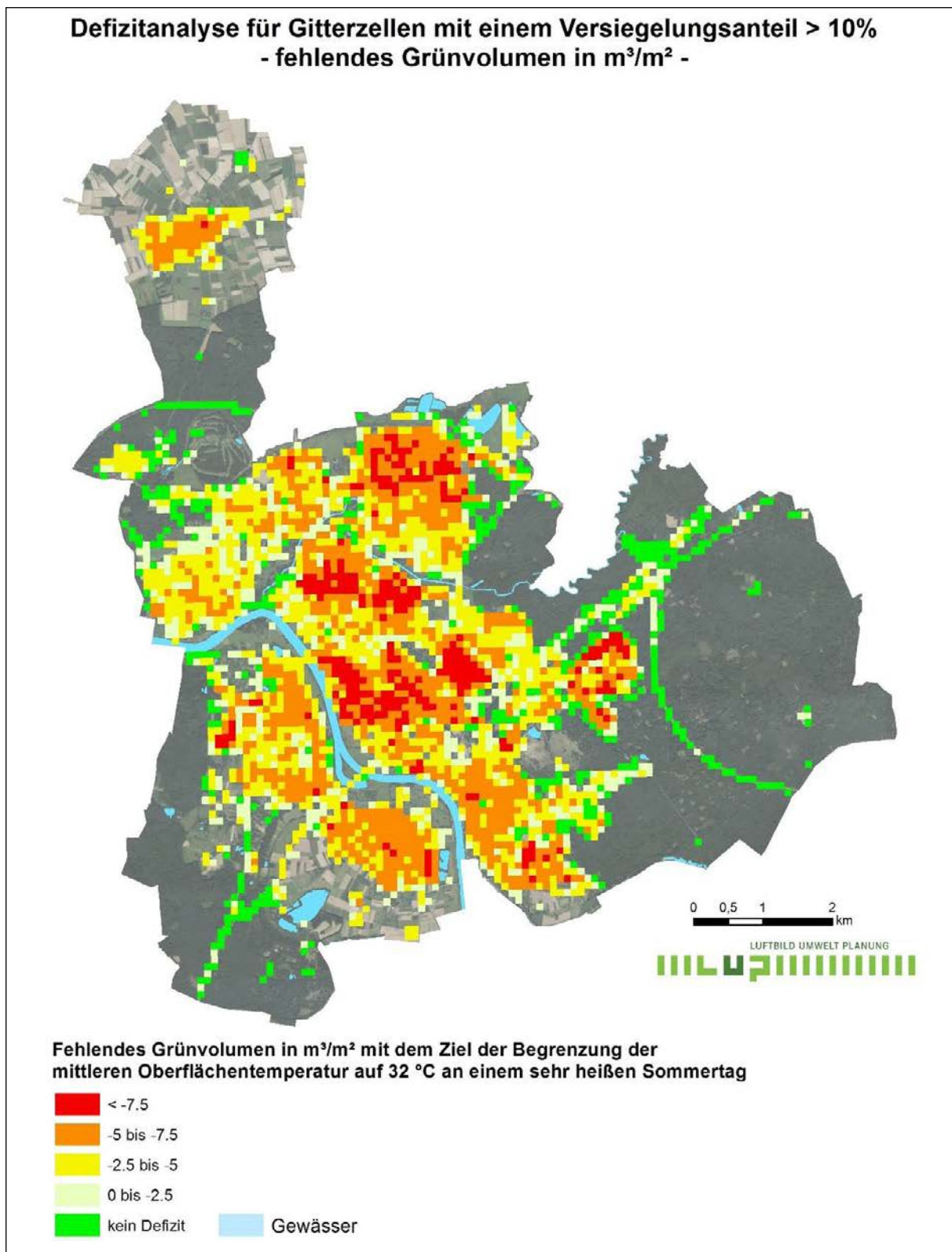
$$T_{ist} = T_0 + 0.0351^{\circ}\text{C} \cdot s_{ist}[\%] - 0.4016^{\circ}\text{C} \cdot g_{ist}[\text{m}^3/\text{m}^2] \quad (1)$$

Soll beispielsweise die Oberflächentemperatur zukünftig unter gleichen meteorologischen Bedingungen gesenkt werden, um auf eine gewünschte Temperatur T_{soll} zu kommen, so muss das Grünvolumen um $2,49 \text{ m}^3/\text{m}^2$ pro 1 K Temperaturdifferenz erhöht werden.

$$\Delta g [\text{m}^3/\text{m}^2] = 2.49 \cdot (T_{ist}[\text{°C}] - T_{soll}[\text{°C}]) \quad (2)$$

Es sei bemerkt, dass in der Praxis eine Vergrößerung des Grünvolumens möglicherweise sogar einen stärkeren als den von Gleichung (1) vorhergesagten Effekt hat, wenn durch die Zunahme des Grünvolumens gleichzeitig eine Reduktion des Versiegelungsgrades einhergeht, denn die obengenannte Formel (2) wurde unter der Annahme eines konstant bleibenden Versiegelungsgrades hergeleitet. Abbildung 31 zeigt das Ergebnis der Defizitanalyse für Hanau.

Abbildung 31
Grünvolumen-Defizitanalyse für Hanau

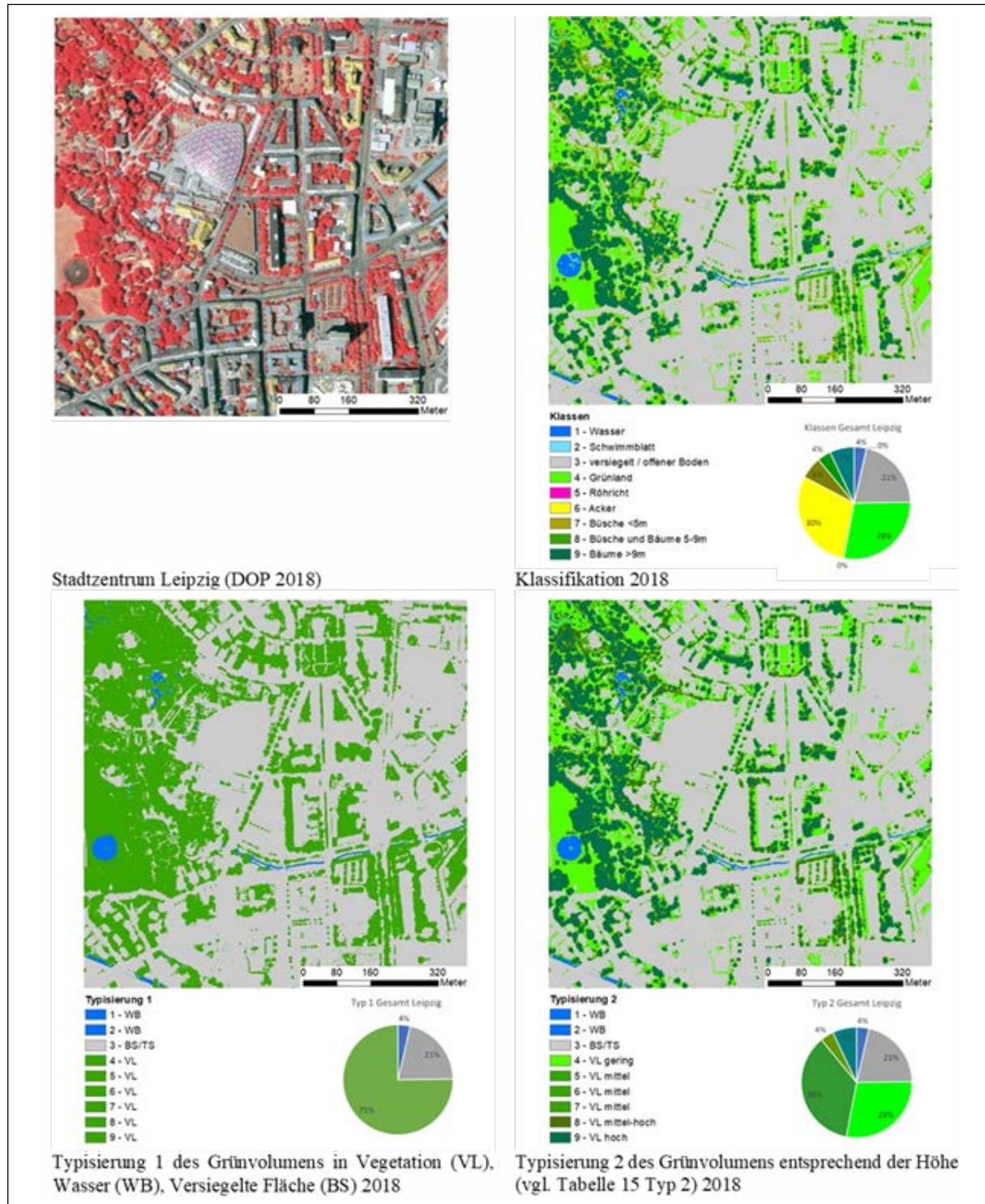


Quelle: LUP

Typologie des Stadtgrüns

Im Folgenden sind beispielhaft die Typisierungen entsprechend Tabelle 15 in der Abbildung 32 für Leipzig dargestellt.

Abbildung 32
Typisierungsbeispiele in Leipzig



Quelle: LUP

Oberflächentemperatur

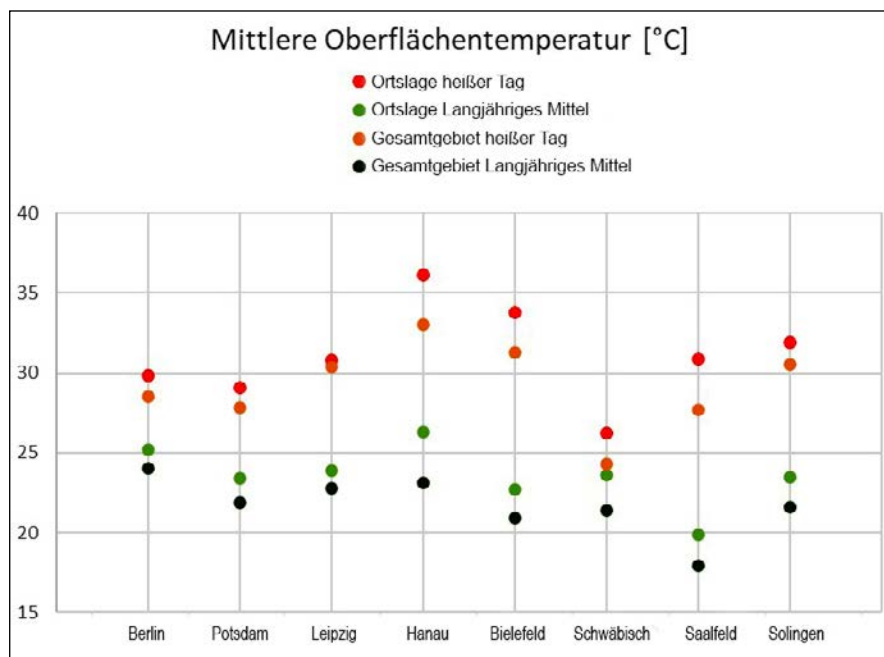
Tabelle 17 und Abbildung 33 zeigen die Ergebnisse der mittleren Oberflächentemperatur aller Fallstudienstädte im Vergleich zur Grünvolumenzahl. Vor allem bei Potsdam, Schwäbisch Gmünd und Saalfeld tritt der kühlende Einfluss des Wassers und Waldes besonders hervor. Grenzt man die Temperaturanalyse auf die Ortslage ein, zeigt sich eine Zunahme der Oberflächentemperatur mit dem Grad der Versiegelung. In allen Städten ist die mittlere Oberflächentemperatur innerhalb der Ortslage höher als jene auf das Gesamtgebiet bezogen.

Tabelle 17
Vergleich der Ergebnisse der Oberflächentemperatur und Grünvolumenzahl

	Mittlere Oberflächentemperatur [°C]				Grünvolumenzahl [m ³ /m ²]	
	Stadtgebiet		Ortslage		Stadtgebiet	Ortslage
	Heißer Tag	Langjähriges Mittel	Heißer Tag	Langjähriges Mittel	Zeitpunkt	
Berlin	28,5	24,0	29,8	25,2	2016: 4,60 2018: 4,54	2016: 2,90 2018: 2,85
Leipzig	30,4	22,8	30,8	24,0	2012: 1,62 2018: 2,01	2012: 2,07 2018: 2,40
Bielefeld	31,3	20,9	33,9	22,9	2018: 4,19	2018: 1,99
Potsdam	27,8	21,9	29,2	23,5	2016: 5,08 2018: 4,75	2016: 3,63 2018: 3,28
Solingen	30,5	21,6	32,0	23,6	2018: 5,56	2018: 2,61
Hanau	33,0	23,1	36,1	26,4	2017: 6,43	2017: 1,71
Teltow					2016: 2,73 2018: 2,56	2016: 2,51 2018: 2,27
Saalfeld	27,7	17,9	31,0	20,0	2018: 4,87	2018: 1,59
Schwäbisch Gmünd	23,6	21,4	26,2	24,4	2018: 1,21	2018: 4,35

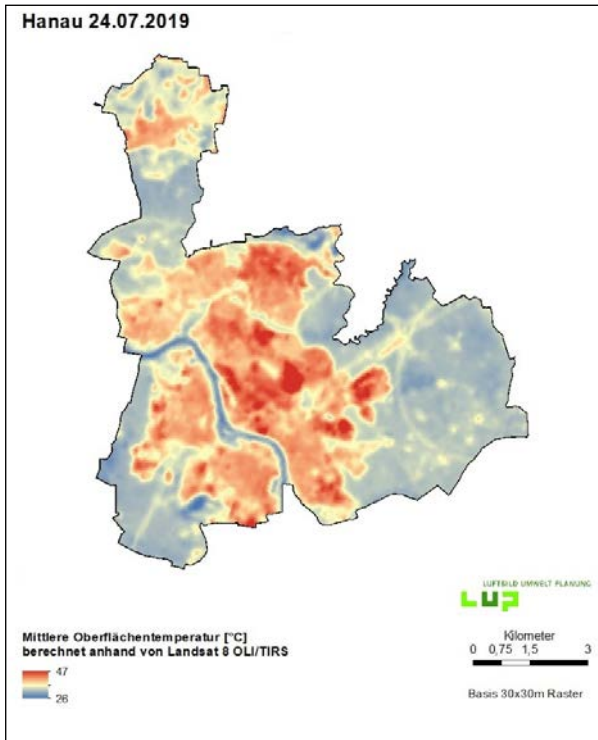
Quelle: LUP

Abbildung 33
Mittlere Oberflächentemperatur in den Fallstudienstädten



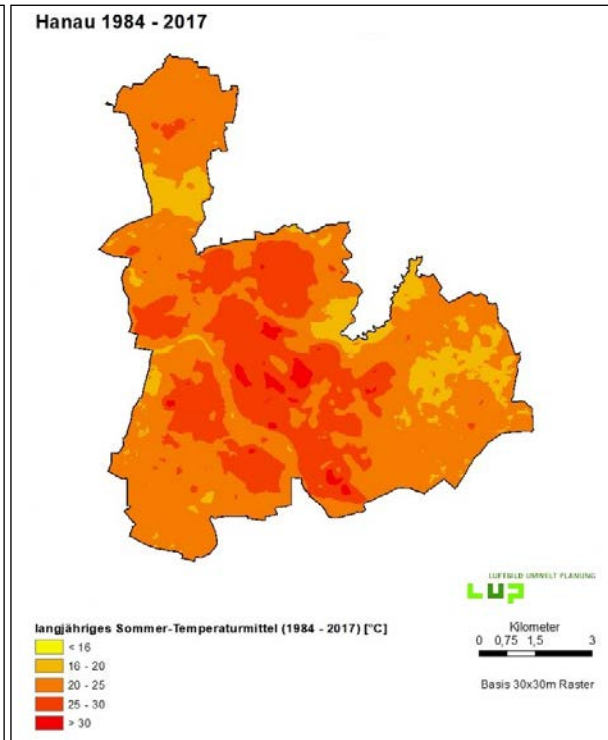
Quelle: LUP

Abbildung 34
Oberflächentemperatur heißer Tag Hanau



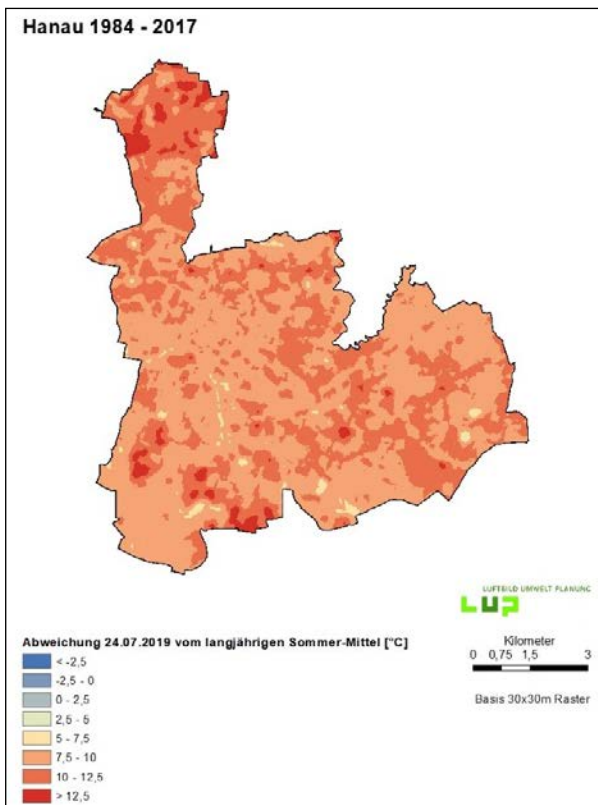
Quelle: LUP

Abbildung 35
Oberflächentemperatur langjähriges Mittel Hanau



Quelle: LUP

Abbildung 36
Oberflächentemperatur Abweichung vom langjährigen Mittel Hanau



Quelle: LUP

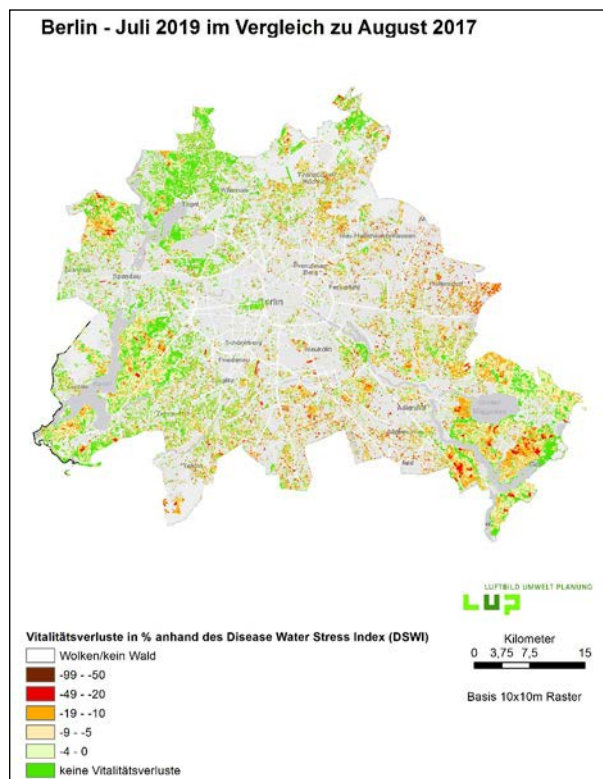
Auffallend sind die hohen Temperaturen bei Hanau sowohl im langjährigen Mittel, als auch an einem heißen Tag (Abbildung 34 und Abbildung 35). Gleichzeitig wird dort im Gesamtgebiet die größte Grünvolumenzahl erreicht, hingegen in der Ortslage nach Saalfeld die geringste. Herausstechend ist auch Potsdam mit der größten Grünvolumenzahl in der Ortslage, im Durchschnitt über $3 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Auch Berlin, eine Metropole, erreicht im Durchschnitt der Gesamtstadt in der Ortslage annähernd $3 \text{ m}^3/\text{m}^2$, während dort das langjährige Temperaturmittel in der Ortslage und Gesamtgebiet mit am höchsten ist.

Vitalität

Die Vitalitätsverluste fallen in den Städten sehr unterschiedlich aus. So zeigt sich in Berlin vor allem der Osten stark betroffen durch Vitalitätsabnahmen im Stadtforst Köpenick (Abbildung 37). In Potsdam (siehe Abbildung 38) zeigen sich hingegen vor allem im städtischen Bereich und Park Babelsberg Vitalitätsrückgänge bei den Bäumen. Besonders stark betroffen ist auch der Thüringer Wald nördlich und südlich von Saalfeld (Abbildung 39). In Hanau (Abbildung 40) fällt das Waldgebiete Bulau im Osten, vor allem um die Waldsiedlung herum mit abnehmenden Trends auf.

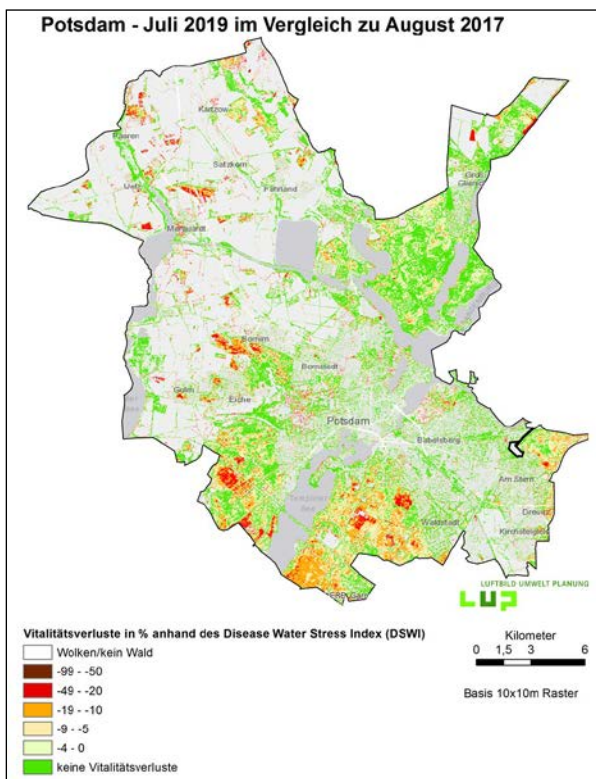
Insgesamt zeigen sich in allen Fallstudienstädten deutliche Vitalitätsabnahmen der Bäume, wobei Leipzig im Stadtgebiet weniger negativ auffällt. Vitalitätsänderungen können beispielsweise durch Trockenheit und damit einhergehendem Stress für die Vegetation erklärt werden. Der DSWI gibt Auskunft über den Blattwassergehalt und somit Wasserverfügbarkeit sowie über die Blattfarbe und damit krankheitsbedingte Verfärbungen. Durch den Vergleich mit einem Jahr (2017), in dem von einem geringen Trockenstress ausgegangen werden kann, können die negativen Veränderungen aufgezeigt werden.

Abbildung 37
Vitalitätsanalyse für Berlin



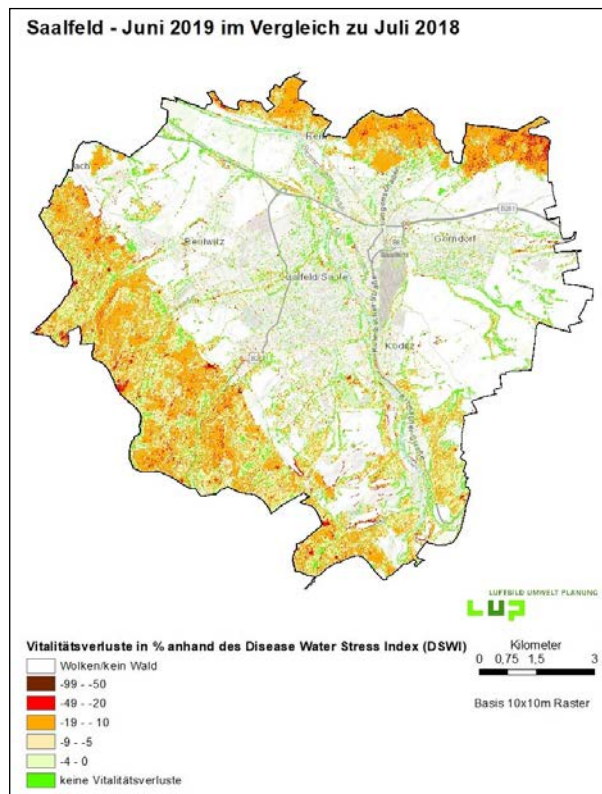
Quelle: LUP

Abbildung 38
Vitalitätsanalyse für Potsdam



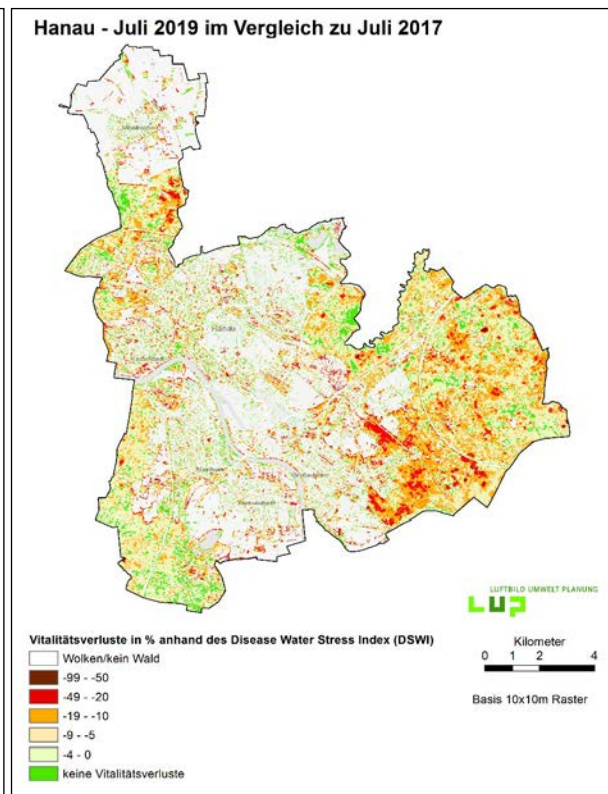
Quelle: LUP

Abbildung 39
Vitalitätsanalyse für Saalfeld



Quelle: LUP

Abbildung 40
Vitalitätsanalyse für Hanau



Quelle: LUP

Multitemporale Auswertung

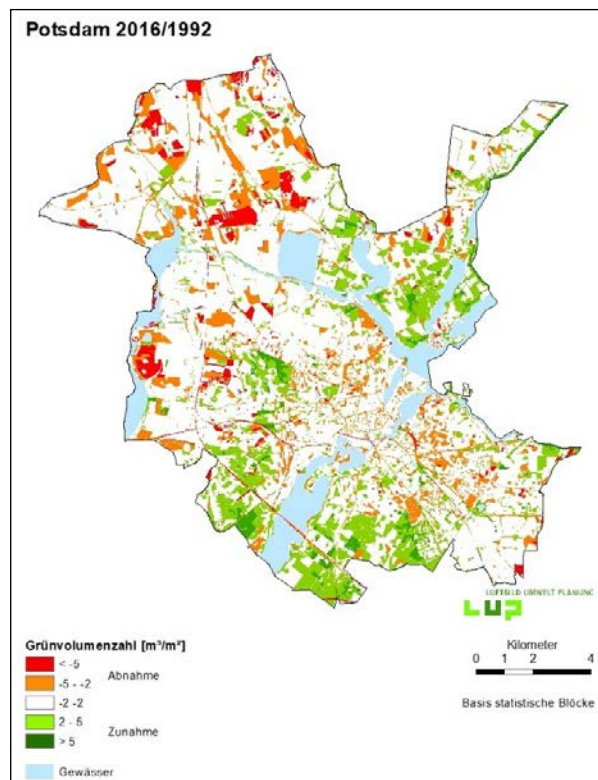
Multitemporale Auswertungen konnten für Potsdam, Berlin und Leipzig durchgeführt werden. Am Beispiel Potsdam (Abbildung 41) zeigen sich für den Zeitschnitt 2016 zu 1992 flächenmäßig die größten Veränderungen, wobei Zunahmen an Grünvolumen überwiegend in bewaldeten Gebieten außerhalb der Ortslage auftreten. Abnahmen lassen sich auf Neubauflächen, jedoch auch kleinräumig im Stadtgebiet lokalisieren. In der Ortslage überwiegen die Abnahmen gegenüber den Zunahmen. Im jüngsten Zeitschnitt 2016 zu 2018 gibt es hingegen flächenmäßig kaum mehr Zunahmen der Grünvolumenzahl über $2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (Abbildung 42).

In Berlin zeigen sich die Zunahmen zwischen 2016 und 2018 ebenfalls größtenteils in bewaldeten Gebieten. Leipzig zeigt von den Zeitschnitt 2012 zu 2018 überwiegend kleinere Veränderungen unter $2 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Nur im Bereich der Burgau zeigen sich großflächige Abnahmen.

Die Analysen in bebauten Bereichen können direkten Aufschluss über Neubebauung und planvolle Entwicklung geben. Die überwiegende Abnahme von Grünvolumen in allen drei Ortslagen gegenüber dem früheren Zustand bestätigt den Trend zur Nachverdichtung und Versiegelung innerhalb der Städte. In Verbindung mit Defizitbereichen wird hier deutlich, wo Grünvolumen erhalten oder neugepflanzt werden muss, um den hohen Oberflächentemperaturwert auszugleichen.

Abbildung 41

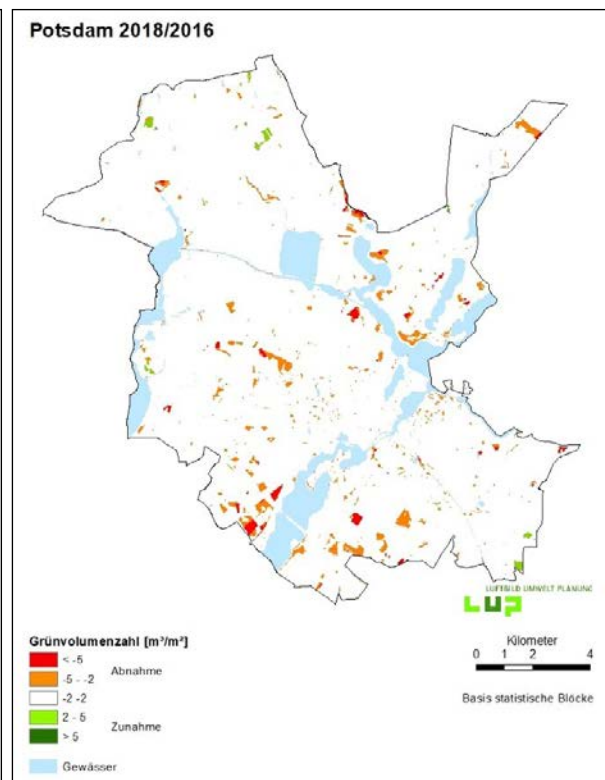
Multitemporale Auswertung am Beispiel Potsdam 2016/1992



Quelle: LUP

Abbildung 42

Multitemporale Auswertung am Beispiel Potsdam 2018/2016



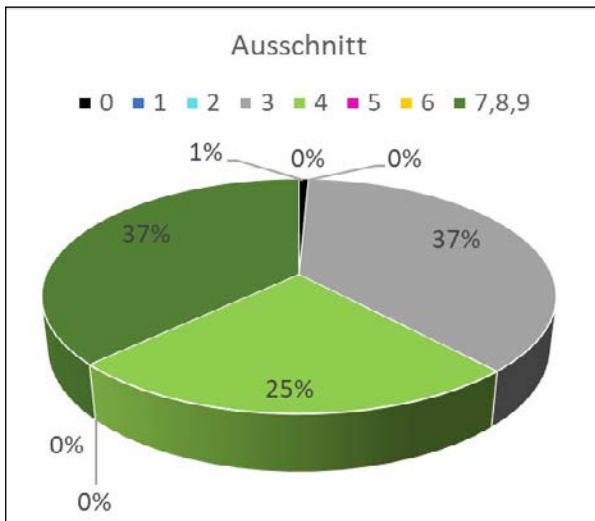
Quelle: LUP

Sommer-Winter-Vergleich

Für den Sommer-Winter-Vergleich steht ein Ausschnitt von Potsdam zur Verfügung, bei dem sich eine Sommer- und eine Winterbefliegung überschneiden. Der Unterschied des Grünvolumens im belaubten zum unbelaubten Zustand ergibt bei der Betrachtung des gesamten Überschneidungsgebiets (1.309 ha) durchschnittlich $-1,9 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Der Anteil des Wintergrünvolumens im Vergleich zum Sommer beträgt insgesamt auf der Fläche 55 %, was einem Verlust von 45 % im Winter entspricht. Bezogen auf den kleineren Ausschnitt von 255 ha (siehe Abbildung 44) liegt der Unterschied durchschnittlich bei $-2,27 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Der Anteil bezogen auf den belaubten Zustand beläuft sich im Winter auf 38 %. Dies entspricht einer Reduktion des Grünvolumens im Winter um 62 %.

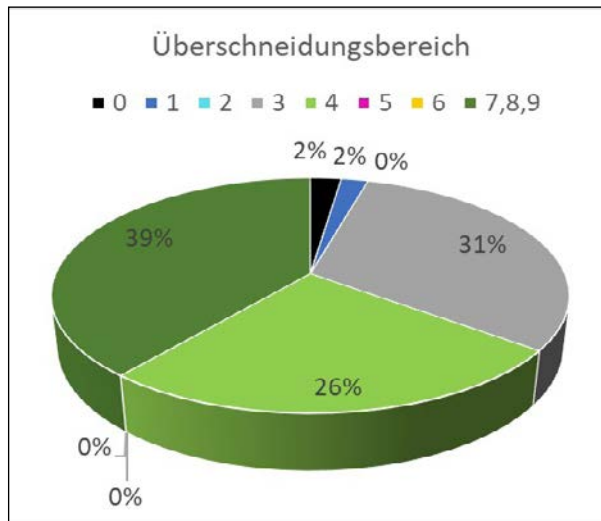
Der Verlust bezieht sich nur auf die Klassen 7 (Büsche <5 m), 8 (Büsche und Bäume 5-9 m) und 9 (Bäume >9 m), bei denen sich das Grünvolumen aus dem Oberflächenmodell ableitet. Den Abbildung 43 und Abbildung 44 kann entnommen werden, dass diese Klassen im Überschneidungsbereich einen Flächenanteil von 39 % einnehmen, beim kleineren Ausschnitt liegt deren Anteil an der Gesamtfläche bei 37 %. Der Anteil der versiegelten Fläche beträgt im kleineren Ausschnitt ebenfalls 37 %, während er im Überschneidungsbereich mit 31 % etwas geringer ausfällt. Der Anteil der Grünlandflächen ist mit 25 % bzw. 26 % in beiden Gebietsausschnitten etwa gleich groß. Der gesamte Überschneidungsbereich kann als Approximation eines Gesamtstadtgebiets angesehen werden, da er große Waldbereiche beinhaltet. Der kleinere Ausschnitt hingegen kann als repräsentativ für eine Ortslage angesehen werden.

Abbildung 43
Klassenanteile im Ausschnitt



Quelle: LUP

Abbildung 44
Klassenanteile im Überschneidungsbereich



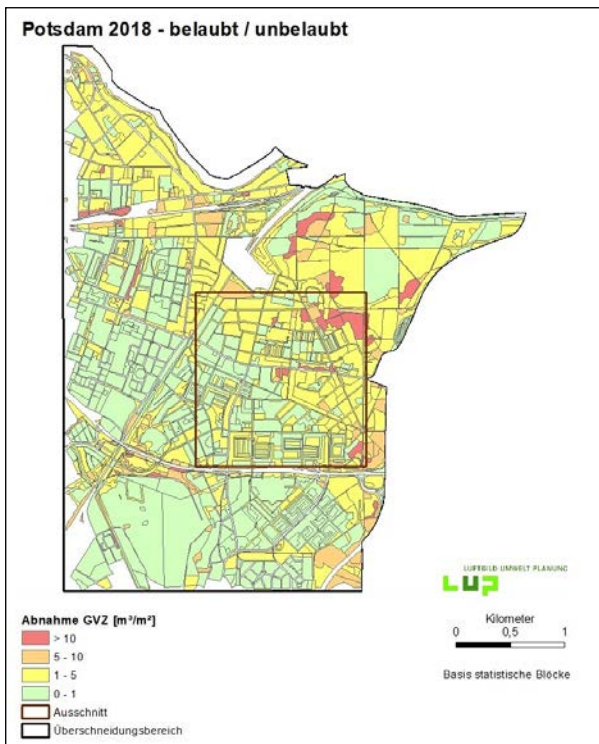
Quelle: LUP

Ausschließlich bezogen auf die Fläche der Klassen 7, 8 und 9 beträgt die durchschnittliche Abnahme des Grünvolumens $4,9 \text{ m}^3/\text{m}^2$ im gesamten Überschneidungsbereich. In Bezug auf den kleineren Ausschnitt beläuft sich die durchschnittliche Abnahme auf $-6,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

Die größten Abnahmen zeigen sich im nordöstlichen Waldgebiet, entlang der nördlichen Bahnstrecke sowie am Campus Griebnitzsee.

Abbildung 45 zeigt die Abnahme der Grünvolumenzahl anhand der statistischen Blöcke.

Abbildung 45
Änderung der Grünvolumenzahl im Sommer-Winter Vergleich



Quelle: LUP

5.2 Sozialräumliche Fallstudien

5.2.1 Datengerüst

Zur Vertiefung der Thematik der Stadtgrünversorgung aus der Nutzerperspektive wurden Spezialauswertungen in Fallbeispielen realisiert. Dabei wurde im Projektverlauf deutlich, dass amtliche Geobasisdaten im Katastermaßstab (ALKIS), im großmaßstäbigen topographischen Maßstab (ATKIS Basis-DLM) sowie fernerkundlich erhobene Datenquellen (Sentinel-2) deutliche Unterschiede bei der Objektbildung des Stadtgrüns aufweisen. Diesbezüglich wurde deshalb besonderer Wert darauf gelegt, für die jeweiligen Analyseschritte fachlich gut begründete Definitionen von Stadtgrün bereitzustellen und in manchen Fällen über die vergleichende Einbeziehung verschiedener Gebietskulissen denkbare fachliche Blickwinkel abzubilden (z. B. private und öffentlich zugängliche Flächen, mit oder ohne landwirtschaftlicher und forstwirtschaftlicher Nutzung, Grünflächen mit Öffnungszeiten und Eintrittspreisen usw.)

Die Indikatorkonzepte wurden dahingehend präzisiert und in pilothaften Anwendungen für ausgewählte Städte umgesetzt. Neben den im Rahmen des Projektes durchgeführten Workshops mit Vertretern der Fallstudienstädte wurden die Konzepte und Ergebnisse auch im Rahmen regelmäßiger Workshops des Austauschforums „Kommunalpanel“ (siehe Textbox 1) diskutiert und z. B. bei der Stadt Solingen und weiteren interessierten Kommunen vorgestellt. Das Interesse lag dabei auf der Realisierung von Indikatoren mit kleinräumigen sozialräumlichen Datengrundlagen, die im ILS Kommunalpanel zur Verfügung stehen (Fina et al. 2018). Diese Datenbasis erlaubt eine vertiefende Analyse auf der Ebene von Adress- und Sozialraumdaten, deren Verfügbarkeit häufig mit den amtlicherseits zu berücksichtigenden Vorgaben des Datenschutzes in Konflikt tritt. Die vorgeschlagenen Konzepte beziehen deshalb mikrogeographische Daten ein, die von den Kommunen selbst auf Datenschutzvorgaben geprüft sind und durch weitere Daten kommerzieller Anbieter ergänzt werden.

Textbox 1

Sozialraummonitoring mit dem ILS-Kommunalpanel



Die wichtige Aufgabe des Monitorings sozialräumlicher Prozesse in urbanen Quartieren stößt auf organisatorische Grenzen, da innerhalb der Städte keine einheitlichen und vergleichbaren Datenbestände für die Raumforschung zugänglich sind. Die Statistischen Ämter deutscher Großstädte verfügen zwar über eine Bandbreite an sozialräumlichen Variablen, die auf Ebene von Baublöcken oder Stadtteilen auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden können. In der Praxis bestehen jedoch vielfach Probleme aufgrund möglicher Änderungen der räumlichen Zuschnitte im Zeitverlauf und der Aussagekraft im Hinblick auf der Ebene von Sozialräumen. Am ILS wird diesbezüglich seit 2015 mit den Pilotkommunen Herne und Witten, seit 2018 ergänzt um Solingen und Düsseldorf, ein Datengerüst für die Zwecke des Sozialraummonitorings aufgebaut (vgl. Fina et al 2018). Auf der Ebene von 500 x 500 Meter großen Raumeinheiten werden Merkmale des Sozialraums aus den Datenbeständen der abgeschotteten Statistikstellen der Städte in Zeitreihen mit Geobasisdaten und ausgewählten Datenbeständen privater Anbieter (z. B. zu Angebotspreisen von Immobilienportalen) verknüpft. Mit diesen Raumeinheiten können Sozialräume als sogenannte lebensweltliche Settings (vgl. Baumgart et al 2018) mit ausreichender Genauigkeit nachgebildet werden. Damit werden zielgruppenspezifische Infrastrukturbedarfe greifbar und können in künftigen Planungsprozessen Berücksichtigung finden.

Zur Umsetzung der Pilotanwendungen musste zunächst ein Untersuchungsgebiet mit passender Datenverfügbarkeit zur Indikatorentwicklung identifiziert werden. Für diesen Zweck wurden sozialräumliche Daten von den Städten Leipzig und Potsdam auf der Ebene von Baublöcken beschafft, die für die Kennwerte *Grünfläche pro Einwohner im definierten Einzugsgebiet* und *Versorgungssituation bezogen auf quantitative Richtwerte* des Indikators Grünraumversorgung Verwendung fanden. Für diese beiden Städte konnten weiterhin objektscharfe Daten zum Stadtgrün aus dem Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem ALKIS extrahiert werden. In den Open-Data-Portalen der Länder Sachsen, Brandenburg und Berlin stehen diese im ALKIS-NAS-Format zum Download zur Verfügung, das mit Hilfe freier Open-Source-Software (OSGEO Norbit ALKIS Konverter) in GIS-Standardformate überführt werden kann. Die Notwendigkeit, Grünressourcen aus benachbarten Kommunen einzubeziehen, erforderte eine entsprechende Anreicherung der ALKIS Daten mit den Datensätzen der Nachbarkommunen.

Für die weiteren Indikatoren stellte sich im Projektverlauf heraus, dass punktscharfe Daten mit Haushaltscharakteristika (z. B. soziale Schicht, Lebensstil) für eine präzise Umsetzung der Indikatoren Vorteile bieten. Diese Datenbasis stand für die Stadt Solingen zur Verfügung, für die die Kennwerte *Fußläufige Erreichbarkeit von Grünflächen mit definierter Mindestgröße*, *Grünflächenversorgung in Bezug zur Distanz zu den Wohnadressen der Bevölkerung*, *Hexagon-Konnektivität* und *Vulnerabilität der Bevölkerung* umgesetzt wurden. Weiterhin wurde in einer abschließenden Sonderauswertung die Stadt Düsseldorf mit einbezogen, um für den Kennwert *Umweltgerechtigkeit* Veränderungen im Zeitverlauf in einer Großstadt mit Verdrängungsdynamik zu untersuchen. Im Kern stand hier die Frage, inwiefern Preissteigerungen auf dem Wohnungsmarkt die Grünraumversorgung nach sozialer Schicht verändert. Für die Stadt Düsseldorf konnten für diesen Zweck Datenbestände aus dem Jahr 2016 erworben und mit dem frei verfügbaren Stand 2020 verglichen werden. Die Wahl der Städte Solingen und Düsseldorf begründet sich ferner aus ihrer Mitwirkung am ILS Kommunalpanel (siehe Textbox 1).

Auch für Solingen wurden Geobasisdaten aus dem ALKIS-Datenbestand OpenNRW als Referenzdatensatz für das Stadtgrün beschafft, um grundlegende Vergleichsgrößen zwischen den üblicherweise für die kommunale Grünplanung genutzten Daten und den im Projekt erarbeiteten Landbedeckungsklassifikationen zu ermitteln. Alternativ zu ALKIS können auch Daten aus dem Digitalen Basis-Landschaftsmodell (ALKIS Basis-DLM) genutzt werden, für die wegen des topographischen Modellierungsansatzes allerdings keine parzellenscharfen Auswertungen möglich sind. Dies stellt dann eine Einschränkung dar, wenn Indikatoren zwischen öffentlich zugänglichen und privaten Grünflächen unterscheiden, was in der vorgeschlagenen Indikatorik durchaus häufig der Fall ist.

Die Konzeptentwicklung stützte sich hier maßgeblich auf ALKIS-Daten und den möglichen zusätzlichen Informationsgewinn durch der im Projekt entwickelten Sentinel-2-Landbedeckungsklassifikation (Stadtgrünraster Deutschland). Wegen der allgemeinen Verfügbarkeit und Nutzbarkeit von ALKIS-Daten der kommunalen Verwaltungen wird vorausgesetzt, dass die im Rahmen des Projektes erarbeiteten Konzepte verallgemeinerungsfähig und gemeindeübergreifend übertragbar sind.

Weiterhin wurden für Indikatoren der Grünerreichbarkeit Daten zur Ermittlung von Fußwegelängen für die Zwecke des Routings aufbereitet. Dieser methodische Ansatz ist bei Erreichbarkeitsanalysen einer reinen Luftlinienentfernung (= euklidische Distanz) vorzuziehen, da die Wegeverbindungen entlang eines Fußwegenetzes durchaus signifikant von euklidischen Distanzen abweichen können (z. B. durch Topographie und Bebauungsstruktur). Genutzt wird der ArcGIS NetworkAnalyst, der in ArcGIS Desktop sowie ArcGIS Pro als Erweiterung lizenziert werden kann. Datengrundlage war ein Straßennetzwerk aus dem freien Geodatenbestand der OpenStreetMap-Community mit Stand Ende 2018. Dieses Netzwerk ist von der Firma Geofabrik weiterqualifiziert (insbes. Bereinigung von Fehlern in der Konnektivität der Straßensegmente) worden und wurde vom ILS lizenziert. Es ist präzise genug für die Ansprüche der Konzepte. Damit ist insbesondere gemeint, dass die OpenStreetMap Netzwerke deutschlandweit auch Feldwege und nicht befahrbare Pfade enthalten, die Zugang zu Grünflächen ermöglichen.

Die nachfolgende Liste zeigt die genutzten Datenbestände:

- 500 x 500 Meter Zellen (INSPIRE-konform) innerhalb der Stadtgebiete Solingen und Düsseldorf
- Baublockdaten der Städte Leipzig und Potsdam mit demographischen Angaben
- Sentinel-2-basierte Landbedeckungsklassifikation 2015
- ALKIS-Grünflächen (Quelle: OpenNRW): Objektarten AX_Friedhof (41009), AX_Böschungfläche (61002), AX_Heide (43004), AX_SportFreizeitundErholung (41008), AX_Sumpf (43006), AX_Wald (43002), AX_Gehölz (43003), AX_Dammwaldteich (61003), AX_Landwirtschaft (43001), für einzelne Auswertungen Auswahl von Wertarten des Attributs „Funktion“ öffentlich zugänglicher Grünflächen⁴, siehe Bezirksregierung Köln 2019)

(4)

Dies betrifft die Wertarten 4410 Grünfläche und 4420 Park aus der Grundfunktion 4400 (G) Grünanlage

- ATKIS Basis-DLM 2018
- OpenStreetMap Straßennetz 2018, inkl. aller Feldwege und ohne Autobahnen („Fußwegenetz“)
- Zusatzinformationen, z. B. Öffnungszeiten von Parks (eigene Recherchen)
- Für Solingen und Düsseldorf: Soziale Schicht von Haushalten 2019 (Quelle: infas360, vgl. Anhang 10.5)

Eine Übersicht zum Vergleich der Flächenbilanzen zwischen dem Stadtgrünraster Deutschland und der amtlichen Grünflächendatenbasis aus ALKIS am Beispiel der Stadt Solingen können dem Anhang 10.4 entnommen werden. Des Weiteren wird ein Vergleich der Flächenbilanzen zwischen ATKIS und ALKIS für ausgewählte Städte demonstriert.

5.2.2 Ergebnisse für sozialräumliche Indikatoren

Forschungsleitend für diese Fragestellung zur Vertiefung der Stadtgrünversorgung aus der Nutzerperspektive sind die Handlungsempfehlungen des Weißbuchs Stadtgrün im Hinblick auf die Funktionen von Stadtgrün (BMUB 2017):

- **Sozialer Zusammenhalt**, kulturelle und bauhistorische Identität
- **Erholung und Bewegung, Gesundheitsförderung**
- Wohlbefinden und **Lebensqualität**, Aufwertung von Standorten
- Lagefaktor für Boden- und Immobilienwerte
- Grüne Infrastruktur für Frischluft und Kaltluftzufuhr
- Lärmdämpfend, **temperaturregulierend**, Regulierung des Wasserhaushalts
- **Biologische Vielfalt** und Naturerfahrungsraum

Im weiteren Verlauf erfolgten Schwerpunktsetzungen im Hinblick auf die in der Auflistung oben fett gedruckten Begriffe. Dafür wurden die in Kapitel 4.1 vorgestellten Indikatoren Grünraumversorgung, Grünerreichbarkeit, Grünraumvernetzung und Klimaaktive Flächen um folgende, der Tabelle 18 zu entnehmenden, Kennwerte ergänzt, deren pilothafte Umsetzungen nachfolgend beschrieben wird.

Tabelle 18
Ergänzung der Indikatoren um sozialräumliche Kennwerte

Indikator	Kennwert
Grünraumversorgung	Grünfläche pro Einwohner im definierten Einzugsgebiet
	Versorgungssituation bezogen auf quantitative Richtwerte
	Umweltgerechtigkeit: Verteilungsaspekte in der Grünversorgung
Grünerreichbarkeit	Fußläufige Erreichbarkeit von Grünflächen mit definierter Mindestgröße
	Grünflächenversorgung in Bezug zur Distanz zu den Wohnadressen der Bevölkerung
Grünraumvernetzung	Hexagon-Konnektivität
Klimaaktive Flächen	Vulnerabilität der Bevölkerung: Vulnerabilität von Altersklassen für Hitzestress

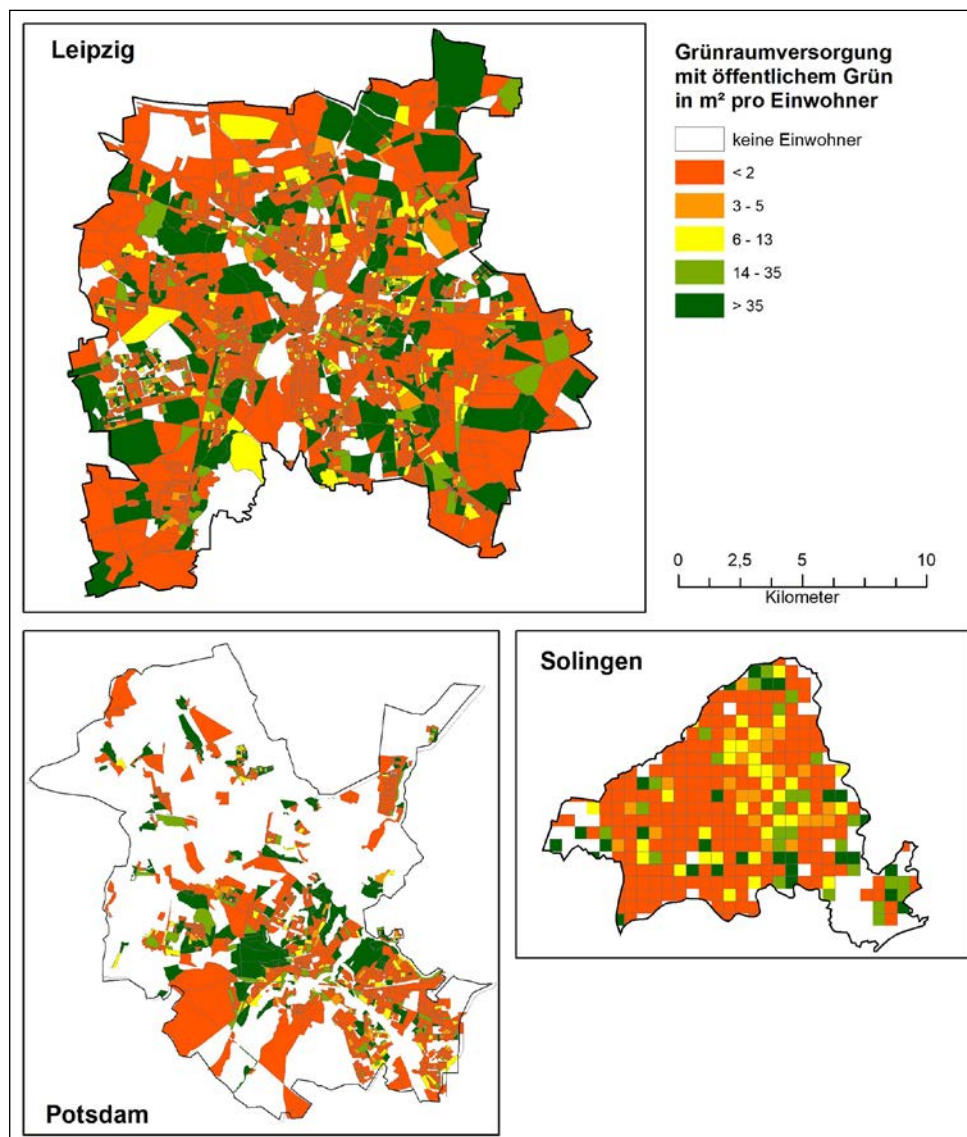
Quelle: ILS

Grünraumversorgung: Grünfläche pro Einwohner im definierten Einzugsgebiet

Die Grünraumversorgung kann mit der *Grünfläche pro Einwohner im definierten Einzugsgebiet* berechnet werden und bildet sich aus dem Quotienten der Gesamtfläche des Stadtgrüns und der Einwohnerzahl für ein definiertes Gebiet. Dieser Kennwert wurde bereits, bezogen auf das administrative Stadtgebiet als definiertes Einzugsgebiet, für eine bundesweite Berechnung vorgestellt. Nachfolgend sollen Berechnungsmöglichkeiten mit detaillierteren Daten aufgezeigt werden, welche eine kleinräumigere Analyse ermöglichen. Beispielhaft ist dies in den nachfolgenden Abbildungen für die Baublöcke in Potsdam und Leipzig sowie die 500-Meter-Zellebene in Solingen dargestellt. Um die sozialräumliche Perspektive auf die Grünraumversorgung adäquat analysieren zu können, wurden hier die Objektarten aus ALKIS für öffentlich zugängliches Grün genutzt. Konkret sind dies die Wertearten 4400 Grünanlage und 4420 Park für das Attribut „Funktion“ der Objektart 41008 AX_SportFreizeitUndErholungsfläche. Diese Auswahl hat zur Folge, dass die Analyse nicht öffentliche und nicht als Grünanlagen oder Parks ausgewiesene Flächen ausblendet.

Abbildung 46

Grünraumversorgung mit öffentlichen Grünanlagen und Parks in den Baublöcken von Potsdam und Leipzig bzw. 500 x 500 Meter Zellen in Solingen (Daten: Stadt Potsdam, Stadt Leipzig, Stadt Solingen, Geoportale der Länder Berlin, Brandenburg und Sachsen, OpenNRW)



Quelle: ILS

Abbildung 46 zeigt die Grünraumversorgung in einer vergleichbaren Farbgebung und im gleichen Maßstab der drei Städte. Deutlich wird, dass alle drei Städte zahlreiche Gebietseinheiten ohne öffentlich zugängliche Grünflächen oder Parks aufweisen. Trotz der Normierung des Indikators auf Einwohner dürfte hier ein Größeneffekt eine Rolle spielen: Je kleiner die Gebietseinheiten geschnitten sind (siehe die 500-Meter-Zellebene für Solingen), umso mehr Gebietseinheiten haben eine sehr geringe Grünraumversorgung. Dieses Ergebnis dürfte sich darin begründen, dass öffentlich zugängliche Grünanlagen und Parks sehr häufig nicht als kleinteilige Flächen je Baublock zur Verfügung stehen. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die öffentliche Grünraumversorgung sicherlich die Grünfunktionen weiterer Freiflächen berücksichtigt, die nicht als öffentliche Grünanlagen oder Parks im Kataster verzeichnet sind. So ist zum Beispiel für Außenbezirke davon auszugehen, dass umliegende Wiesen und Wälder die Funktion der Grünraumversorgung in Teilen ersetzen. Kritischer zu bewerten sind innerstädtische Stadtteile in roter und orangener Einfärbung mit Werten unter 6 m^2 pro Einwohner, in denen Grünversorgung nicht sichergestellt ist. Die Ausführungen für den Kennwert *Versorgungssituation bezogen auf quantitative Richtwerte* begründen diese Einschätzung durch die Bewertung von Ausstattungsstandards mit Stadtgrün im Sinne einer Defizitanalyse.

Grünraumversorgung: Versorgungssituation bezogen auf quantitative Richtwerte

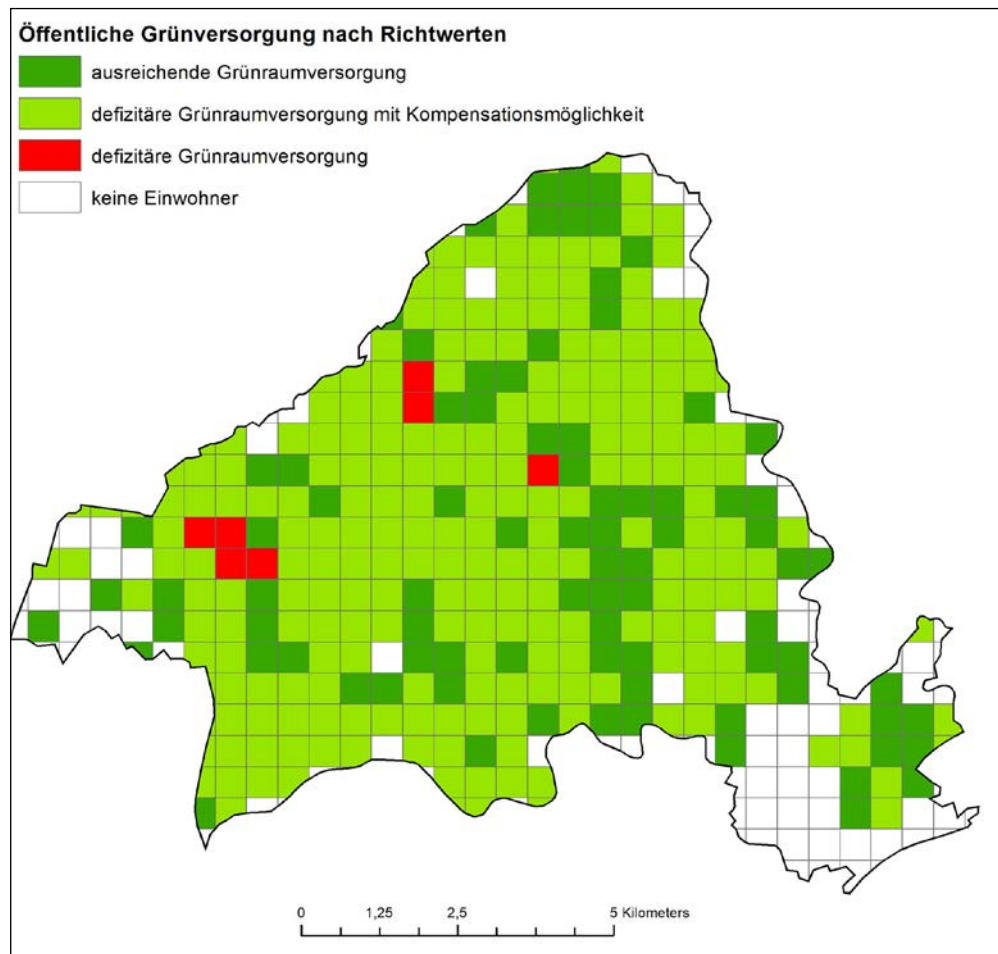
Der nachfolgend operationalisierte Kennwert der Grünraumversorgung ermittelt und bewertet auf der Grundlage städtebaulicher Orientierungswerte oder stadtspezifischer quantitativer Richtwerte die aktuelle Versorgungssituation. Er steht somit für die oben genannte Defizitanalyse der Grünraumversorgung. Rechen-technisch handelt es sich um einen Vergleich des Quotienten aus der Gesamtfläche des Stadtgrüns einer Untersuchungseinheit und der Einwohnerzahl mit Richtwerten. Die hier gezeigte Defizitanalyse orientiert sich an einem Wert von 6 m^2 pro Einwohner. Dies entspricht den städtebaulichen Richtwerten der Gartenamtsleiterkonferenz (GALK) von 1973 für die Grünraumversorgung im Wohnquartier und den in der Praxis bis heute vielfach genutzten Orientierungswerten (Bundesinstitut für Bau, Stadt- und Raumforschung 2018: 111).

Die GALK-Orientierungswerte schränken weiterhin ein, dass die Grünraumversorgung von 6 m^2 pro Einwohner Flächengrößen von mindestens $0,5 \text{ ha}$ mit einer fußläufigen Erreichbarkeit von 500 m umfassen sollte. Durch die Auswahl entsprechender Flächengrößen und die Segmentierung der Fallstudienstadt Solingen in 500-m -Zellen können diese Vorgaben annähernd berücksichtigt werden. Die Defizitanalyse kann somit räumlich aufzeigen, wo Handlungsbedarf für eine adäquate Versorgung der Bevölkerung mit Erholungsressourcen, aber auch für ökologische Zielsetzungen der Durchgrünung von Städten für mehr Klimaresilienz, Biodiversität und Infiltrationsvermögen von Oberflächen besteht.

Abbildung 47 für Solingen zeigt in Rot die Zellen, in denen der Grünflächenanteil pro Einwohner unter 6 m^2 liegt. Damit sind kritische Defizite der Grünraumversorgung räumlich identifiziert. Die dunkelgrün eingefärbten Zellen dagegen haben eine Grünraumversorgung über 6 m^2 pro Einwohner. Die hellgrün markierten Zellen liegen in der Betrachtung öffentlich zugänglicher Grünflächen der Art Grünanlage und Park (siehe oben) ebenfalls unterhalb von 6 m^2 pro Einwohner, sind somit also in der Auslegung der Richtwerte zunächst defizitär zu bezeichnen. Hier finden sich jedoch weitere Grünressourcen und Freiflächen wie Wälder. Inwiefern diese öffentlich zugänglich sind, kann im Rahmen dieser Analyse nicht beantwortet werden.

Abbildung 47

Grünraumversorgung und Defizitanalyse in Solingen (Daten: OpenStreetMap, Stadt Solingen, OpenNRW)



Quelle: ILS

Grünraumversorgung: Umweltgerechtigkeit

Das Thema der Umweltgerechtigkeit beschreibt den Zusammenhang zwischen sozialer Lage und der lokalen Lebensumwelt auf der einen Seite, sowie den individuellen Voraussetzungen für eine gesunde Lebensführung auf der anderen Seite (Bolte et al. 2012; Baumgart et al. 2018). Mit dem Fokus auf das Fehlen der Umweltressource „Stadtgrün“ nach sozialer Schicht wird ein ausgewählter Bereich des insgesamt sehr vielschichtigen Themas der Umweltgerechtigkeit durch folgende zwei Auswertungen beschrieben:

- Auswertung Grünanteile in Wegedistanz von 2.000 Metern um Wohnadresse nach sozialer Schicht am Beispiel der Stadt Solingen
- Auswertung verschiedener Grünkulissen in 500-m-Wegedistanz um Wohnadresse nach sozialer Schicht im Zeitvergleich am Beispiel der Stadt Düsseldorf

In einer ersten Umsetzung für die Stadt Solingen wurden hierfür die Grünanteile in den 2.000-m-Isochronen der Wohnadressen ermittelt, für die auch die Variable der sozialen Schicht vorliegt (siehe Ausschnitt für eine Wohnadresse in Abbildung 48). Die Auswertung in Abbildung 49 zeigt, dass rangniedrige soziale Schichten tendenziell weniger Stadtgrün zur Verfügung haben als ranghöhere Gruppen.

Abbildung 48

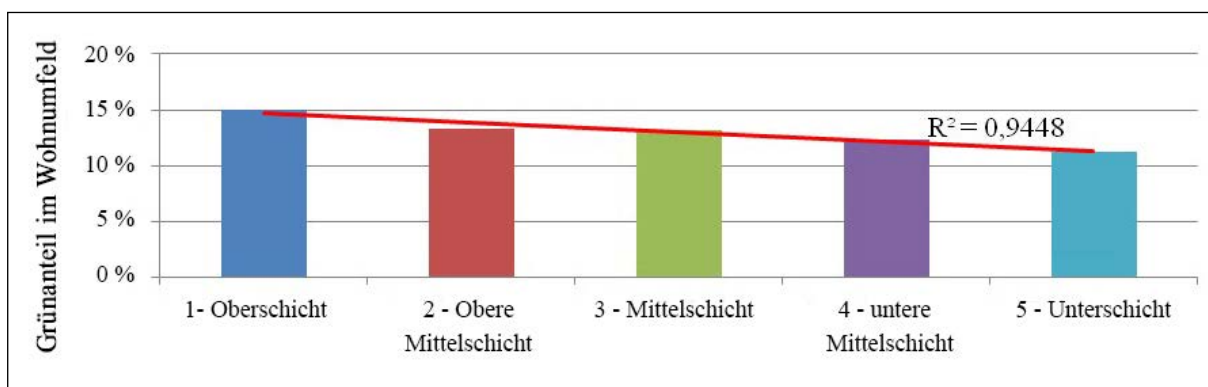
2000-Meter-Isochrone für eine Wohnadresse in Solingen (Daten: OpenStreetMap, infas360, OpenNRW)



Quelle: ILS

Abbildung 49

Auswertung der Stadtgrünversorgung im Wohnumfeld (2.000 Meter Wegedistanz) nach sozialer Schicht (Daten: infas360, OpenStreetMap, OpenNRW)

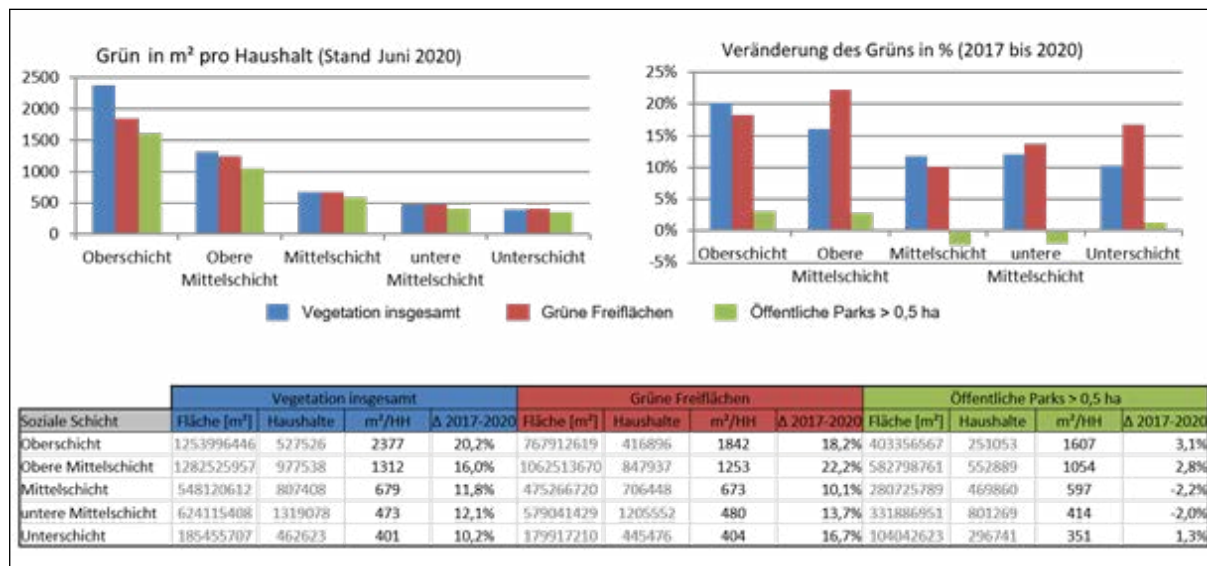


Quelle: ILS

In einer zweiten Auswertung wurde für die Stadt Düsseldorf eine weitere Analyse im Nahumfeld von 500 Metern durchgeführt. Düsseldorf wurde für diese Analyse deshalb ausgewählt, da hier aufgrund der Datenlage die Stadtgrünversorgung im Zeitverlauf zwischen 2017 und 2020 analysiert werden konnte. Zudem wurden die Stadtgrünkulissen hier ausgeweitet, d. h. neben den öffentlichen zugänglichen Grünanlagen und Parks wurde auch für Gebietskulissen der Vegetation insgesamt (inkl. Landwirtschaft) und Grüne Freiflächen (ohne Landwirtschaft) bilanziert. Die Auswertung zeigt, dass in Solingen die Ungleichverteilung der Stadtgrünversorgung über die sozialen Klassen im Nahumfeld von 500 Metern Wegedistanz sehr viel stärker zu Buche schlägt als im erweiterten Wohnumfeld von 2.000 Metern (linkes Balkendiagramm). Weiterhin fällt auf, dass 2020 weniger öffentliche Parks und Grünanlagen für die Mittelschicht und untere Mittelschicht zur Verfügung standen als noch 2017 (siehe rechtes Balkendiagramm und Tabelle in Abbildung 50).

Abbildung 50

Stadtgrünversorgung nach sozialer Schicht in Düsseldorf (Daten: infas360, OpenStreetMap, OpenNRW)



Quelle: ILS

Grünerreichbarkeit: fußläufige Erreichbarkeit von Grünflächen

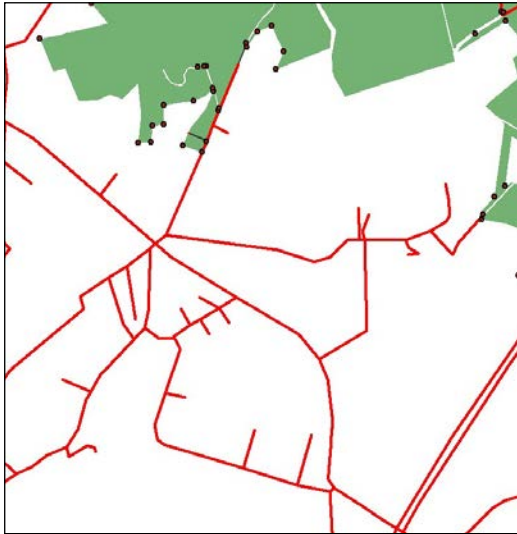
Bei der Erreichbarkeit von Grünflächen stellt sich neben der Frage der anzusetzenden Mindestgröße auch die nach geeigneten Zugangspunkten zum Grün. Hier wurde der Ansatz verfolgt, den Zugang zu allen Grünflächen über den nächstgelegenen Straßenendpunkt (inkl. Feldwege und Pfade) zum Perimeter einer Grünfläche zu definieren. Die Straßenendpunkte wurden hierfür dem oben beschriebenen OpenStreetMap-Netzwerk entnommen sowie die Stützpunkte der Umringe der ausgewählten Grünfläche (hier: Mindestgröße von 500 m²) extrahiert. Als Gebietskulisse des Stadtgrüns dienen alle öffentlichen Grünanlagen (Grünfläche und Park, s. o.) sowie Gehölz und Wald aus ALKIS.

Um die Datenmenge vorab zu reduzieren, wurden die Polygone der Grünflächen zunächst auf Stützpunkt-Abstände von mindestens 10 m generalisiert. Für die nachfolgende Netzwerkanalyse wurden anschließend die verbleibenden Punkte mit einem Abstand von max. 50 m vom Straßennetzwerk selektiert. Abbildung 51 zeigt die verbleibenden möglichen Zugangspunkte, die für das nachfolgende Routing von Zellzentroiden zur nächstgelegenen Grünfläche genutzt werden. In dem nachfolgend beschriebenen Algorithmus der Routenermittlung wird aus der verbliebenen Anzahl möglicher Zugangspunkte derjenige mit dem kürzesten Abstand zum Straßenendpunkt ermittelt.

Die Routenermittlung erfolgt mit einer Quelle-Ziel-Matrix aus dem Werkzeugportfolio des ArcGIS Network-Analyst. Als Schwellenwert wird eine maximale Fußwegedistanz von 2.000 m angesetzt, entsprechend vorliegenden Forschungen zur fußläufigen Erreichbarkeit (Walkability Index, Walkscore, vgl. Reyer et al. 2014).

Abbildung 51

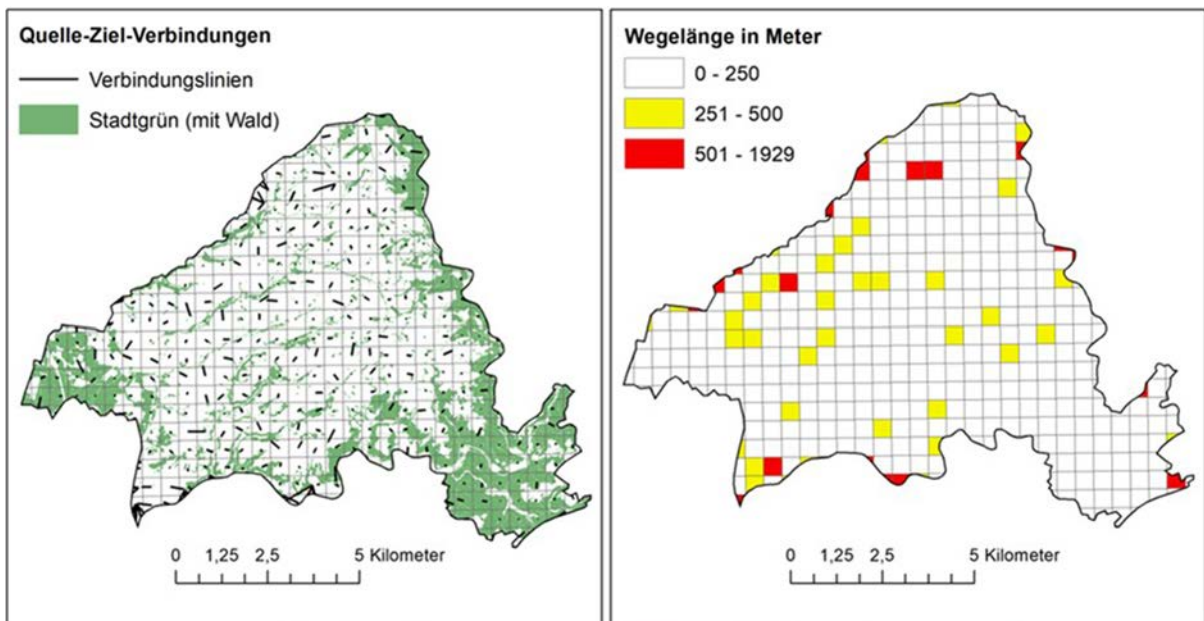
Modellierte Zugangspunkte zu Parkflächen in Solingen (Daten: OpenStreetMap, OpenNRW)



Quelle: ILS

Abbildung 52

Grünerreichbarkeit in Solingen: Ermittlung kürzester Distanzen zur nächstgelegenen Grünflächen (links) und Bewertung auf der Ebene von 500 x 500 Meter Zellen (rechts) (Daten: infas360, OpenStreetMap, Stadt Solingen, OpenNRW)



Visualisierung von Quelle-Ziel-Matrizen für Zellzentroide und Zugangspunkte von Grünflächen (links) und Kategorisierung von Zellen nach Wegedistanz zum nächstgelegenen Zugangspunkt einer Grünfläche (rechts)

Quelle: ILS

Für die Interpretation der Ergebnisse in Abbildung 52 ist zu berücksichtigen, dass der gewählte Berechnungsweg aufgrund der Wahl des Zellzentroids eine Generalisierung des Startpunkts für die Gehwegermittlung bedeutet (siehe Abbildung 52 links). Dieser Punkt könnte in einer 500-Meter-Zelle auch am Rand liegen, so dass eine Toleranz von einigen Hundert Metern bei der Interpretation in Betracht gezogen werden muss. Entsprechend stellt die Darstellung in Abbildung 53 rechts eine generalisierte Annäherung dar. Die rot markierten Zellen kennzeichnen Bereiche, in denen der Zugang zu Grünflächen vergleichsweise schwieriger ist als in den gelb markierten Zellen. Nicht eingefärbte Zellen zeigen Wohnlagen, in denen die Grünerreichbarkeit für die Einwohner theoretisch sehr gut ist.

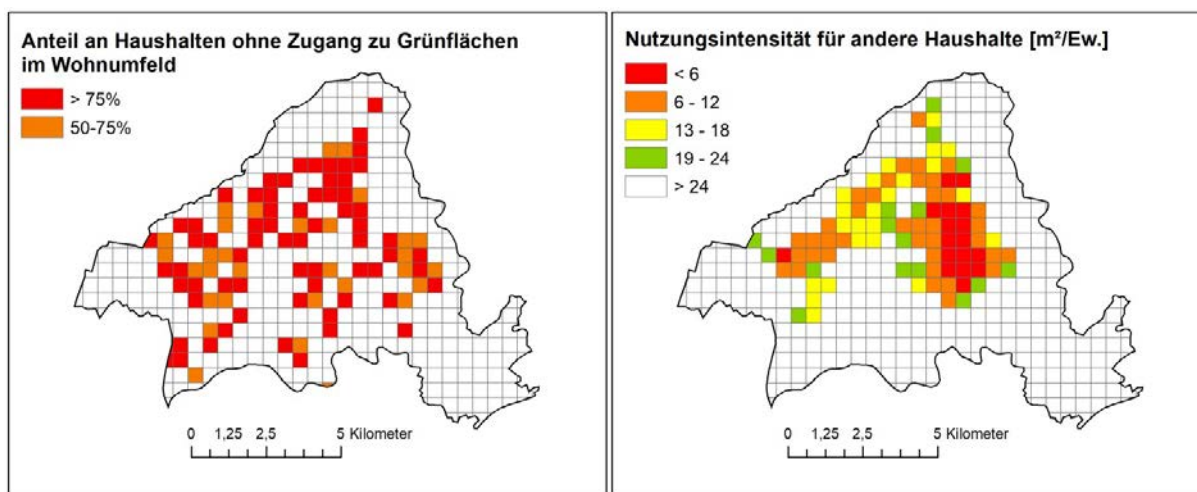
Grünerreichbarkeit: Grünflächenversorgung in Bezug zur Distanz zu den Wohnadressen der Bevölkerung

Dieser Kennwert der Grünerreichbarkeit zielt darauf ab, die Grünflächenversorgung in Bezug zur Distanz zu den Wohnadressen der Bevölkerung zu analysieren. Zum Einsatz kommen wiederum die GALK-Orientierungswerte, die eine Erreichbarkeit von mindestens 0,5 ha großen Grünflächen innerhalb von 500 m für das unmittelbare Wohnumfeld (= Wohnquartier) für angemessen halten, sowie eine Erreichbarkeit größerer Grünflächen von mindestens 10 ha („Stadtteilpark“) für einen Stadtteil (Bundesinstitut für Bau, Stadt- und Raumforschung 2018: 111). Die Definition von Stadtteil wird in der Quelle nicht weiter spezifiziert, so dass von einer gängigen kommunalstatistischen Definition ausgegangen werden muss, d. h. der Abgrenzung, die Städte selbst vornehmen. Entsprechende Richtwerte werden beispielsweise von der Stadt Frankfurt am Main in der Grünflächenplanung angewendet (ebd. „Steckbrief Frankfurt am Main“).

Die folgende Analyse überprüft die Situation in Solingen anhand dieser Orientierungswerte. Zum Einsatz kommen Netzwerkanalysen mit den angegebenen Wegenetzdaten aus OpenStreetMap sowie die Wohnadressen von infas 360 (vgl. Richter et al. 2016). Die Gebietskulisse des Stadtgrüns entspricht der angegebenen Auswahl an ALKIS-Objekten für Grünanlagen (Grünflächen und Parks), Gehölz und Wald. Flächen kleiner 0,5 ha wurden für die Analyse der Richtwerte für Wohnquartiere entfernt. Entsprechend wurden auch für die Analyse der Richtwerte für Stadtteile, Flächen kleiner 10 ha entfernt. Die verbleibenden Flächen wurden mit Luftbildabgleichen und Internetrecherchen zudem auf ihre Validität hin überprüft. Dabei wurde festgestellt, dass die Stadt Solingen keinen öffentlichen Park größer 10 ha ohne Zugangsbeschränkungen hat (siehe Anhang 10.6), so dass auf diesen Analysepfad verzichtet werden musste.

Abbildung 53

Grünerreichbarkeit für Haushalte im Wohnumfeld (links) und verbleibende Kapazität pro Einwohner (rechts) (Daten: infas360, OpenStreetMap, OpenNRW)



Quelle: ILS

Abbildung 53 zeigt im Ergebnis der Umsetzung für die Wohnquartiere in Solingen, dass zahlreiche Wohnstandorte keinen Zugang zu Grünflächen größer 0,5 ha in 500 m Wegedistanz haben. In den rot eingefärbten Zellen der Karte links in Abbildung 54 sind dies über 75 % der Haushalte, in den orange eingefärbten Zellen 50–75 %. Die Karte rechts in Abbildung 54 zeigt, dass die verbleibenden Wohnstandorte, die Zugang zu einer Grünflächen größer 0,5 ha in 500 m Wegedistanz haben, sich diese vielfach teilen müssen, es kommt zu Übernutzung und Kapazitätsengpässen. Setzt man auch hier die oben genannten Richtwerte von 6 m² pro Einwohner an, so können die rot eingefärbten Zellen als unterversorgt betrachtet werden.

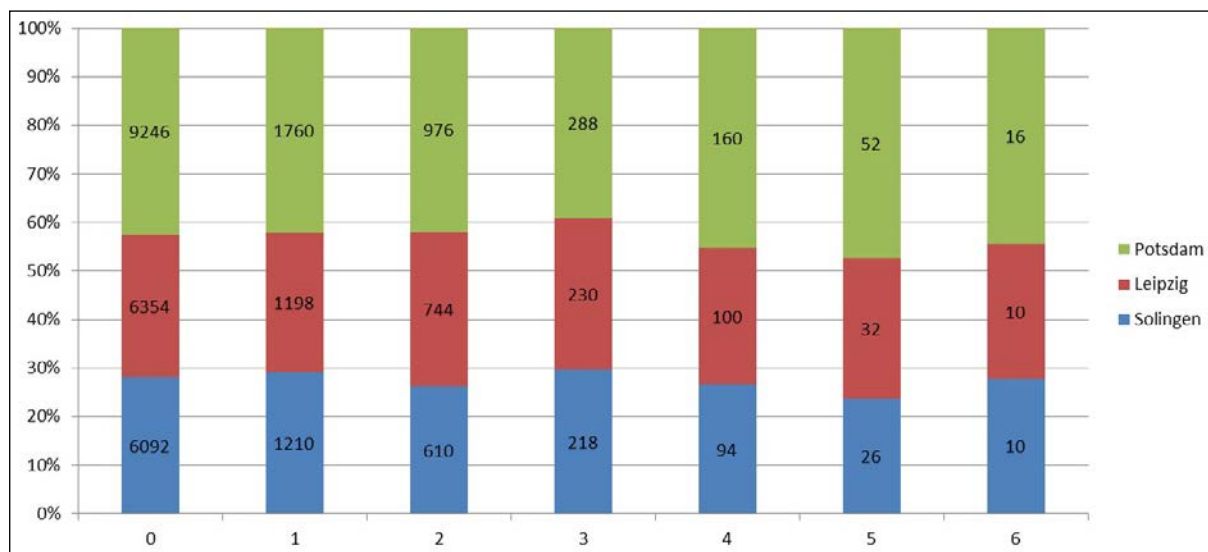
Grünraumvernetzung: Hexagon-Konnektivität

Der Kennwert Hexagon-Konnektivität identifiziert zunächst für ein Untersuchungsgebiet, das mit Hexagonen einer anzugebenden Mindestfläche segmentiert wird, Hexagone mit der dominanten Flächennutzung „Stadtgrün“ (mindestens 50 % der Hexagonfläche). Anschließend wird die Anzahl der Nachbarhexagone ermittelt, die ebenfalls als dominierend grün klassifiziert wurden (Methode: koinzidente Stützpunkte, maximal sechs Nachbarn) und als Attribut des Hexagons gespeichert. Eine hohe Anzahl von identifizierten grünen Nachbarhexagonen wird im Sinne einer guten Vernetzung von Grünflächen interpretiert. Der Mittelwert aller Hexagone einer Stadt liefert einen Vergleichswert für die Grünraumkonnektivität zwischen Städten (Rusche et al. 2019).

Für diese Umsetzung wurde die Gebietskulisse für das Stadtgrün dem Stadtgrünraster Deutschland entnommen, in der Annahme, dass eine Unterscheidung für die Aussagezielrichtung dieses Indikators („Vernetzung von Grünflächen“) nicht zwingend zwischen öffentlichen und privaten Grünflächen unterscheiden muss. Es wird davon ausgegangen, dass das Resultat im Hinblick auf Biodiversität und Lebensräume für den Artenschutz und Austausch von Populationen über ökologische Habitate genutzt wird, und privates Stadtgrün hierfür „durchlässig“ ist.

Abbildung 54 zeigt die Ergebnisse für die Fallstudienstädte Potsdam, Solingen und Leipzig mit einer Hexagon-Größe von einem Hektar. Die Anzahl der verbundenen Hexagone pro Zelle wird als Kategorie auf der X-Achse den jeweils auftretenden Häufigkeiten der Hexagonverbindungen in den Säulensegmenten gegenübergestellt. Die Beschriftungen geben die Anzahl der Hexagone an, die in jedem Segment vorkommen. Deutlich wird, dass die Stadt Potsdam deutlich durchgrünter ist als Solingen und Leipzig, die Anteile in den besser verbundenen Hexagonen sind deutlich höher. Leipzig und Solingen haben sehr ähnliche Anteilswerte, die Ursachen hierfür könnten allerdings auch topographisch begründet sein. In der sehr hügeligen Topographie Solingens werden Grünflächen an Hängen in der Flächensicht unterschätzt. Für eine Großstadt wie Leipzig könnte wiederum die höhere Siedlungsdichte und -fläche die geringeren Werte begründen. Davon unbenommen zeigt der Kennwert die Durchgrünung aber durchaus schlüssig an. Interessant werden derartige Auswertungen im Zeitverlauf, wenn die Werte für eine Stadt im Längsschnitt analysiert werden können.

Abbildung 54
Hexagon Konnektivität im Vergleich zwischen Potsdam, Leipzig und Solingen
(Daten: Sentinel-2-Landbedeckungsklassifikation)

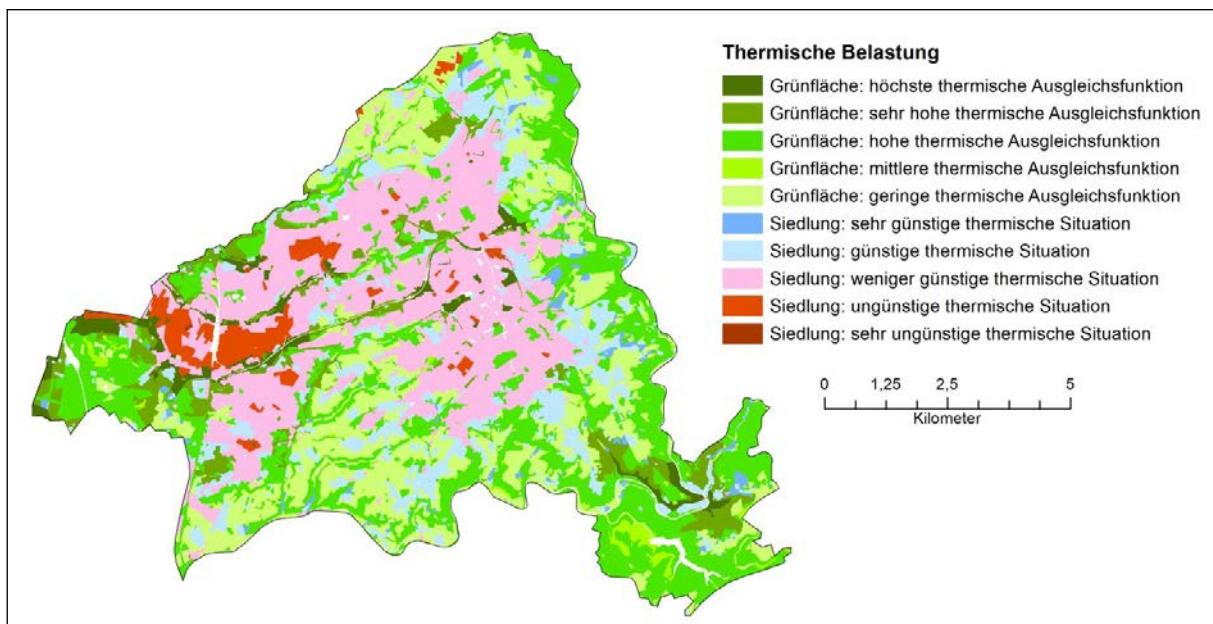


Quelle: ILS

Klimaaktive Flächen: Vulnerabilität der Bevölkerung

Die Konzeption des Kennwertes Vulnerabilität bezieht sich hier am Beispiel der Stadt Solingen auf die Vulnerabilität von Bevölkerungsgruppen gegenüber Hitzestress, einem durch den Klimawandel in urbanen Gebieten zukünftig immer relevanter werdendem Risiko für die Gesundheit insbesondere älterer Menschen und kleiner Kinder. Für die Umsetzung eines Kennwertes wurde zunächst die thermische Belastung aus einem Datensatz des Landesamtes für Umwelt, Natur und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) aus dem Open-Da-ta-Portal Open.NRW beschafft und für die 500-m-Zellebene in Solingen aufbereitet (siehe Abbildung 55). Die besonders hohen thermischen Belastungen wurden in einem zweiten Schritt mit hohen Konzentrationen vul-nerabler Bevölkerungsgruppen überlagert und räumliche Koinzidenzen identifiziert.

Abbildung 55
Bewertung der Grünausstattung nach thermischer Ausgleichsfunktion



Quelle: LANUV 2020

Tabelle 19
Fachliche Bewertung der thermischen Belastungsklassen in Abbildung 20

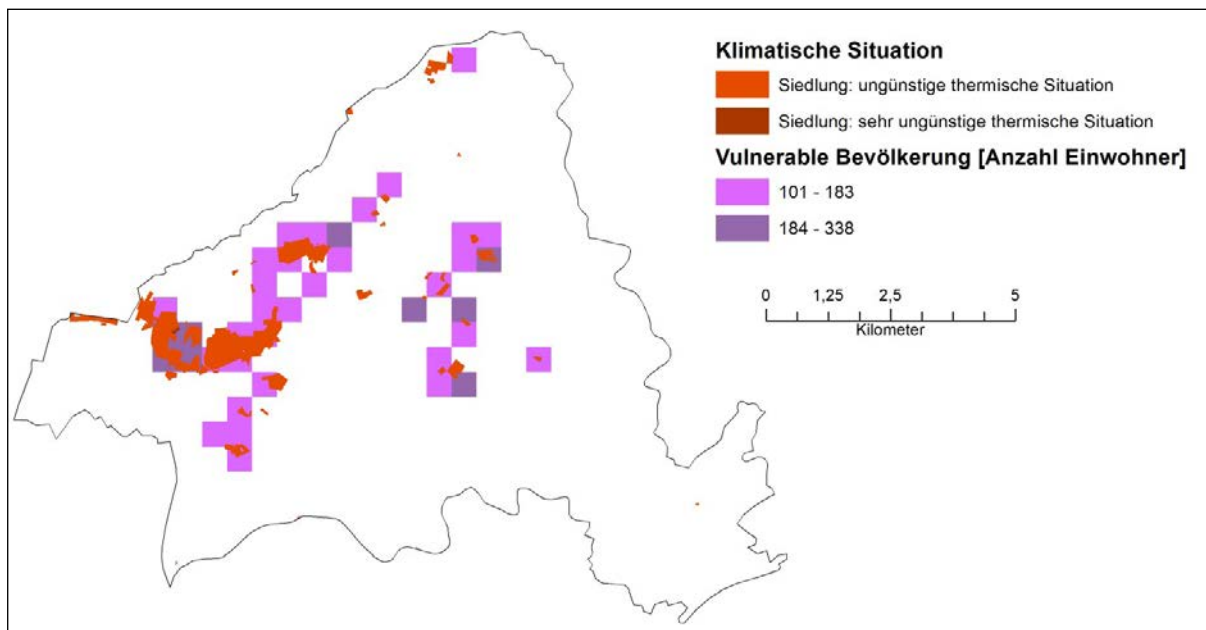
Thermische Situation	Planungshinweise
Sehr ungünstig	Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig und prioritär . Sie sollten sich sowohl auf die Tag- als auch auf die Nachtsituation auswirken. Es sollte keine weitere Verdichtung (insb. zu Lasten von Grün- und Freiflächen) erfolgen, stattdessen der Erhalt der Freiflächen und eine Verbesserung der Durchlüftung sowie eine Erhöhung des Vegetationsanteils bzw. Entsiegelungsmaßnahmen angestrebt werden.
Ungünstig	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation sind notwendig. Nachverdichtungen sollten nicht zu einer Verschlechterung auf der Fläche selbst bzw. angrenzenden Flächen führen („Entkopplung“) und eine Verbesserung der Durchlüftung sowie eine Erhöhung des Vegetationsanteils sollte angestrebt werden.

Quelle: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) 2020

Abbildung 56 zeigt eine Überlagerung dieses Layers mit ausgewählten Bevölkerungskonzentrationen vulnerabler Bevölkerungsgruppen für Solingen. Zur Verfügung stehen im ILS Kommunalpanel die Altersgruppen unter sechs Jahren und über 80 Jahren. Die räumliche Koinzidenz verweist auf Handlungsbedarf im Hinblick auf hitzedämpfende Maßnahmen im öffentlichen Raum sowie im Wohnraum der vulnerablen Personen, zum Beispiel durch Flächenentsiegelung, Erhöhung des Grünvolumens, Abschattung, Durchlüftung, Fassadenbegrünung usw. (vgl. Tabelle 19).

Abbildung 56

Qualifizierte Inputs der Grünausstattung z. B. im Hinblick auf Hitze



Quelle: LANUV 2020, Stadt Solingen

6 Monitoring des Stadtgrüns

6.1 Ansätze zur Change Detection

Eine zentrale Anwendung in der Fernerkundung ist die Detektion von Veränderungen in der Landbedeckung. Um Veränderung der urbanen Grünausstattung in Deutschland zu untersuchen, wurden die Sentinel-2-basierten Landbedeckungsklassifikationen (Stadtgrünraster) der vorliegenden Zeitschnitte 2015 und 2018 ausführlich analysiert.

Veränderungen können natürlichen oder anthropogenen Ursprungs sein, für deren Detektion in der Literatur unterschiedliche Ansätze aufgezeigt werden. Hinsichtlich der räumlichen Domäne werden zwischen pixelbasierten Veränderungsanalysen und objektbasierten Ansätzen unterschieden. Bei zu vergleichendem Informationsgehalt können Reflektanzen bzw. Grauwerte oder auch generierte Indizes zwischen verschiedenen Szenen verglichen werden. Ein Vergleich der semantischen Klassifikation kann über eine Postklassifikationsanalyse untersucht werden.

Landsat-Satellitenbilder werden bereits seit Jahrzehnten für das Detektieren verschiedener Landbedeckungsveränderungen verwendet (Zhu/Woodcock 2014; Niemeyer/Canti 2002). Sentinel-2 stellt seit Mitte 2015 Satellitenaufnahmen bereit. Im Vergleich zu Landsat-Daten zeichnen sich Sentinel-2-Aufnahmen durch die höhere räumliche Auflösung (10 m) und kurze Überflugsintervalle (fünf Tage seit 2017) aus. Dies erhöht die Wahrscheinlichkeit, kurzfristige Änderungen auf der Erdoberfläche zu erfassen, wie es beispielsweise vor allem im Kontext von Naturereignissen (z. B. Windwurf, Stürme) von großer Relevanz ist. Ebenfalls bedingt durch die kurze Wiederholrate erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, Szenen ohne starke atmosphärische Einflüsse zu erhalten.

Mit der Verwendung multispektraler Satellitendaten können verschiedene Methoden für eine Veränderungsanalyse angewendet werden. Leichtle et al. (2017) berechnet eine unüberwachte Veränderungsanalyse anhand Objektbildung, basierend auf sehr hoch aufgelösten Daten in urbanen Gebieten. Ein anderer Ansatz beschäftigt sich mit einer pixelbasierten Veränderungsanalyse in Stadtrandgebieten (Quarmby/Cushnie 1989), und Gordon (1980) oder auch Serra et al. (2010) detektieren die Veränderung der Landoberfläche mit einer Post-Klassifikation. Eine Übersicht dieser unterschiedlichen Methoden stellt Hussain et al. (2013) oder Johansen et al. (2010) in Studien dar. Die Tabelle 20 zeigt eine Auswahl dieses Vergleichs.

Die folgenden Abbildungen zeigen mehrere Beispiele für sich ändernde sowie gleichbleibende Gebiete in Deutschland. Abbildung 57 zeigt ein Waldgebiet südlich von München. In beiden Klassifikationen (a, b) und auch in den Sentinel-2-Bildern (c, d) können keine großen Änderungen erkannt werden. Die Struktur des Forstgebietes bleibt in beiden Zeitschnitten erhalten. Auch die Unterteilung zwischen Laub- und Nadelwald bleibt gleich, was auf die Stabilität des Klassifikators zurückzuführen ist. Die verwendeten Satellitendaten unterscheiden sich in ihren Aufnahmebedingungen bzw. ihrem visuellen Erscheinungsbild aufgrund externer Einflüsse wie Sonne, Helligkeit, Wasserdampf in der Atmosphäre oder phänologische Ausprägungen durchaus stark voneinander. Der Klassifikator ist aber robust genug, um die Bilder trotzdem richtig zu klassifizieren. Dies ist durch die Bildung des Medianmosaiks am Anfang des Klassifikationsprozesses möglich. Dabei wurde eine Vielzahl von Satellitenszenen aus dem ganzen Jahresverlauf berücksichtigt, sodass sich der Einfluss einzelner Szenen reduziert.

Tabelle 20
Methoden zur Veränderungsanalyse

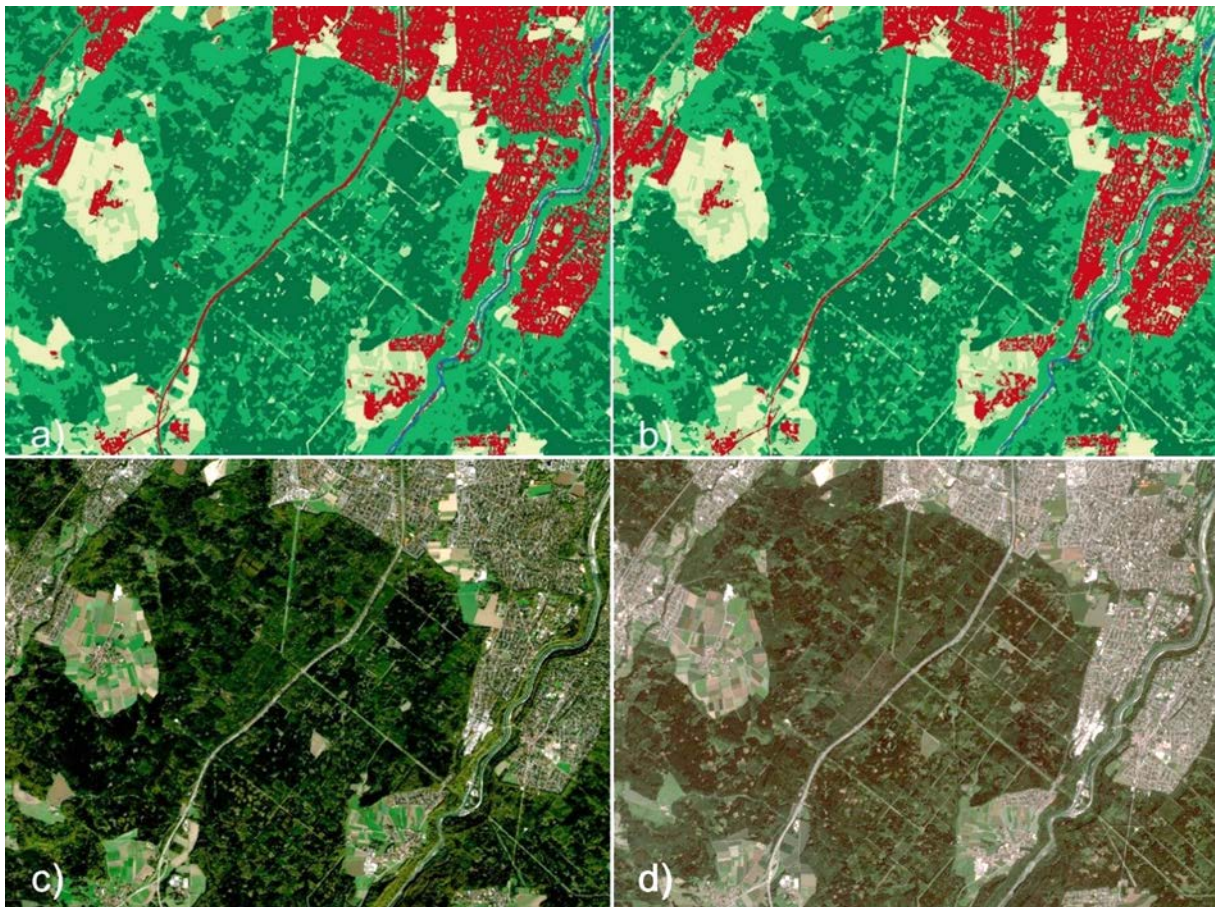
Methoden	Ansatz	Vorteile	Grenzen
Direkter Pixelvergleich	Image Differencing	<ul style="list-style-type: none"> – Einfacher Ansatz – Ergebnisse leicht zu interpretieren 	<ul style="list-style-type: none"> – Differenzwert ist absolut, der gleiche Wert kann je nach Anfangsklasse eine andere Bedeutung haben – Binär (Veränderung/keine Veränderung) – Bei Klassifikationsprodukten kann es zu künstlicher Änderung kommen
Veränderung zwischen Klassifikationen	Vergleich von Klassifikationsprodukten	<ul style="list-style-type: none"> – Verringerung der Auswirkungen auf Atmosphäre, Sensoren und Umwelt – Minimiert auch den Einfluss von Multi-Sensor-Bildern 	<ul style="list-style-type: none"> – Genauigkeit und Vollständigkeit erfordern vollständigen, konsistenten Trainingsdatensatz – Die endgültige Genauigkeit ist abhängig von der Klassifikationsgenauigkeit des Einzelbildes
Direkter Objektvergleich	Extraktion von Objekten aus einem Bild + Zuweisung von diesen Objekten im anderen Bild	<ul style="list-style-type: none"> – Einfacher Vergleich von Objekten – Leichte Implementierung – Bildobjekte haben zu zwei Zeitpunkten dieselben geom. Eigenschaften – Änderung geometrischer Eigenschaften (Formparameter d.h. Rand, Länge, Größe) – Änderung durch spektrale oder extrahierte Merkmale (Textur) 	<ul style="list-style-type: none"> – Abhängig von der Genauigkeit von der Segmentierung – Keine "von-bis"-Veränderungen – Schwierigkeit, räumlich übereinstimmende Objekte zu extrahieren bei multitemporalen Bildern – Geeignete Schwellenwertauswahl beim Vergleich von Objekten basierend sowohl auf der Geometrie und spektralen Merkmalen – Hoher Rechenaufwand bei großen Untersuchungsgebieten
Vergleich zwischen Objektklassifizierung	Separate Erstellung zweier Objektklassifikationen + Vergleich	<ul style="list-style-type: none"> – Alle verfügbaren Objekte könnten für objektbasierte Änderungserkennung genutzt werden – Thematische, geometrische und topologische Änderungsanalyse – Änderung basierend auf dem Klassifikationsvergleich 	<ul style="list-style-type: none"> – Aufgrund der Segmentierung können Unterschiede in Größe und Zugehörigkeit der Bildobjekte entstehen – Möglichkeit der Detektion falscher Änderungen durch Standortfehler der Objekte – Abhängig von der Genauigkeit von der Segmentierung – Die Klassifizierungsgenauigkeit beeinflusst die Genauigkeit der Veränderungsanalyse – Hoher Rechenaufwand bei großen Untersuchungsgebieten

Quelle: Hussain et al. 2013; Johansen et al. 2010

Nordöstlich von München befindet sich der Ismaninger Speichersee (Abbildung 58), welcher nur in sehr geringem Maß natürlichem Wandel unterlegen ist. Dies spiegelt sich in den Klassifikationen (a, b) und auch den Sentinel-2-Bildern (c, d) wider. Im südlichen Seebereich befinden sich 30 gleichartige, sehr kleine Fischteiche, zwischen welchen sich auch sehr schmale Grünstreifen befinden, die sich je nach Wasserstand und Trockenheit etc. mehr oder weniger ausbreiten können. Diese Unterschiede können sowohl in den Klassifikationen als auch in den Sentinel-2-Szenen beobachtet werden, was für einen sehr hohen Detailgrad der Klassifikationsprodukte spricht.

Abbildung 57

Forstenrieder Park in München; a) Klassifikation 2015, b) Klassifikation 2018, c) Sentinel-2-Aufnahme 2017, d) Sentinel-2-Aufnahme 2018



Quelle: DLR

Bei den landwirtschaftlichen Flächen um den See können in den Sentinel-2-Szenen Unterschiede in Ackerland und Grünlandfläche erkannt werden. Dies ist auf verschiedene Aufnahmezeitpunkte zurückzuführen, in welchen aufgrund unterschiedlicher phänologischer Stadien sich die Bedingungen für die Klassifikationen geändert haben. Die Szene c) wurde im Herbst aufgenommen und die Szene d) im Sommer, was die großen Unterschiede erklären kann. Auch die Farbe des Sees variiert in den beiden Aufnahmen stark. In den Klassifikationen bleiben die Bereiche für Ackerland und Wasser jedoch trotz dieser externen Unterschiede sehr ähnlich, was wiederum ein Indikator für die Stabilität des maschinellen Lernverfahrens für die Klassifikation ist. Dadurch war es möglich, landwirtschaftliche Flächen zuverlässig zu klassifizieren. Bildet man eine Klassifikation nur auf Basis einer Satellitenszene, wirkt sich die vorhandene Phänologie sehr viel stärker aus. Phänologisch bedingte Einflüsse auf die Klassifikationsergebnisse werden durch die Bildung des Medianmosaiks reduziert.

Ziel der Veränderungsanalyse ist, inmitten der sich, bezogen auf kurze Zeiträume und große Flächen insgesamt eher unveränderten Gesamtsituation, die gewandelten Bereiche zu identifizieren.

Abbildung 59 stellt ein Waldgebiet in der Nähe des Heiligensees in Berlin dar. Insgesamt hat sich dieses Gebiet zwar nicht stark verändert, aber ein Areal im Norden wurde abgeholzt. Diese Veränderung kann in der Klassifikation (b) sowie der Satellitenszene (d) leicht identifiziert werden. Außerdem ist in der gekennzeichneten Fläche im Süden zunächst eine Baustelle sichtbar, die sich zur Klasse *Bebaut* verändert hat.

Abbildung 58

Ismaninger Speichersee München; a) Klassifikation 2015, b) Klassifikation 2018, c) Sentinel-2-Aufnahme 2017, d) Sentinel-2-Aufnahme 2018



Quelle: DLR

Besonders in urbanen Gebieten gibt es einen stetigen Wandel. Abbildung 60 zeigt die Veränderung einer Baustelle im Westen Münchens. Auf dem Gebiet von Freiham entsteht auf etwa 350 ha ein neuer Stadtteil. In den Bildern ist das dadurch zu erkennen, dass die zugewiesenen Klassen von offenem Boden zu mehr bebauter Fläche im Jahr 2018 (b) verändert wurden.

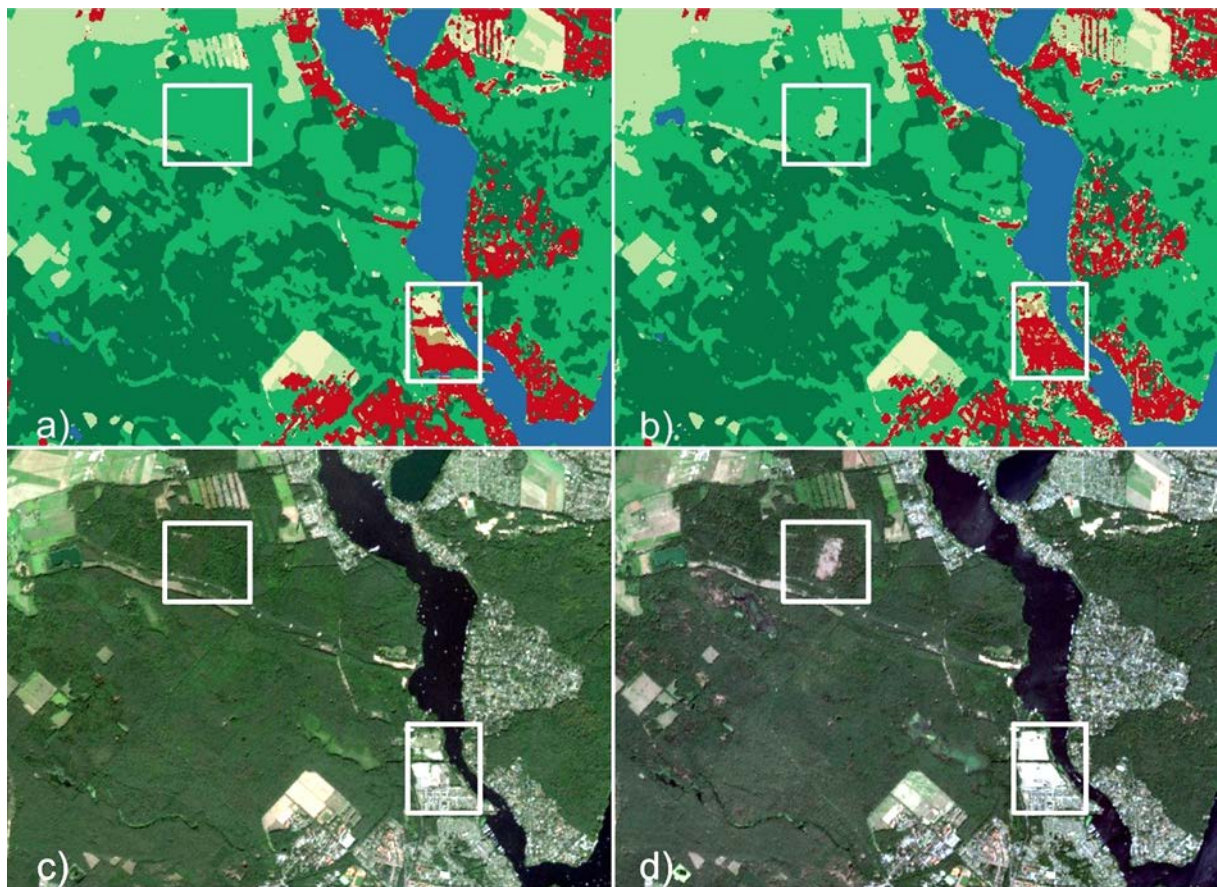
Es bleibt insgesamt festzuhalten, dass der Siedlungszuwachs proportional zum bestehenden Siedlungsgebiet verhältnismäßig gering ausfällt. Dieser Beobachtung kommt insbesondere dann eine bedeutende Rolle zu, wenn veränderte Flächen im Zeitraum von 2015 bis 2018 detektiert und bewertet werden sollen. Vor allem ist dies auch für die Betrachtung der Veränderung von natürlichen Flächen (z. B. Vegetationsflächen) innerhalb des hochgradig feinräumig strukturierten Stadtgebietes von erheblicher Relevanz.

Die größere Herausforderung besteht im Detektieren kleinerer Veränderungen, vor allem in urbanen Grünflächen.

Ein pixelbasierter Ansatz, also der direkte Vergleich zwischen Pixeln eines Zeitabschnittes zum anderen Zeitabschnitt, ist eine der möglichen Methoden. Dieses Verfahren ist einfach realisierbar und führt zu leicht interpretierbaren Ergebnissen, zumeist resultierend in einem binären Veränderungsdatensatz. Genutzt werden können dafür Klassifikationsprodukte oder auch vorprozessierte Satellitenzenen mit weiteren Bildinformationen wie Indizes oder Texturmerkmalen.

Abbildung 59

Ausschnitt Heiligensee Berlin; a) Klassifikation 2015, b) Klassifikation 2018, c) Sentinel-2-Aufnahme 2016, d) Sentinel-2-Aufnahme 2018



Quelle: DLR

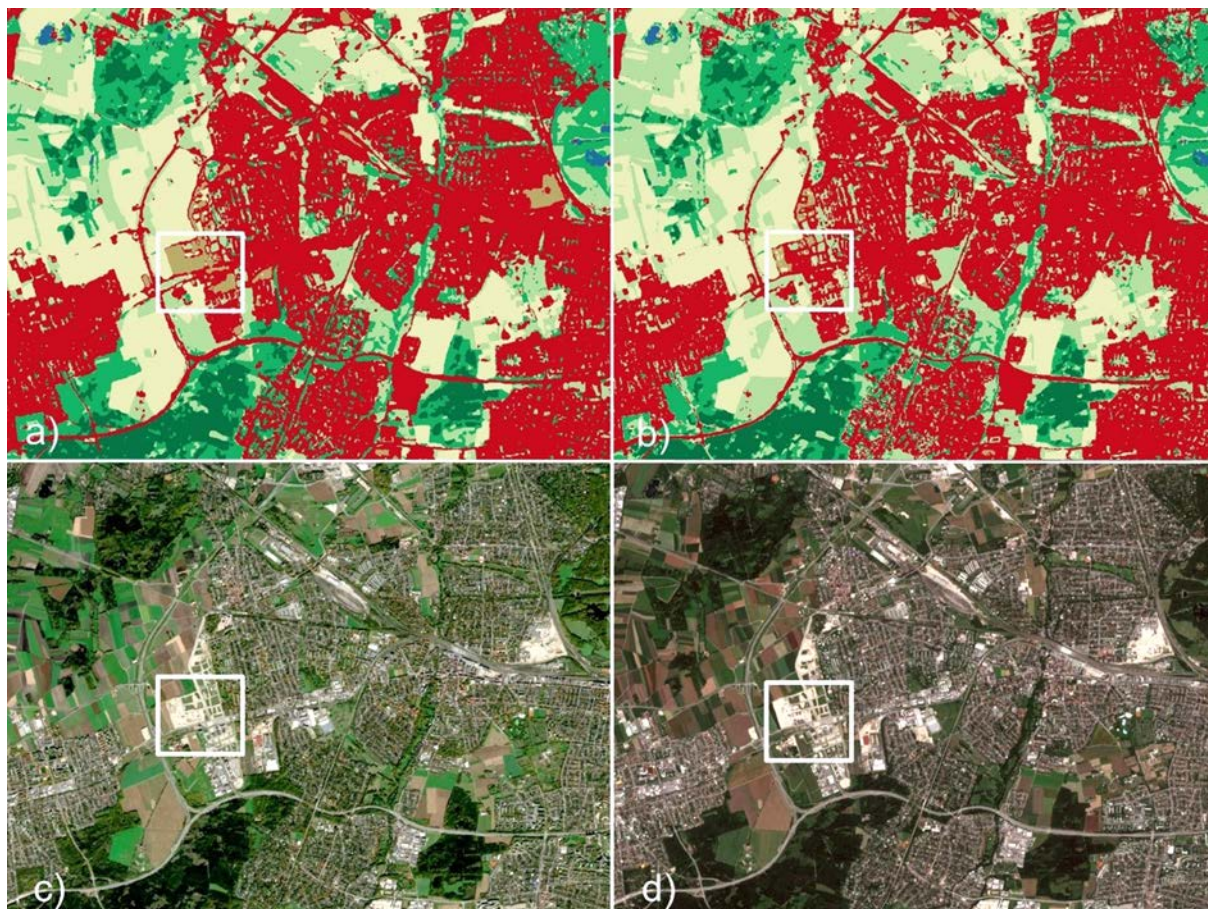
In den Klassifikationsprodukten 2015 und 2018 entspricht ein Pixel einer Fläche von 100 m². Während des Klassifikationsprozesses werden pro Pixel die Zugehörigkeitswahrscheinlichkeiten für jede Klasse analysiert. Vor allem in Randbereichen, also z. B. im Übergang von Grünflächen zu bebauten Gebieten, entstehen Unsicherheiten des Klassifikationsalgorithmus. Deshalb kann bei minimal veränderten Ausgangsbedingungen ein Pixel einer anderen Klasse zugeordnet werden, was in Datenänderungen ohne realweltliche Entsprechung resultiert.

Quarmby & Cushnie (1989) zeigen die Schwierigkeiten bei einem pixelbasierten Ansatz zur Veränderungsanalyse auf. In Ma et al. (2016) werden verschiedene Methoden verwendet und der pixelbasierte Ansatz führt zu schlechteren Ergebnissen im Vergleich zu einer objektorientierten Vorgehensweise. Ein pixelbasierter Ansatz wird daher als nicht zielführend bewertet.

Eine andere Methode ist der Vergleich zwischen Objekten. Da die Klassifikationsprodukte rasterbasierte Daten sind, müssen für diese Methodik zunächst Objekte gebildet werden. Eine Objektbildung zielt auf das Gruppieren und Zusammenführen benachbarter Objekte auf der Grundlage ihrer spektralen Homogenität oder Aufspaltung aufgrund von Heterogenität ab (Wurm et al. 2011). Dieses Verfahren ist rechenintensiver als ein pixelbasiertes Verfahren und das Ergebnis ist abhängig von der Genauigkeit der Objektbildung. Es kann auch zu Schwierigkeiten kommen, räumlich übereinstimmende Objekte zu extrahieren.

Abbildung 60

Ausschnitt München Aubing; a) Klassifikation 2015, b) Klassifikation 2018, c) Sentinel-2-Aufnahme 2017, d) Sentinel-2-Aufnahme 2018



Quelle: DLR

Für die Objektbildung wurde Monteverdi aus der Orfeo ToolBox verwendet. Dies ist eine Open-Source-Software für fernerkundliche Analysen. Dabei wurden für das Testgebiet München verschiedene Kombinationen der Bildlayer geprüft. Diese Bildlayer, wie beispielsweise NDVI oder NDBI (Normalised Difference Built-Up Index), wurden bereits für die Klassifikation berechnet. Das Verfahren kann in mehrere Schritte unterteilt werden. Zunächst werden die Eingangslayer geglättet und im nächsten Schritt wird eine erste Segmentierung auf der Grundlage der geglätteten Bilder erstellt. Bei der Glättung wird mögliches Rauschen verringert. Die Segmentierung gruppiert benachbarte Pixel, deren Abstandsabstand unter einem Parameter definiert wird. Darauffolgend werden kleine Regionen herausgefiltert oder mit der nächstgelegenen, ausreichend großen Nachbarregion verschmolzen. Der Schwellwert für das Zusammenführen dieser kleinen Regionen muss angegeben werden. Der letzte Schritt dieses Workflows besteht in der Vektorisierung des segmentierten Bildes.

Zusätzlich zu den verfügbaren Bildlayern wurde auch getestet, wie sich das Ergebnis verhält, sobald das Klassifikationsprodukt hinzugezogen wird. Der Fokus dieser Objektbildung lag auf den Grünflächen, die anderen Klassen wurden vernachlässigt. Die Polygone der Ergebnisdatei enthalten auch Angaben zur Größe der Objekte bzw. Grünflächen. Es konnten somit auch kleinere Grünflächen ausgeschlossen werden, um nur Grünflächen ab einer bestimmten Größe zu vergleichen.

Das beste Ergebnis wurde mit der Kombination NDVI und Landbedeckungsklassifikation gebildet. Die Hinzunahme weiterer Layer hat das Resultat nicht verbessert. Für einen bundesweiten Ansatz ist diese Methodik zu rechenintensiv und würde keinen Mehrwert in den Ergebnissen liefern.

6.2 Flächenwertbasierter Ansatz eines Monitorings

Monitoringaktivitäten erfordern die langfristige Verfügbarkeit von konsistenten und nach gleichbleibenden Kriterien erstellten Eingangsdatensätzen. Für raumbezogene Fragestellungen sind daher Geodatensätze vonnöten, die die Ableitung von Informationen über die jeweiligen Fragestellungen erlauben. Dabei müssen geometrische Genauigkeitsaspekte wie Lagetreue, Granularität und Auflösung ebenso berücksichtigt werden wie die Sicherheit der semantischen Information.

Beide Klassifikationsprodukte von 2015 und 2018 weisen sehr hohe Gesamtgenauigkeiten von über 90 % auf, und die Landbedeckung kann für beide Zeitstände mit derselben geometrischen Auflösung von 10 m für das gesamte Bundesgebiet beschrieben werden. Datenprodukte mit vergleichbarer Klassifikationsgüte in dieser hohen geometrischen und semantischen Auflösung für zwei Zeitstände sind für das gesamte Bundesgebiet neu. Durch das Postklassifikationsverfahren konnten offensichtliche Fehlklassifikationen reduziert werden. Zusätzlich wurde durch die Separation der Klasse *Bebaut – stark durchgrünt* die schwierige Unterscheidung von aufgelockerter Bebauung z. B. in Stadtrandbereichen auch im visuellen Eindruck noch einmal maßgeblich verbessert.

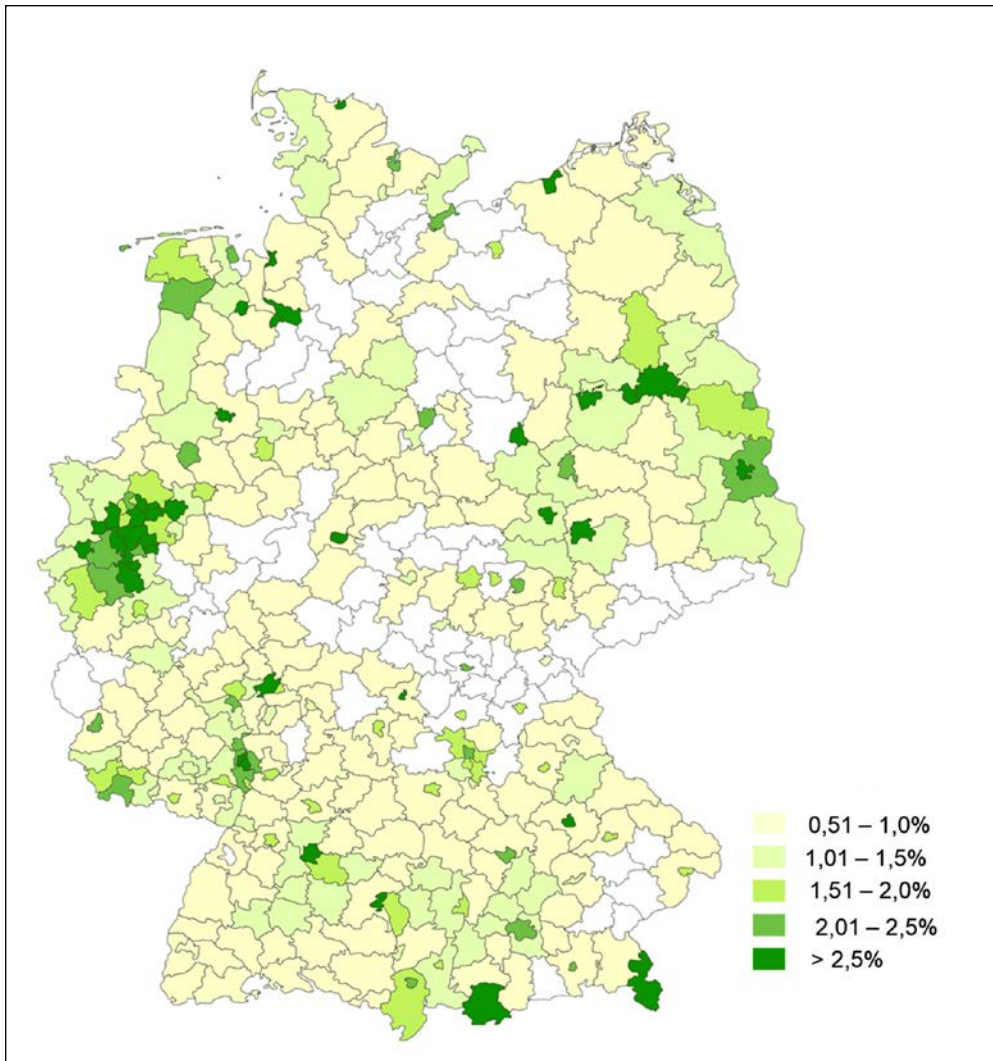
Inwiefern sich die Landbedeckungsklassifikationen für ein flächenbasiertes Monitoring eignen, soll nachfolgend geprüft werden. Hierfür wird der Ansatz, die Veränderung auf verschiedenen administrativen Ebenen zu analysieren, verfolgt. Dabei wurde die Veränderung der Flächengröße von Grünflächen von der Klassifikation 2015 auf die Klassifikation 2018 verglichen. Es wurden verschiedene administrative Ebenen, wie Landkreisebene oder die Stadtbezirke der Fallstudienstädte, untersucht. Dadurch, dass die gesamte Fläche in einem bestimmten Gebiet untersucht wird, wird die Gewichtung einzelner Pixel reduziert und das Verhältnis der Grünflächenveränderung in diesem Gebiet analysiert. Die Fläche wird aus der Klassifikation 2015 berechnet und von der Fläche basierend auf der Klassifikation 2018 subtrahiert. Daraus können die absoluten sowie die prozentualen Veränderungen berechnet werden. Generell wird der Fokus auch hier auf die Veränderung der Grünflächen gesetzt und die anderen Klassen vernachlässigt.

Grundsätzlich ist die Flächennutzungsänderung in Deutschland weniger dynamisch als in vielen anderen Regionen der Welt. So sind innerhalb einer Zeitperiode von drei Jahren vergleichsweise nur wenige Veränderungen zu finden, die mit Satellitenbilddaten einer Rasterweite von 10 m sicher detektiert werden können. Da die nominal dem Jahr 2015 zugewiesene Klassifikation tatsächlich aus Szenen der Jahre 2015, 2016 und 2017 berechnet wurde, ist der zeitliche Abstand zur nächsten Klassifikation von 2018 zudem geringer als drei Jahre. Aufgrund der Verfügbarkeit der Sentinel-2-Szenen gab es keine andere Option, als Szenen aus mehreren Jahren zu verwenden. Für die zweite Klassifikation konnten dann Szenen nur aus einem Jahr genutzt werden, da zu diesem Zeitpunkt bereits beide Sentinel-2-Satelliten operationell Daten lieferten. Die geringe Dynamik in den Grünflächen zeigt sich auch in der Analyse der administrativen Ebenen. Die Veränderung auf Landkreisebene liegt größtenteils bei unter 2,5 %, wie die Abbildung 61 zeigt.

Untersuchungen der Veränderungen auch mit vergleichbaren Datensätzen zum Monitoring der Landschaft wie z. B. im European Urban Atlas, zeigen insgesamt eine sehr geringe Dynamik der natürlichen und gebauten Landschaft in Deutschland. Der Urban Atlas (UA) ist ein frei verfügbares Produkt des Copernicus-Programms der EU, welches eine Landnutzungsklassifizierung von Städten über 100.000 Einwohnern darstellt und alle sechs Jahre erhoben wird.

Abbildung 61

Veränderung Grünanteil auf Landkreisebene, Klassifikation 2015 zu 2018



Quelle: DLR

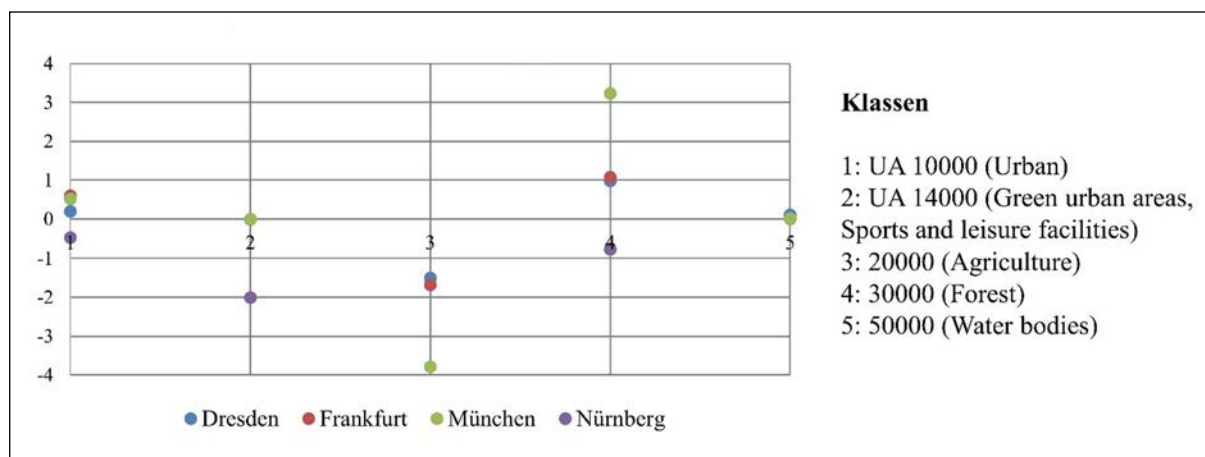
So kann der Abbildung 62 die Veränderung in vier deutschen Städten gemessen an den Daten des Urban Atlas entnommen werden. Die Klassen des UA wurden dafür in fünf Klassen zusammengefasst und zeigen eine geringe prozentuale Veränderung von 2006 auf 2012. Aufgrund des hohen Projektaufwands sind die Daten des UA 2018 noch nicht vollständig verfügbar und validiert. Wie in den Sentinel-2-basierten Klassifikationsprodukten können nur sehr geringe Veränderungen beobachtet werden, wobei manche Veränderungen auch durch reine Umschlüsselungen bedingt sind. Urban-Atlas-Daten basieren auf sehr hochauflösenden Daten von 2,5 m Auflösung (SPOT 5, SPOT 6). Die minimale Gesamtgenauigkeit dieses Produktes beträgt 80 % (Copernicus 2020).

Somit weist der Urban Atlas, trotz einer mindestens vierfach höheren Pixelauflösung und hohem Aufwand für die teils visuelle Nachbearbeitung der Klassifikationsergebnisse und einer im Vergleich zum Stadtgrünraster doppelt so hohen Zeitspanne von sechs Jahren für die Veränderungsdetektion, nur sehr geringe Änderungen aus.

Basierend auf den Daten des European Urban Atlas ändern sich im Mittel die Landbedeckungsklassen um weniger als 1 % pro Jahr in Deutschland. Auch die CORINE Landbedeckungsklassifikation des EU Copernicus-Programms wird nur alle sechs Jahre aktualisiert.

Abbildung 62

Veränderung des Urban Atlas 2006 auf 2012 in vier ausgewählten Städten



Quelle: DLR

Auch die sehr hochauflösenden Grünvolumendaten von LUP für Potsdam zeigen nur sehr geringe Änderungen. Von 2016 auf 2018 lag der Großteil dieser Änderungen unter 1 %.

Vor diesem Hintergrund der geringen Dynamiken der Landschaftsveränderungen sollten die zu betrachtenden Zeitspannen mit den erwartbaren Änderungsraten in Einklang gebracht werden. Darunter liegende Zeitspannen weisen aufgrund der in diesem Bericht ausführlich besprochenen externen Einflussfaktoren zu große Unsicherheiten auf.

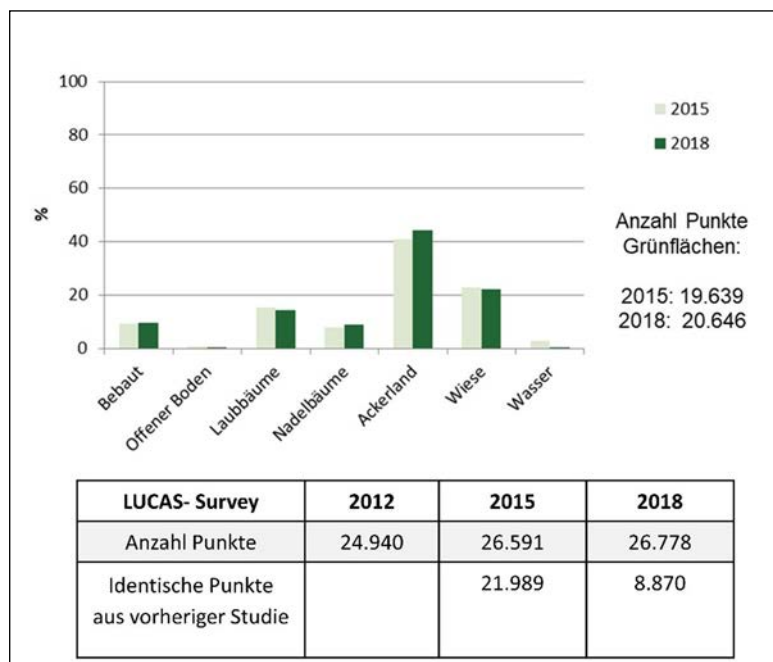
Die Gesamtgenauigkeit der Landbedeckungsklassifikation liegt für das Stadtgrünraster Deutschland 2015 bei 93,6 %, für 2018 bei 91,4 %. Da die Änderungsraten von Grünflächen (entsprechend dem Klassifikationsprodukt einer vegetationsbestandenen Pixelfläche) sehr gering im Vergleich zum Bestand sind, ist ein Monitoring auf dieser Basis in kurzen Zeitabständen unterhalb einer Sechs-Jahres-Schwelle kritisch zu sehen. Die aus beiden Datensätzen errechnete Änderungsrate bewegt sich unterhalb der mittleren Fehlerschwelle und kann damit nicht sicher für den Nachweis von geänderter Grünausstattung herangezogen werden.

Eine Möglichkeit, den Fehler zu verringern, besteht in einer Binarisierung des Klassifikationsproduktes in die generalisierten Klassen Grün und Nicht-Grün. Als Grün gelten die Vegetationsklassen Laubholz, Nadelholz und Wiese. Die Klassen Bebaut, Acker, Offener Boden und Wasser bilden die Klasse Nicht-Grün. Die Klassifikationsgenauigkeiten insgesamt (Overall accuracy OA) geben den Anteil aller korrekt klassifizierten Pixel an der Gesamtzahl aller Pixel an und belaufen sich auf 96,6 % (2015) bzw. 95,7 % (2018). Die resultierende mittlere Fehlerwahrscheinlichkeit für die Klassifikation liegt dann bei 3,9 % (Mittelwert von 3,4 % und 4,3 %). Dies ist bei der vergleichenden Analyse zwischen zwei Zeitschnitten zu beachten, da die Validität der Veränderungswerte eingeschränkt ist, wenn sich Änderungsraten des Grüns unterhalb dieser Messgenauigkeit bewegen.

Zudem spielt natürlich die räumliche und semantische Verteilung der LUCAS Punkte eine erhebliche Rolle. In Abbildung 63 ist die Anzahl der verwendeten LUCAS-Referenzpunkte für die beiden Zeitschnitte 2015 und 2018 dargestellt. Dazu wird die absolute Anzahl der verwendeten LUCAS-Punkte in Grünflächen (Laubholz, Nadelholz, Ackerland, Wiese) für das jeweilige Jahr ausgewiesen. Dies weist darauf hin, dass sich die LUCAS-Punkte in der Klassenzusammensetzung geändert haben. Die Anzahl der LUCAS-Referenzdaten zeigt auch, dass die Daten zusätzlich auch räumlich zum Großteil nicht mehr übereinstimmen. Somit greift das zu trainierende Modell für die Klassifikation im Jahr 2018 auf eine größere Anzahl von Trainingspunkten in Grünflächen zurück als für die Klassifikation 2015. Das könnte eine mögliche Ursache für geringe Schwankungen in der Klassifikation der beiden Jahre 2015/2018 sein.

Abbildung 63

Diagramm: Anteile der verwendeten LUCAS-Referenzpunkte aus den Studien 2015 und 2018 an den Klassen sowie die absolute Anzahl der verwendeten LUCAS-Punkte in Grünflächen (Laubbäume, Nadelbäume, Ackerland, Wiese)
 Tabelle: Anzahl LUCAS-Referenzpunkte in Deutschland



Quelle: DLR

Diese Veränderung der Referenzdaten war nicht abzusehen und nicht beeinflussbar. Andere Referenzdaten in diesem Umfang und dieser Konsistenz für ganz Deutschland zu erheben ist äußerst aufwendig und schloss sich im Rahmen dieses Projekts aus.

Andere europäische Landbedeckungsprodukte werden (analog zu LUCAS) ebenfalls in einem Drei- oder Sechsjahresintervall erhoben. Dazu zählen der den Bodenversiegelungsgrad abbildende High Resolution Imperviousness Layer des Copernicus-Programms (seit 2006) und die Landnutzungsklassifikation Corine Land Cover (CLC; Ersterhebung 1990, seit 2000 sechsjährlich). Beide Erhebungen werden in jüngster Zeit ebenfalls unter Verwendung von Sentinel-2-Daten erstellt. Insofern wäre eine entsprechende Erhebung des Stadtgrünrasters zeitlich konsistent mit diesen anderen wichtigen Landbedeckungsprodukten. Weitere europäische Copernicus-Datensätze könnten hinsichtlich ihres Mehrwertes einer kombinierten Auswertung mit dem Stadtgrünraster geprüft werden, z. B. die High Resolution Layer Forest, Grassland, Small Woody Features oder Urban Atlas Street Tree Layer. Auch diese Datensätze werden im Dreijahresintervall erhoben. Eine kombinierte Erstellung dieser Datensätze hätte erhebliche Synergieeffekte.

6.3 Indikatorwertbasierter Ansatz eines Monitorings

Wie oben dargestellt, ist die Dynamik von urbanen Grünflächen sehr gering ausgeprägt und absolute Änderungen der Grünfläche nur mit sehr sensitiven Erfassungsmethoden zu erkennen. Ein Monitoring expliziter Flächengrößen des urbanen Grüns ist somit in Anbetracht der Klassifikationsgenauigkeit mit großen Unsicherheiten behaftet (vgl. Kapitel 6.2). Jedoch können durch die gleichbleibende Klassifikationsgüte des Sentinel-2-basierten Stadtgrünrasters verschiedene Indikatoren zur Beschreibung des Stadtgrüns ermittelt werden (vgl. Kapitel 4), so z. B. zur Charakterisierung von Stadttypen bezüglich ihrer Grünausstattung, zum Größenverhältnis von Grün gegenüber dem Siedlungskörper oder aber auch die Grünindikatorwerte von Städten im Vergleich. Mittels Zeitreihen können somit generalisierende Aussagen zur Entwicklung des Stadtgrüns in

Deutschland insgesamt getroffen werden und ggf. einzelne Städte identifiziert werden, deren Entwicklung des Stadtgrüns auffällig verläuft.

Für eine bundesweite Raubeobachtung sind diese Erkenntnisse durchaus relevant, um Handlungsbedarfe zu identifizieren. Auf lokaler Ebene können aber die Ergebnisse eines Sentinel-2-basierten Monitorings teilweise anders ausfallen, als die einer hochauflösenden Kartierung auf Basis von Luftbildern oder Laserscandaten.

Zur Verdeutlichung von Entwicklungen bieten sich Reihungen („Rankings“) der Städte nach der Ausprägung ihrer Grünkennwerte für verschiedene Zeitschnitte an. Die Erstellung eines Ranking über alle 1.663 Städte mit mehr als 5.000 Einwohnern kann als nicht zielführend angesehen werden, da sich diese Städte im Einzelnen hinsichtlich ihrer Stadtfläche, -struktur, Einwohnerzahl und weiteren Kennwerten stark voneinander unterscheiden. Daher ist es sinnvoll, in Abhängigkeit von der Fragestellung, Gruppen von Städten mit vergleichbaren Eigenschaften zu bilden, unter denen dann ein Ranking sinnvoll ist.

Für die Kennwerte der Grünindikatoren liegen Ergebnisse für die beiden Jahre 2015 und 2018 für die Städte mit mehr als 5.000 Einwohner vor. Diese können für ein vergleichendes Ranking genutzt werden, welches Anhaltspunkte für die Belastbarkeit des Städtevergleichs innerhalb eines Zeitschnittes und als Werkzeug zur Beobachtung von Entwicklungen liefert. Basis der Berechnung der Kennwerte sind die Landbedeckungsklassifikationen 2018 und 2015, wobei 2015 aus Szenen der drei Jahre 2015, 2016 und 2017 gebildet wurde. Somit verkürzt sich die Zeitspanne zwischen den zu vergleichenden Werten auf bis zu einem Jahr. Innerhalb eines so kurzen Zeitraumes ist die Veränderung der urbanen Grünausstattung begrenzt, sodass sich folgende Ausgangshypothese stellt:

Die Positionen der Städte im Ranking 2015 und 2018 bleiben gleich, da sich die urbane Grünausstattung innerhalb des kurzen Zeitraumes nicht robust messbar geändert hat.

Diese Hypothese kann mittels des Rangkorrelationskoeffizienten überprüft werden, mit welchem sich der Zusammenhang zwischen zwei Variablen beschreiben lässt, wobei nur die Position der Werte in einer geordneten Liste berücksichtigt werden. Der Rangkorrelationskoeffizient zeigt bei fast allen Kennwerten für die einzelnen Stadttypen einen hohen positiven linearen Zusammenhang, d. h. die Positionen der Städte im Ranking sind für beide Zeitschnitte zumeist identisch oder ähnlich. Es ist zu beachten, dass die Wertspannen bei den einzelnen Grünkennwerten unterschiedlich hoch sind. Um Positionsänderungen im Ranking infolge kleiner Wertspannen weitestgehend unberücksichtigt zu lassen, können im nachfolgenden Quintile bestimmt werden. Dabei wird die Rangreihe in fünf gleich große Teile zerlegt.

Kleine Sprünge im Ranking innerhalb der Quintile bleiben nun unberücksichtigt. Wechselt eine Stadt jedoch das Quintil, ist zunächst zu prüfen, ob sich die Stadt im Ranking an der Quintilsgrenze befand und somit durch eine kleine Änderung der Werte in das nächste Quintil eingruppiert wurde. Bei Sprüngen über zwei Quintile kann relativ sicher davon ausgegangen werden, dass die Werte für die Stadt nicht plausibel sind und die Belastbarkeit des Kennwertes eingeschränkt ist.

Für den Kennwert *Grünausstattung bezogen auf das administrative Stadtgebiet* zeigt sich über alle sechs Rankings der Stadttypen ein hoher positiver Rangkorrelationskoeffizient für die Rankings 2015 und 2018. Es sind verhältnismäßig wenige Quintilssprünge zu beobachten, es erfolgte kein Quintilssprung über zwei Quintile. Somit kann dieser Kennwert als stabil für ein Monitoring auf Basis eines Rankings angesehen werden.

Beim Kennwert *Grünausstattung bezogen auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche* lässt sich ebenfalls ein hoher positiver Rangkorrelationskoeffizient für die Rankings 2015 und 2018 ermitteln. Die Wertespannen sind geringer als beim Kennwert *Grünausstattung bezogen auf das administrative Stadtgebiet*, Quintilssprünge treten

somit häufiger auf. Aufgrund geringer Wertspannen im Verhältnis zur Anzahl der Städte im Ranking kommt es zudem auch zum Teil zu Quintilssprüngen über zwei Quintile. Der Kennwert muss bei einem Monitoring auf Basis eines Rankings als kritisch angesehen werden. Unter anderem kann dieser Kennwert durch Veränderung der Größe der Siedlungs- und Verkehrsfläche beeinflusst werden.

Für den Kennwert *Grünbedeckung pro Einwohner bezogen auf das administrative Stadtgebiet* zeigt sich über alle sechs Rankings der Stadttypen ein sehr hoher positiver Rangkorrelationskoeffizient. Es gibt verhältnismäßig wenige Quintilssprünge und es erfolgte kein Quintilssprung über zwei Quintile. Somit kann dieser Kennwert als sehr stabil für ein Monitoring auf Basis eines Rankings angesehen werden.

Für die beiden Kennwerte *Anteil der für Wohnen genutzten Siedlungsfläche in fußläufiger Entfernung zu grünbedeckter Fläche* und *Anteil der für Wohnen genutzten Siedlungsfläche in naher Entfernung zu größeren grünbedeckten Flächen* können insbesondere bei den Rankings der Stadttypen Kleine Mittelstädte, Große Kleinstädte und Kleine Kleinstädte sehr geringe Wertspannen im Verhältnis zur Anzahl der Städte erfasst werden. Somit werden Werte mehrfach besetzt oder liegen sehr dicht beieinander. Geringfügige Änderungen dieser Werte in der Nachkommastelle, können somit schon eine Positionsänderung im Ranking zweier Zeitschnitte auslösen, was sich wiederum in einem niedrigeren positiven Rangkorrelationskoeffizienten und in einer hohen Anzahl von Quintilssprüngen widerspiegelt. Beide Kennwerte müssen daher bei einem Monitoring auf Basis eines Rankings als kritisch angesehen werden.

Der Kennwert *Mittlere Euklidische Distanz*, welcher die durchschnittliche Entfernung eines Siedlungspixels zum nächstgelegenen Grünpixel beschreibt, ist stark abhängig von der Detektion einzelner Grünpixel. Um diesen Einfluss zu reduzieren, wurden nur Grünflächen größer 1 ha in die Berechnung einbezogen. Dennoch zeigen sich hier bei den Rankings einiger Stadttypen teilweise niedrige positive Rangkorrelationskoeffizienten und es kommt vermehrt zu Quintilssprüngen. Somit ist dieser Kennwert für ein Monitoring auf Basis eines Rankings als nicht geeignet anzusehen.

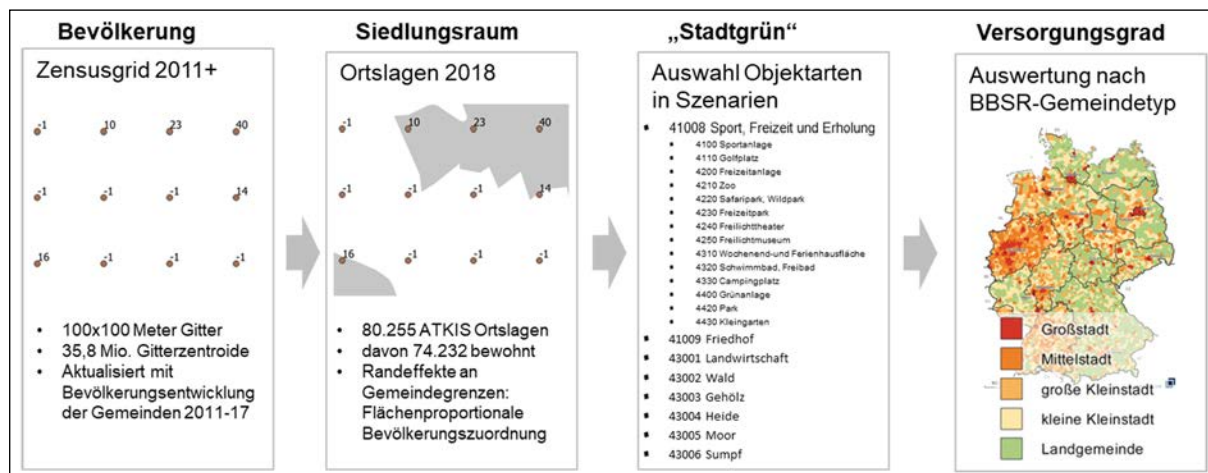
Für den Kennwert *Versiegelungsgrad bezogen auf das administrative Stadtgebiet* zeigt sich über alle sechs Rankings der Stadttypen ein sehr hoher positiver Rangkorrelationskoeffizient für die Rankings 2015 und 2018. Es sind verhältnismäßig wenige Quintilssprünge zu beobachten, es erfolgte kein Quintilssprung über zwei Quintile. Somit kann dieser Kennwert als stabil für ein Monitoring auf Basis eines Rankings angesehen werden.

6.4 Geobasisdatenbasierter Ansatz

Für landesweit flächendeckende Aussagen bieten sich neben Satellitendaten auch amtliche Geobasisdaten an, die per gesetzlichem Auftrag die Erdoberfläche in digitalen Modellen abbilden und laufend aktualisiert werden (Meinel/Sikder/Krüger 2021; Meinel/Krüger 2014).

In einem Exkurs der sozialräumlichen Analysen wurde im Projekt eine empirische Überprüfung der Ist-Situation der Stadtgrünversorgung durchgeführt. Die dabei ermittelten Werte sollen helfen, die für die Defizitanalyse im Projekt angesetzten städtebaulichen Orientierungswerte der Grünraumversorgung mit gemessenen Werten abzugleichen. Zum Einsatz kam die in Abbildung 64 gezeigte Methodik, die bundesweit durchführbar ist. Sie basiert auf einer Fortschreibung der kleinräumigen Zensusgriddaten von 2011 mit Daten der Regionalstatistik bis 2017, sowie einer Umlegung dieser Zahlen auf die Ortslagen des ATKIS-Basis-DLM. Weiterhin wurden aus ATKIS gründerdominierte Objektklassen extrahiert, um drei Szenarien abzubilden (Vegetation insgesamt inkl. Landwirtschaft, Grünflächen und öffentliche Parks größer 0,5 ha). Die Ergebnisse wurden für alle Ortslagen in Deutschland gerechnet und auf die Stadt- und Gemeindetypen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung umgelegt und sind in Tabelle 21 und Abbildung 65 aufgeführt.

Abbildung 64
Methodik zur Ermittlung bundesweiter Werte für die Grünraumversorgung



Quelle: ILS

Tabelle 21
Grünraumversorgung in deutschen Städten und Dörfern*

BBSR Gemeindetypen 2017	Bevölkerung in ATKIS Ortslagen**	Vegetation in Ortslagen insgesamt (inkl. Landwirtschaft)		Grüne Freiflächen in Ortslagen (Sport, Freizeit, Erholung, Friedhof, Wald, Gehölz, Heide, Moor, Sumpf)		Öffentliche Erholungsflächen > 0,5 ha (Grünanlage, Parks)	
		km ²	m ² je Ew.	km ²	m ² je Ew.	km ²	m ² je Ew.
Große Großstadt	14.134.482	580,8	41,1	550,2	38,9	188,0	13,3
Kleinere Großstadt	11.537.780	471,3	40,8	455,0	39,4	134,4	11,7
Größere Mittelstadt	7.397.211	321,9	43,5	283,7	38,4	67,5	9,1
Kleinere Mittelstadt	14.857.756	657,3	44,2	572,0	38,5	119,1	8,0
Größere Kleinstadt	11.782.586	574,4	48,7	484,1	41,1	88,4	7,5
Kleine Kleinstadt	9.821.437	533,8	54,4	442,3	45,0	61,9	6,3
Landgemeinde	7.080.369	476,1	67,2	379,2	53,6	48,6	6,9

* repräsentiert durch ATKIS Ortslagen 2017 aller 11.264 kreisfreien Städte und Gemeinden (Gebietsstand 31.12.2017)

** lokalisiert mit Bevölkerungszahlen im Zensusgrid 2011 und aktualisiert je Gemeinde mit spezifischer Bevölkerungsentwicklung 2011-2017

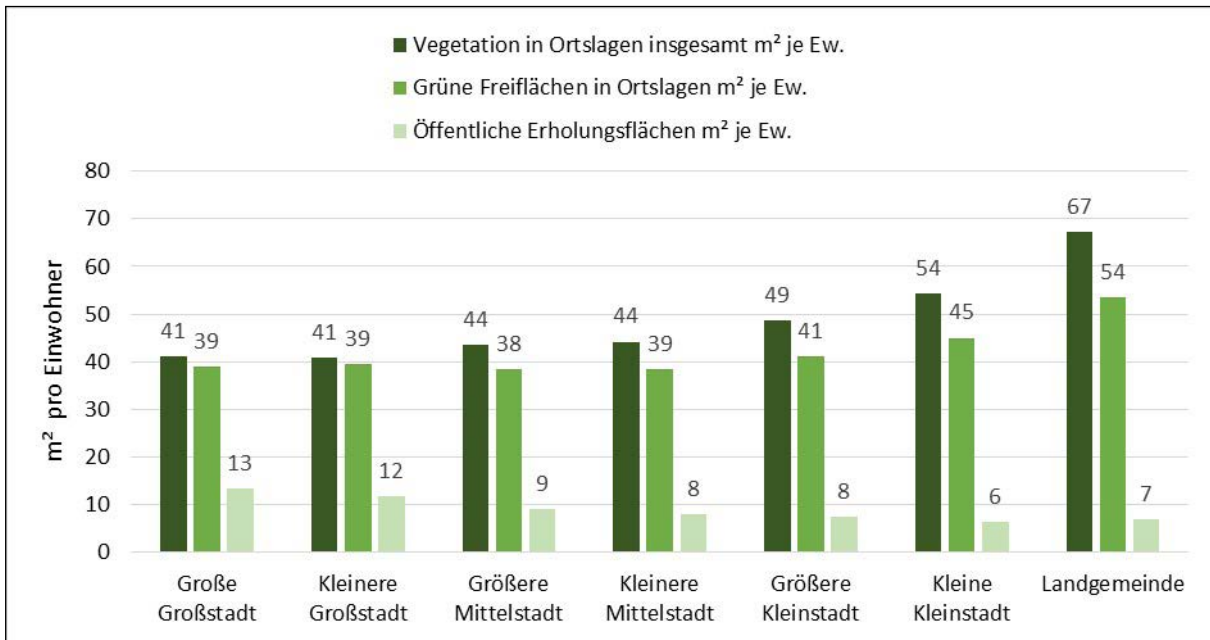
Quelle: ILS

Aus den im IÖR-Monitor verarbeiteten Daten des ATKIS-Basis-DLMs kann eine Zeitreihe der Entwicklung von städtischen Grünflächen retrospektiv bis ins Jahr 2000 erstellt werden. Durch Auswahl der Flächennutzungskategorien Parks/Grünanlagen, Friedhöfe und Kleingartenanlagen wird eine Approximation des urbanen Grüns erreicht (Abbildung 66).

Es zeigt sich, dass sich in den letzten 20 Jahren städtische Grünflächen in den deutschen Mittel- und Großstädten von ca. 606 km² auf 911 km² vergrößert haben. Der Grünflächenanteil der Städte erhöhte sich damit um 1,3 % der administrativen Fläche. Damit ergibt sich eine Veränderungsrate von ca. 0,07 % der Gesamtfläche pro Jahr.

Abbildung 65

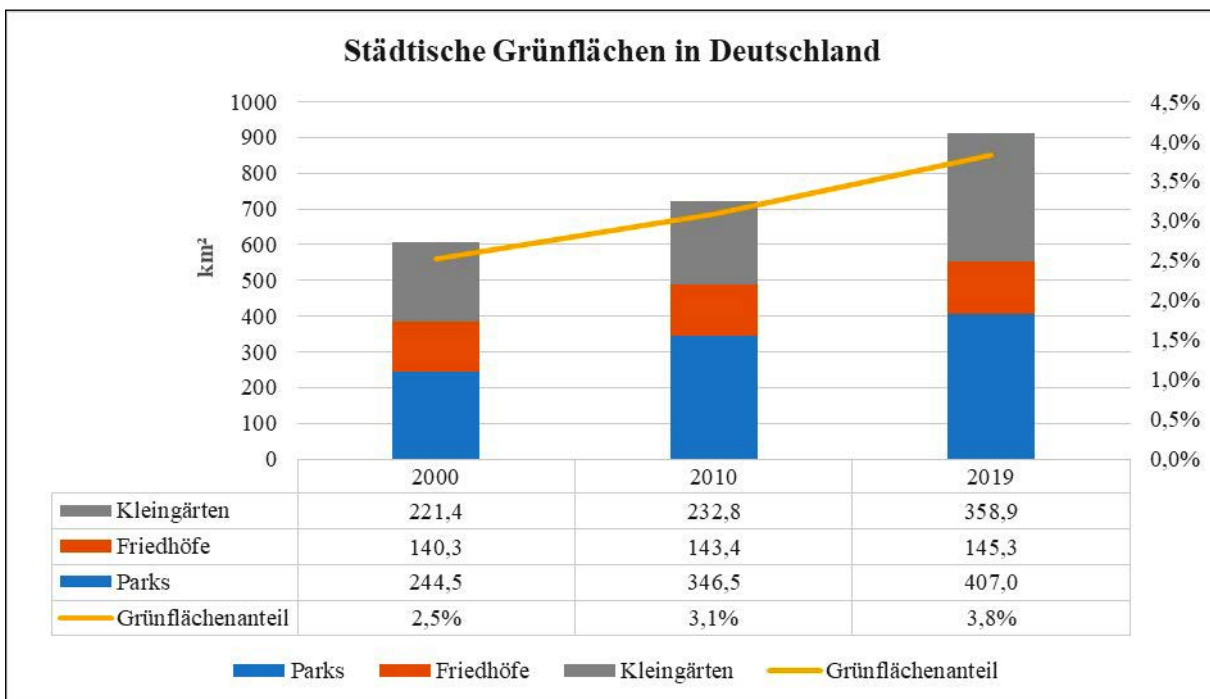
Grünraumversorgung in deutschen Städten und Dörfern in m² je Einwohner 2017



Quelle: IÖR

Abbildung 66

Entwicklung städtischer Grünflächen in Städten mit mehr als 50.000 Einwohnern von 2000 bis 2019



Quelle: ATKIS/IÖR-Monitor

Tabelle 22 zeigt Vorteile und Nachteile für die Erfassung von Stadtgrün in Gegenüberstellung von der Sentinel-2-Landbedeckungsklassifikation, ALKIS und ATKIS im Vergleich.

Tabelle 22

Vergleich Erfassung von Stadtgrün in Sentinel-2-Landbedeckungsklassifikation, ALKIS und ATKIS

	Sentinel-2-Stadtgrünraster	ATKIS	ALKIS
Landnutzungs- information	Durch klassifizierte Pixel	Durch die TN-Objektarten	Durch die TN-Objektarten
Mindestgröße Grün	10 x 10 m (=100 m ²)	Sport-, Freizeit-, Erholungsfläche: 1 ha Friedhof: 0,5 ha Wald, Gehölz: 0,1 ha Als Maschenfüller im topologi- schen Netz ggf. auch kleiner	Länderabhängig, 100 m ² bis 1.000 m ²
Grünableitung	Automatische Klassifikation, Problem Mischpixel	Luftbildkartierung, z. T. Erhebungen durch Gebietstopographen	TN aus Kataster
Räumliche Vergleichbarkeit	Flächendeckende einheitliche Qualität	Teilweise Differenzen zwischen den Bundesländern	Erhebliche Differenzen zwi- schen katasterführenden Stel- len innerhalb und zwischen den Bundesländern
Wiederholrate der Erhebung	Theoretisch bundesweit jährlich möglich bei Gene- rierung eines wolkenfreien Sentinel-2-Komposits; Prak- tisch limitiert durch Klassifi- kationsgenauigkeit	Theoretisch jährlich nach Da- tenlieferung der Länder an das BKG; praktisch sinnvoll nach bundesweiter Grundaktualisie- rung in allen Ländern (1-3 Jahre)	Theoretisch unterjährig Praktisch: Jährlich (analog amt- licher Flächenerhebung)
Begrenzender Faktor der zeitlichen Vergleichbarkeit	Grünerfassung: jährliche Veränderungsrate geringer als Klassifikationsgüte	Teilräumlich unterschiedliche Erfassungszustände, Dominanzprinzip	Unabhängigkeit von Flur- stücksebene fraglich; nur fünf Bundesländer Open-Data
Kosten	Satellitendaten kostenfrei aber hohe Klassifizierungs- kosten	Kostenfrei für Bundesbehörden	Nur in wenigen BL kostenfrei verfügbar, wenn Open-Data- Lizenz vorliegt

Quelle: IÖR

6.5 Ergebnistransfer

6.5.1 Präsentation auf vorhandenen Plattformen

Die Indikatoren können im interaktiven Online-Atlas (INKAR) des Bundesinstituts für Bau-, Stadt-, und Raumforschung (BBSR) präsentiert werden. Dieser veranschaulicht mit über 700 Indikatoren die Lebensbedingungen in Deutschland und Europa. Dabei werden die gesellschaftlich wichtigen Themen Arbeitsmarkt, Bildung, Sozialleistungen, Demografie, Einkommen, Wirtschaft, Wohnen, öffentliche Finanzen, Verkehr und Umwelt abgedeckt. Mit INKAR ist die Erstellung von Karten und Tabellen für unterschiedliche Raumeinheiten möglich (BBSR 2020).

Folgende Webseiten stellen ebenfalls geeignete Plattformen für die Präsentation der Ergebnisse bereit:

- IÖR-Monitor (<https://www.ioer-monitor.de/>): Darstellung der Indikatoren, Kennwerte und des Stadtgrünrasters und Downloadmöglichkeit durch Exportdienste
- DLR Geoservice (<https://geoservice.dlr.de/web/>): Veröffentlichung und Downloadmöglichkeit der originären Landbedeckungsklassifikationen
- Monitoring StadtRegionen (<https://ils-stadtregionen.de/>): Veröffentlichung ausgewählter Indikatoren

Für eine bessere Bündelung von Informationen zur Grünausstattung von Städten sollten bereits bestehende Web-Angebote genutzt werden. So bietet das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) mit der Website „Grün in der Stadt“ (www.gruen-in-der-stadt.de) bereits eine Plattform, auf der Aktivitäten und Projekte um das Thema Stadtgrün vorgestellt werden. Bisher befindet sich für das Projekt eine Kurzvorstellung unter dem Reiter Forschung.

6.5.2 Konzeption einer Web-Anwendung

Daneben bietet sich auch die Präsentation der Indikatoren, der Datengrundlage und weiterer Projekthinhalte, wie Methodik in einer eigenen Webanwendung an.

Die Konzipierung der Web-Anwendung basiert auf dem Ansatz der nutzerorientierten Gestaltung (User-Centered Design). Dabei wird bei der Planung des zu gestaltenden Systems von vornherein die spätere Verwendung fokussiert. Kenntnisse und Techniken aus den Bereichen der Arbeitswissenschaft und Ergonomie sowie der Gebrauchstauglichkeit (Usability) sind zu implementieren (ISO 9241-210: 2011).

Dafür bedarf es einer anfänglichen Analyse der avisierten Zielgruppen der Web-Anwendung, um die Ausrichtung bzw. den Zweck der Web-Anwendung bestimmen und Anforderungen aus der Zielgruppe heraus an die Web-Anwendung stellen zu können. Die Ergebnisse des Projektes adressieren vorrangig die Städte. In Zusammenarbeit mit Vertretern der Fallstudienstädte wurden Daten, Ergebnisse und Methoden diskutiert, wobei ein Interesse der Städte an diesen Informationen festgestellt werden konnte. Aufgrund der umfangreichen Nutzungsmöglichkeiten der Informationen für die Städte bieten sich Vertreter aus Behörden als Hauptzielgruppe einer Web-Anwendung an.

Die Hauptzielgruppe „Vertreter aus Behörden“ ist jedoch sehr divers. Je nach Fachamt und Aufgabenfeld kann von einem unterschiedlichen Wissensstand zur Grünausstattung der Stadt ausgegangen werden. Auch die Motivation der Beschäftigung mit dem Thema kann unterschiedlich sein, so dürften beispielsweise Bauaufsicht, Umweltbehörden, Stadtreinigung, Stadtgrünämter oder Abwassermanagement sehr verschiedene Informationsinteressen hinsichtlich der urbanen Grünausstattung haben. Zudem sind Kenntnisse und Fertigkeiten im Umgang mit Geoinformationssystemen und Geodaten sehr heterogen verteilt. Folgende Anforderungen ergeben sich daher an die Web-Anwendung:

Inhaltlich:

- Beschreibung zentraler Indikatoren und deren Kennwerte
- Visualisierung der Ergebnisse von Indikatorberechnungen für die Gesamtstadt (Karten, Diagramme)
- Vergleichende Darstellung der Ergebnisse für ausgewählte Städte
- Visualisierung, Beschreibung und Bereitstellung der Datengrundlage
- Bereitstellung weiterer vertiefender Informationen

Funktional:

- Download-Möglichkeit der Karten und Diagramme, dabei Auswahl von Datenformaten
- Download-Möglichkeit der Datengrundlage
- Auswahlmöglichkeit der Stadt

Weitere:

- Responsive Design (Fähigkeit der Webseite auf verschiedene Bildschirmgrößen zu reagieren)
- Kompatibilität mit aktuellen Webtechnologien/Browsern
- Berücksichtigung der Usability (Effizienz, Effektivität, Zufriedenstellung)
- Barrierefreiheit

Bei der Auswahl der darzustellenden Indikatoren sollte sich auf zentrale, aussagekräftige und belastbare Kennwerte beschränkt werden, insbesondere wenn zudem eine Übersicht der Wertausprägungen für mehrere Städte dargestellt werden soll (Ranking). Hierfür eignen sich insbesondere folgende Kennwerte:

- Grünanteil bezogen auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche
- Grünbedeckung pro Einwohner bezogen auf das administrative Stadtgebiet
- Versiegelungsgrad des administrativen Stadtgebietes

Ein Gestaltungsvorschlag zur konzipierten Web-Anwendung als Beispiel eingebettet in der Website „Grün in der Stadt“ (www.gruen-in-der-stadt.de) wird mittels Mockups im Anhang 10.7 dargestellt.

7 Fazit

Im Nachfolgenden soll eine kurze Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den einzelnen Kapiteln gegeben werden.

Stand der Forschung

Wie ist der aktuelle Erkenntnisstand zum Zustand und zur Entwicklung von Stadtgrün bundesweit und international? Welche Themen stehen dabei im Fokus?

Dem Konzept der „grünen Infrastruktur“ wurde in der Stadtforschung in den letzten Jahren immer mehr Bedeutung zuteil, da dem Stadtgrün ein hohes Potential zugerechnet wird, um mit verschiedenen aktuellen und zukünftigen Herausforderungen der Stadtentwicklung umzugehen. Mit dem „Weißbuch Stadtgrün“ wird seitens der Bundesregierung eine bundesweit flächendeckende ausreichende Grünflächenversorgung angestrebt. Im Sinne der Umweltgerechtigkeit soll allen Bürgern ein kurzer, fußläufiger Zugang zu Grünflächen ermöglicht werden. Im Zuge der Innenverdichtung und dem Wachsen der Städte stehen Grünflächen zunehmend unter Druck.

Auf kommunaler Ebene werden städtische Grünflächen erfasst und verwaltet, welche sich insbesondere im Zuständigkeitsbereich der kommunalen Grünflächenämter befinden. Eine regelmäßige Erhebung mit dem Ziel eines Monitorings wird hingegen nur von wenigen Kommunen durchgeführt. Mit den CORINE-Land-Cover-Produkten und dem European Urban Atlas stehen Informationen zur Landbedeckung und Landnutzung auf europäischer Ebene zur Verfügung, aus denen Informationen zum Stadtgrün abgeleitet werden können (BKG 2020; COPERNICUS 2020). Insbesondere kleinräumigere, deutschlandweit vergleichbare Informationen können die Datenlage zum Stadtgrün verbessern, Grundlage für ein Monitoring bilden sowie die Ermittlung von Orientierungs- und Kennwerten unterstützen.

Satellitenbasiertes Stadtgrünraster Deutschland

Welches sind geeignete Plattformen und Sensoren für eine bundesweite Erfassung und Monitoring, deren Daten zudem möglichst kostenfrei oder für das Projekt und künftig wirtschaftlich vertretbar beschafft und ausgewertet werden können?

Für eine bundesweite Erfassung von Stadtgrün sind Daten des Satelliten Sentinel-2 eine praktikable Lösung. Diese Daten sind kostenfrei, weisen eine ausreichende räumliche Auflösung von 10 m sowie eine hohe temporale Abdeckung auf. Plattformen wie CODE-DE (<https://code-de.org/>), Copernicus Open Access Hub (<https://sci-hub.copernicus.eu/dhus/#/home>) oder Sentinel-Hub (<https://www.sentinel-hub.com/>) stellen die Satellitenszenen zur Verfügung. Höher aufgelöste Daten sind kostenintensiv und weisen oft eine geringere temporale Abdeckung als Sentinel-2 auf. Auch ist die Berechnung einer bundesweiten Landbedeckungsklassifikation sehr rechenintensiv, bei höher aufgelösten Daten würde der Prozessierungsaufwand nochmal erheblich steigen. Für kleinräumigere Analysen, wie z. B. für ein Stadtgebiet, können Sensordaten wie WorldView⁵ oder Planet⁶ hilfreich sein.

Welche Arten von Stadtgrün sind wie fernerkundlich zu systematisieren und zu erfassen?

Es hat sich gezeigt, dass mit einer räumlichen Auflösung von 10 m Laubholz, Nadelholz, Ackerland (niedrige saisonale Vegetation) und Wiese (niedrige ganzjährige Vegetation) zuverlässig abgeleitet werden kann. Eine weitere Klasse Sträucher ist nicht sinnvoll, da es kaum große zusammenhängende Strauchlandschaften in

(5)
<https://www.maxar.com/worldview-legion>

(6)
<https://www.planet.com/>

Deutschland gibt und die LUCAS-Referenzdaten nur sehr wenige Punkte in dieser Klasse aufweisen, die für ein Training des Algorithmus nicht ausreichen. Auch ist die Mindestkartierbarkeit von 100 m² (ein Sentinel-2-Pixel) für Sträucher in urbanen Gebieten meist nicht gegeben.

Können die Klassifikationsverfahren zur Bestimmung von Stadtgrün durch KI-Technologien unterstützt werden?

Mit der Verwendung des Machine Learning Algorithmus Random Forest konnte ein sehr gutes Ergebnis bei der Landbedeckungsklassifikation erzielt werden. Der Algorithmus baut auf Grundlage der multispektralen Eingangsdaten, der daraus berechneten Indexlayer sowie unter Einbeziehung der Trainingsdaten eine Vielzahl von Entscheidungsbäumen auf. Dies erfolgt parallelisiert, wodurch der Gesamtalgorithmus sehr schnell trainiert werden kann. Die Varianz der Entscheidungen vieler Einzelbäume verbessert die gesamte Ergebnis- und Vorhersagegenauigkeit.

Sind die Ergebnisse bei Auswertung von Vergleichsbefliegungen und unter Anwendung anderer Methoden stabil?

Der Vergleich der Landbedeckungsklassifikationen 2015 und 2018 deutet auf einen stabilen Klassifikator hin. Satellitenszenen mit unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten können besonders in der Phänologie auf landwirtschaftlich genutzten Flächen enorme Unterschiede aufweisen. Der Algorithmus klassifiziert diese Flächen sehr zuverlässig. Dies lässt sich mit dem Medianmosaik erklären, welches durch die Vielzahl an Satellitenszenen von unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten die phänologische Entwicklung der Vegetation im Jahresverlauf berücksichtigt.

Wie lassen sich die Ergebnisse validieren?

Die Validierung der Klassifikationsprodukte beruht auf einem gängigen Verfahren. Dabei werden die LUCAS-Referenzpunkte vor der Klassifizierung in 80 % Training und 20 % Validierung unterteilt. Zusätzlich werden räumlich sehr hochauflösende Daten für zwei Fallstudienstädte, bereitgestellt vom Projektpartner LUP, für eine zusätzliche Validierung genutzt. Die LUCAS-Referenzpunkte stellen konsistente Daten für ganz Deutschland bzw. Europa dar und eignen sich als Referenz für großflächige Klassifikationen (Pflugmacher et al. 2019; Mack et al. 2017). Bei kleinräumigen Untersuchungen muss gewährleistet werden, dass von allen Klassen genügend Punkte in diesem Gebiet vorhanden sind. Dann können lokale Referenzpunkte für eine zusätzliche Validierung kleinräumiger Gebiete hilfreich sein.

Kann eine Veränderung der Grünausstattung über die Zeit festgestellt werden? Hat es grünrelevante Landnutzungswechsel gegeben? Wie hat sich die Ausstattung mit Stadtgrün verändert?

Die Zeitspanne zwischen den beiden Klassifikationsprodukten beträgt weniger als drei Jahre, da die Klassifikation 2015 auch Szenen aus den Jahren 2016 und 2017 beinhaltet. Dies war aufgrund der anfänglich geringen Verfügbarkeit der Satellitenszenen unumgänglich. Wegen seiner vergleichsweise geringen Dynamik, den Wandel von Landnutzung und Landbedeckung betreffend, weist Deutschland innerhalb kurzer Zeitspannen kaum entsprechend signifikante Änderungen auf. Diese Aussage wird durch die Ergebnisse der Veränderungsanalyse der beiden Klassifikationen bestätigt. Aufgrund des geringen Zeitabstands zwischen den Klassifikationen können nur minimale Änderungen der Grünflächen detektiert werden. Größere Veränderungen von Grünflächen können jedoch im Einzelfall erkannt werden. Auch andere Datenprodukte, wie der Change Layer des European Urban Atlas, CORINE Landbedeckungsklassifikation oder sehr hochauflösende Grünvolumendaten der Stadt Potsdam, kommen zu demselben Ergebnis (LUP, Grünvolumendaten von 2016 und 2018). Die geringen Dynamiken der Landschaftsveränderungen in Deutschland und der kurze zu betrachtende Zeitraum lassen auch dort kaum Änderungen erkennen.

Indikatorbasierte Auswertung des Stadtgrüns

Welche Indikatoren zu Stadtgrün können wirtschaftlich vertretbar fernerkundlich bundesweit und welche nur bundesweit repräsentativ durch Fallstudien ermittelt werden? Welche Aspekte von Stadtgrün lassen sich quantitativ, welche qualitativ effizient ermitteln?

Folgende Kennwerte der Grün-Indikatoren Grünausstattung, Grünraumversorgung, Grünerreichbarkeit, Grünraumvernetzung und Klimaaktive Flächen können bundesweit mittels der Sentinel-Landbedeckungsklassifikation wirtschaftlich vertretbar ermittelt werden:

- Grünanteil bezogen auf das administrative Stadtgebiet
- Grünanteil bezogen auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche
- Grünbedeckung pro Einwohner bezogen auf das administrative Stadtgebiet
- Anteil der Siedlungsfläche in definierter Entfernung zu grünbedeckter Fläche mit definierter Mindestgröße
- Durchschnittliche Euklidische Distanz
- Isolation von anderen Grünflächen: durchschnittlicher Abstand zur nächsten Grünfläche
- Proximity
- Versiegelungsgrad
- Anteil potentieller (klimaaktiver) Defizitflächen bezogen auf das administrative Stadtgebiet

Diese Kennwerte ermöglichen vorrangig quantitative Aussagen. Mittels der Sentinel-Klassifikation können zusätzlich auch qualitative Aussagen bezüglich der Vegetationsstruktur (Laubholz, Nadelholz und Wiese) und ihrer Verteilung getroffen werden. Für weitere qualitative Aussagen zur Grünausstattung, auch hinsichtlich der Vitalität des Grüns oder zu sozialräumlichen Aspekten mit Hinblick auf die Quantifizierung eines Gründefizits wurden in Fallbeispielen Methoden entwickelt, welche weiterführende Ergebnisse bieten. Die Ergebnisse sind jedoch nicht repräsentativ für Aussagen zur Grünausstattung Deutschlands.

Wie grün sind deutsche Städte und Stadttypen bundesweit? Wie lassen sich die Ergebnisse validieren?

Der Grünanteil bezogen auf das administrative Stadtgebiet beträgt im bundesdeutschen Durchschnitt für die Städte mit mehr als 5.000 Einwohnern 56,7 %. Bezogen auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche liegt der Durchschnitt bei 35 %. Die Grünbedeckung pro Einwohner bezogen auf das administrative Stadtgebiet beträgt durchschnittlich 2.995 m²/EW für das Jahr 2018.

Werden die Städte hinsichtlich ihrer Einwohnerzahl typisiert, so zeigt sich, dass vor allem kleine Mittelstädte und Kleinstädte von ihrem Grün im Umfeld, lockerer Bebauung und stärkerer Verzahnung des Umfelds mit der Siedlungsfläche profitieren. Großstädte und große Mittelstädte weisen durch dichtere Bebauung, der Ausprägung von Stadtzentren und ihrer stärkeren Besiedlung bis an die Stadtgrenzen weniger Grün auf. Mittelwert, Wertebereich und Median der Werte 2018 für die Städte typisiert hinsichtlich ihrer Einwohnerzahl kann nachfolgender Tabelle entnommen werden.

Tabelle 23

Mittelwerte, Wertebereich und Median der Grünausstattung 2018 für die Städte, typisiert nach Einwohnerzahlen

	Grünanteil bezogen auf das administrative Stadtgebiet in %	Grünanteil bezogen auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche in %	Grünbedeckung pro Einwohner bezogen auf das administrative Stadtgebiet in m ² /EW
Große Großstädte	Mittelwert: 44,3 Wertebereich: 31,6-54 Median: 44,8	Mittelwert: 30,2 Wertebereich: 18,4-40,5 Median: 29,7	Mittelwert: 177 Wertebereich: 74-311 Median: 167
Kleine Großstädte	Mittelwert: 49,0 Wertebereich: 17,6-79,2 Median: 48,2	Mittelwert: 29,6 Wertebereich: 14,47-46,2 Median: 30,2	Mittelwert: 376 Wertebereich: 83-889 Median: 339
Große Mittelstädte	Mittelwert: 52,9 Wertebereich: 18,3-86,6 Median: 52,9	Mittelwert: 31,4 Wertebereich: 19,7-46,4 Median: 31,3	Mittelwert: 742 Wertebereich: 148-2238 Median: 601
Kleine Mittelstädte	Mittelwert: 54,3 Wertebereich: 11,1-93,7 Median: 54,4	Mittelwert: 32,5 Wertebereich: 9,5-62,2 Median: 32,2	Mittelwert: 1657 Wertebereich: 105-17573 Median: 1193
Große Kleinstädte	Mittelwert: 58,5 Wertebereich: 7,8-97,6 Median: 58,5	Mittelwert: 35,4 Wertebereich: 10,2-72,5 Median: 35,6	Mittelwert: 3164 Wertebereich: 56-21765 Median: 2334
Kleine Kleinstädte	Mittelwert: 59,4 Wertebereich: 9,3-97,2 Median: 60,4	Mittelwert: 38,7 Wertebereich: 13,9-67,5 Median: 38,0	Mittelwert: 5098 Wertebereich: 101-31171 Median: 3803

Quelle: IÖR

Welche regionalen, stadtteilspezifischen und siedlungsstrukturellen Unterschiede gibt es?

Unterschiede in der Grünausstattung der Städte werden vorrangig von der Stadtgröße und der Stadtstruktur bestimmt. Umfassen Städte innerhalb ihrer administrativen Stadtgrenze auch ländlich geprägtes Umfeld, so wirkt sich dies positiv auf den Grünanteil aus. Dies ist insbesondere bei kleineren Städten zu beobachten. Daneben kann festgestellt werden, dass insbesondere in waldreicheren Gegenden wie dem Sauerland, dem Schwarzwald oder Brandenburg, die Städte einen höheren Grünanteil aufweisen. Innerstädtisch können ebenfalls Differenzen, abhängig von der Bebauungsstruktur, in der Grünausstattung festgestellt werden.

Wo fehlt Grün? Was bedeutet Unterversorgung quantitativ und qualitativ und wie lässt sich dies über Indikatoren abbilden? Wie verhält sich die Grünausstattung zu den sozialräumlichen Milieus?

Mit den Indikatoren Grünraumversorgung und Grünerreichbarkeit lassen sich Defizite in der Versorgung quantitativ bestimmen. Ergebnisse für beide Indikatoren liegen bundesweit zum Teil auch bis auf Stadtteilebene vor. Je kleinräumiger die Analyse erfolgt, desto besser können konkrete Handlungsbedarfe abgeleitet werden. Werden Aspekte der Umweltgerechtigkeit, die den Zusammenhang zwischen sozialer Lage und der lokalen Lebensumwelt sowie den individuellen Voraussetzungen für eine gesunde Lebensführung beschreibt (Bolte et al. 2012; Baumgart et al. 2018), einbezogen, können Aussagen zu sozialräumlichen Milieus getroffen werden.

Wie lässt sich eine indikatorengestützte Typologie des Stadtgrüns mit welcher Methode bundesweit hinreichend ermitteln?

Grün-Indikatoren können die Grundlage für eine indikatorengestützte Typologie des Stadtgrüns bilden. Mittels weiterführender Cluster-Analysen wäre es möglich, aus den bisherigen Ergebnissen für die Städte, Grünstadttypen abzuleiten. Ein erster Ansatz über die Bildung von Quintilen wurde in dem Projekt bereits initialisiert. Weitere Daten zur Stadtstrukturtypisierung, insbesondere zur Bodenversiegelung, Bebauung und

Einwohnerdichte wären die Basis für eine automatische Stadtstrukturtypisierung. Dazu besteht weiterer Forschungsbedarf.

Fallstudien zum Grünvolumen und Sozialräumlichen Aspekten

Wo lässt sich das Stadtgrünmonitoring durch repräsentative Fallstudien mit welchen Themen und Indikatoren ergänzen?

Es zeigt sich, dass auf lokaler Ebene für jede Fallstudienstadt zusätzliche räumlich hochauflösende Aussagen zu Versiegelung, Grünvolumen, Grünqualität und -defiziten aus den mittel- bis hochauflösten Daten abgeleitet werden können. Darüber hinaus können auch für alle Fallstudienstädte Analysen zur Temperatur zu besonders hitzebelasteten Gebieten zusätzliche Informationen bereithalten. Die Verbindung der Defizitbereiche und der Vitalitätsverluste geben Aufschluss über prioritäre Handlungsbereiche für die Stadt- bzw. Grünplanung. Für einen Ausschnitt in Potsdam konnte mittels eines jahreszeitlichen Vergleichs durch eine Sommer- und Winterbefliegung desselben Jahres der prozentuale Verlust von Grünvolumen im Winter bestimmt werden. Hieraus ergeben sich Diskussionsimpulse für die Grünausstattung im Hinblick auf Schadstoffbindung und Klimawirkung. Um Änderungen durch Bebauung und Entsiegelung aufzuzeigen, eignet sich eine multitemporale Auswertung gut für ein Grün-Monitoring wie an den Städten Potsdam, Leipzig und Berlin aufgezeigt werden konnte.

Was ist die geeignete Methodik, mit der sich die Grünausstattung und Facetten (Qualitäten) dieser kleinräumig, jedoch wirtschaftlich vertretbar ermitteln lassen?

Die Methode zur Berechnung des Grünvolumens aus Stereoluftbildern mit Infrarotkanal und einem daraus abgeleiteten Oberflächenmodell und True-Orthobilds eignen sich sehr gut, um Grünvolumen mit einer hohen Auflösung von 20 bis 50 cm flächendeckend zu bestimmen. Die Befliegungen finden in der Regel aller drei Jahre statt. Sehr hilfreich für die valide Grünvolumenbestimmungen sind Aufnahmen des nahen Infrarots sowie Aufnahmen der Vegetation im belaubten Zustand. Wirtschaftlich günstiger stellt sich die Methodik zur Bestimmung des Grünvolumens aus Sentinel-2-Daten und einem bereits vorliegenden Grünvolumen für eine strukturreiche Stadt dar. Sentinel-2-Daten sind kostenfrei verfügbar und können nach einer Vorprozessierung direkt verwendet werden. Somit ließ sich anhand einer Referenzstadt, bei der die Ermittlung des Grünvolumens nach ersterer Methode erfolgte, das Grünvolumen auch für mehrere Städte ableiten. Allerdings muss man hier die geringere räumliche Auflösung von Sentinel-2 von 10 m in Kauf nehmen.

Wie unterschiedlich gestalten sich die Grünausstattung und deren Facetten innerhalb definierter Fallstudiengebiete?

Untersuchungen des Grünvolumens geben Aufschluss über die Verteilung des Grüns in der Stadt. So zeigt sich in den Fallstudienstädten Saalfeld, Hanau und Bielefeld, dass trotz eines hohen Anteils von Grünvolumen am Gesamtgebiet nur geringe Grünvolumenanteile auf die Ortslagen fallen. Hier bietet sich Potential für eine Klimaanpassung, um den Grünanteil zu erhöhen. Dies trifft auch auf Hanau zu, wo sich die höchsten Temperaturen im langjährigen Mittel in der Ortslage im Vergleich zu den anderen Städten zeigen. Berlin hingegen weist als Metropole ein großes Grünvolumen bei gleichzeitig großer Ortslage auf. Hier ist es sehr wichtig, dass bei einer künftigen positiven Stadtentwicklung mit Bevölkerungszuwachs das Grünvolumen erhalten bleibt bzw. gefördert wird, um einer starken Überwärmung vorzubeugen.

Sind die Methoden und Ergebnisse zu Grünvolumen und den Spezialauswertungen übertragbar?

Mit den gezeigten Methoden lassen sich gute Ergebnisse erzielen. Zudem können Spezialauswertungen zu Temperatur, Vitalität und Zeitvergleichen mit ähnlichem Aufwand für Städte unterschiedlicher Größenkategorien durchgeführt werden. Für große Städte geht allerdings die Berechnung von Oberflächenmodellen mit einem erhöhten Zeitaufwand einher, weswegen für Berlin ein anderer Ansatz gewählt wurde.

Die Übertragbarkeit der Methodik von Oberflächentemperatur- und Vitalitätsanalyse ist auf Grund der hohen zeitlichen Auflösung der Sentinel-2 und Landsat-Satelliten gegeben. Auch die Anwendung der Methodik zu multitemporalen Auswertungen ist für andere Städte möglich, sofern geeignete Luftbildaufnahmen und Oberflächenmodelle verfügbar sind.

Für die Bestimmung der Temperatur und Vitalität sollten nur wolkenfreie Satellitenaufnahmen genutzt werden, um Verfälschungen durch Wolkenschatten und -ränder auszuschließen. Bei den hochaufgelösten Luftbildaufnahmen, beispielsweise für den Sommer-Winter-Vergleich, besteht dieses Problem nicht. Hier ist die Limitierung durch zumeist nur einmalige Befliegungen innerhalb eines Jahres gegeben. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse des Sommer-Winter-Vergleichs für Potsdam ist als Richtwert für ähnliche Stadtgebiete möglich, für weitergehende Aussagen bedarf es zusätzlicher Untersuchungen. Im gesamten Überschneidungsbereich zeigen sich saisonale Grünvolumenverluste um 50-60 % im Winter.

Bei der Ergebnisinterpretation ist zu beachten, dass es sich bei den Spezialauswertungen zur Temperatur um die Oberflächentemperatur und nicht direkt um die Lufttemperatur handelt. Ein direkter Zusammenhang mit beispielsweise gesundheitlichen Belastungen ist daher nicht gegeben, jedoch kann die Verteilung und Wertebereich der Werte eine Approximation darstellen. Neben der Lufttemperatur spielen für die gefühlte Wärme auch Luftfeuchtigkeit, Strahlung und Wind eine Rolle.

Ansätze eines Monitorings zum Stadtgrün

Wie kann ein Dienst zum Stadtgrünmonitoring aufgebaut werden und wie kann dieser in Monitoringsysteme eingespeist werden (u. a. Web-Anwendung, laufende Raumb Beobachtung des BBSR)?

Die Sentinel-2-Mission ist gesichert und liefert auch in den nächsten Jahren umfangreiche Daten, um weitere Landbedeckungsklassifikationen abzuleiten, welche die Grundlage für ein Monitoring der Grünausstattung der deutschen Städte bilden. Ein Monitoring aller sechs Jahre wäre aus derzeitiger Sicht optimal. Die Ergebnisse können in einer Web-Anwendung, verortet beispielsweise bei der Webseite „Grün in der Stadt“, dargestellt werden. Des Weiteren bieten sich für den Ergebnistransfer verschiedene etablierte Plattformen an, die die gewonnenen Indikatoren in Form von Karten, Diagrammen und Tabellen präsentieren. Dazu gehören der Monitor der Siedlungs- und Freiraumentwicklung des Leibniz- Instituts für ökologische Raumentwicklung (IÖR-Monitor; www.ioer-monitor.de) für Indikatorwerte und das Stadtgrünraster selbst, der EOC Geoservice des DLR für den Download der Landbedeckungsklassifikation und die Anwendung Monitoring Stadtregionen des Instituts für Landes- und Stadtentwicklungsforschung (ILS; www.ils-stadtregionen.de) oder die Webanwendung INKAR - Indikatoren und Karten zur Raum- und Stadtentwicklung des BBSR für weitere Auswertungen an.

Welche Stadttypen lassen sich im Rahmen des Projektes und eines künftigen Monitorings flächendeckend abbilden?

Die aus der Landbedeckungsklassifikation ermittelten Kennwerte der Grün-Indikatoren für die deutschen Städte können eine Grundlage für die Bildung von Stadttypen darstellen, da die Landbedeckungsklassifikation in gleicher Qualität für alle Städte vorliegt.

8 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Aus den in dem Projekt hervorgegangenen Ergebnissen leitet sich weiterer Forschungsbedarf ab, der nun folgend dargestellt werden soll.

8.1 Verbesserung des Klassifikationsproduktes in Hinblick auf das Change Detection

Ein entscheidender Punkt für die Verbesserung einer Klassifikation ist immer die Verfügbarkeit hochgenauer Referenzdaten. So war ein Vorschlag von Vertretern der Fallstudienstädte, hochgenaue Referenzdaten aus dem Datenfundus von Städten aufzunehmen. Diese könnten für ein Training und eine Validierung einer Landbedeckungsklassifikation genutzt werden. Dies ist grundsätzlich denkbar, jedoch müssen für eine bundesweite Analyse die Daten für die verschiedenen Städte konsistent aufgenommen und klassifiziert sein. Andernfalls ist mit großen Unsicherheiten bei der Bewertung der Ergebnisse durch die Unterschiedlichkeit der Daten zu rechnen. Auch müsste eine ausreichend große Anzahl dieser Punkte für alle Zielklassen vorhanden sein, um ein valides Training des Algorithmus auf diesen Daten abzusichern.

Für das Training und die Validierung des Klassifikationsproduktes wurden ca. 20.000 Referenzpunkte genutzt. Pflugmacher et al. (2019) verwendet in einer vergleichbaren Studie über 200.000 Referenzpunkte für eine Landbedeckungsklassifikation für ganz Europa. Eine weitere Landbedeckungsklassifikation für Deutschland mit Fokus auf Kulturpflanzen wurde mit ca. 40.000 Referenzpunkten berechnet (Griffiths/Nendel/Hostert 2019). Zusätzlich zu der hohen Anzahl an Referenzpunkten darf die Limitierung des Sensors Sentinel-2 nicht außer Acht gelassen werden. Die räumliche Auflösung von 10 m bedingt Mischpixeln, insbesondere in besonders heterogenen Gebieten, wie locker bebauten Gebieten. Eine eindeutige Klassenzuweisung ist dann nicht möglich. Dieses Problem könnte auch durch den Einsatz kleinräumiger Referenzdaten nicht gelöst werden. Jedoch können sie für eine Validierung des Ergebnisses genutzt werden und sind zudem für höher auflösende Landbedeckungsklassifikationen (z. B. Biotopkartierungen innerhalb von Stadtquartieren) einsetzbar.

Auch eine Einbeziehung der Klassifikation 2015 als Eingangsdaten für den nächsten Zeitschnitt könnte in Betracht gezogen werden. Dabei würde sich die Klasse eines Pixels im nächsten Zeitschnitt nur ändern, wenn ein bestimmter Schwellwert überschritten wurde, der anhand der berechneten Indizes gebildet werden könnte. Beispielsweise könnte der NDVI oder eine Kombination mehrerer Layer genutzt werden. Für die zusätzliche Klasse „durchgrünte Bebauung“ wurde ein Schwellwert anhand des NDVI gebildet. Für das beste Resultat müssten einige Tests vollzogen werden. Aber durch die Unsicherheit des Klassifikationsproduktes 2015 (Gesamtgenauigkeit 93,6 %) könnten eventuell auch mehr Fehlklassifikationen generiert werden. Dies kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht abschließend geklärt werden und sollte in künftigen Untersuchungen betrachtet werden.

Insgesamt gibt es so viele Variationsmöglichkeiten der Einbeziehung von Zusatzdaten, dass deren individuelle Auswirkungen auf das Gesamtklassifikationsergebnis nicht im Projektrahmen ausreichend systematisch untersucht werden konnten.

8.2 Typologie des Stadtgrüns

Stadtgrün ist ein elementarer Bestandteil der Stadtstruktur. Die Landbedeckungsklassifikation bietet eine Erfassung des Stadtgrüns unabhängig von der Nutzung, den Eigentumsverhältnissen bis zu einer Mindestgröße von 100 m², unterteilt in Laubholz, Nadelholz und Wiese. Damit kann sie eine gute Quelle für das Stadtstrukturmerkmal Grün darstellen. Für eine automatisierte Stadtstrukturtypisierung bedarf es jedoch noch weiterer Strukturmerkmale wie Bodenversiegelung, Bebauung und Einwohnerdichte.

Neben den Stadtstrukturtypen, die eine Stadt in strukturelle Einheiten untergliedert, ist auch die Typisierung der Gesamtstadt hinsichtlich Grüns von Interesse. Für die Bildung von Grünstadttypen bedarf es umfangreicher Cluster-Analysen, bei denen die verschiedenen Kennwerte der Indikatoren, für die durch die Nutzung der Landbedeckungsklassifikation bundesweit Ergebnisse vorliegenden, eine Basis bilden könnten.

8.3 Kombination mit weiteren Datensätzen

Eine Kombination des Stadtgrünrasters mit weiteren Datensätzen in Hinblick auf eine präzisere Abbildung von weiteren Aspekten des urbanen Grüns ist denkbar. So bietet der High Resolution Imperviousness Layer des Copernicus-Programms und die Landnutzungsklassifikation Corine Land Cover, aufgrund der zeitlichen Konsistenz und der Verwendung von Sentinel-2-Daten, mögliche Synergieeffekte bei einer kombinierten Auswertung.

Auch weitere europäische Copernicus-Datensätze könnten hinsichtlich ihres Mehrwertes einer kombinierten Auswertung mit dem Stadtgrünraster geprüft werden, z. B. die High Resolution Layer Forest, Grassland, Small Woody Features oder Urban Atlas Street Tree Layer, denn auch diese Datensätze werden im Dreijahresintervall erhoben.

Durch eine Verschneidung der Landbedeckungsklassifikation mit den Geometrien von Geobasisdaten könnten die jeweiligen mittleren Grünanteile bzw. deren Wertebereiche der ATKIS- bzw. ALKIS-Objektarten der tatsächlichen Nutzung insbesondere von baulichen Strukturen ermittelt werden.

Zudem ermöglicht die Landbedeckungsklassifikation durch die Identifizierung bebauter und versiegelter Flächen eine Abschätzung der Bodenversiegelung auf verschiedenen administrativen Gebietseinheiten. Auch hier könnte analog zum Grünanteil durch die Verschneidung mit den Polygonen baulicher Nutzungsarten von ALKIS- bzw. ATKIS-Objektarten deren mittlerer Bodenversiegelungsgrad bestimmt werden.

8.4 Grünvolumen für kommunale Planungen

Das ermittelte Grünvolumen eignet sich sehr gut als Kontrollinstrument für städtische Planungen, beispielsweise als Verifizierungsinstrument für das städtische Baumkataster und dürre- und hitzebedingte Schäden. Neben der Verwendung als Indikator für Klimaanpassungsmaßnahmen zum Thema Hitze sollte der Eingang des Grünvolumens als Standardgröße für Ausgleichsmaßnahmen in Bauleitplanungen bundesweit forciert werden.

8.5 Verbesserung der sozialräumlichen Indikatorik

In der Zusammenfassung der sozialräumlichen Auswertungen zeigt sich, dass die Auswahl der Gebietskulissen des Stadtgrüns eine entscheidende Rolle für die Ergebnisse spielt, diese aber nicht immer ohne Zweifel getroffen werden kann. So lässt sich mit den zur Verfügung stehenden Daten aus unterschiedlichen Quellen (ALKIS, ATKIS, Stadtgrünraster) kaum eine Aussage treffen, welche Objektarten und Klassen des Stadtgrüns öffentlich zugänglich sind oder Zugangsbeschränkungen unterliegen. Am ehesten ist dies noch mit ALKIS-Daten möglich. Aber auch hier kommen Beschränkungen zum Tragen, die nicht nur aufgrund von Privatbesitz den Zutritt unterbinden oder erschweren. Auch Öffnungszeiten, Eintrittspreise oder Konflikte in der Nutzung spielen eine Rolle. Letzteres ist vor allem dann relevant, wenn zu wenig Grünfläche pro Einwohner verfügbar ist. Die Folgen sind Übernutzungen durch unterschiedliche Interessensgruppen und ihrem möglicherweise exkludierend wirkenden Territorialverhalten.

Die hier präsentierte Indikatorik legt deshalb Wert darauf, die Auswahl der Gebietskulissen fachlich herzuleiten und zu dokumentieren bzw. im Zweifel mit Szenarien an Gebietskulissen zu arbeiten (z. B. Vegetation insgesamt, Grüne Freiflächen inkl. Wald, öffentlich zugängliche Parks und Grünanlagen). Die fachliche Herleitung orientiert sich an der Literatur zur Grünraumversorgung und ihren Ausführungen als städtebauliche Orientierungswerte. Auch diese geben allerdings nicht präzise vor, welche Objektarten und Klassen zu nutzen sind, so dass ein Interpretationsspielraum verbleibt. So ist zum Beispiel bei der Defizitanalyse zu berücksichtigen, dass im Wohnumfeld umgebendes Grün aus Wald und Freiflächen eine Ersatzfunktion für öffentlich gestaltete Parks und Grünanlagen bieten kann, sofern dieses in fußläufiger Erreichbarkeit zugänglich ist. Dies ist typischerweise in städtischen Randlagen der Fall. Bezieht man somit Wälder als Potenziale für die Grünraumversorgung mit ein, so zeigen Auswertungen nach sozialer Schicht und den klimainduzierten Gefahren von Extremereignissen wie Hitze auf, wo benachteiligten Gruppen Stadtgrün fehlt. Diese Indikatoren sind insofern aufschlussreich, als dass sie den Handlungsbedarf für die kommunale Grünflächenplanung räumlich beschreiben und verdeutlichen. Perspektivisch wäre ein Monitoring defizitärer Grünraumversorgung nach sozialer Schicht im Zeitverlauf wünschenswert, wie es hier in Ansätzen für die Stadt Düsseldorf gezeigt wurde.

Weiterhin besteht großes Potenzial in der Einbindung der Zivilgesellschaft für die wohnortnahe Grünraumversorgung. So könnten künftig zum Beispiel im Rahmen von Citizen-Science-Projekten Potenziale im Wohnumfeld identifiziert werden, die eine Erhöhung hitzedämpfender Grünvolumina zum Ziel haben. Die vorliegende Indikatorik bietet einen ersten theoretischen Rahmen mit praktischen Umsetzungsbeispielen, auf denen derartige Weiterentwicklungen aufbauen könnten. Nicht nur aufgrund dieser Anschlussmöglichkeiten zeigen die vorliegenden Auswertungen den weiteren Forschungsbedarf auf. Aufgrund der Beschränkungen im Projekt konnten hier nur pilothafte Auswertungen für Fallbeispiele erfolgen, deren Anwendbarkeit in der Praxis weiterer Tests und der Entwicklung methodischer Handreichungen bedarf. Zudem besteht das Potenzial, das bestehende und neu aufkommende technische Möglichkeiten zur Automatisierung der Indikatorentwürfe die Reichweite und Verwertbarkeit der Ergebnisse deutlich erhöhen.

8.6 Präsentation der Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurde eine Web-Anwendung konzipiert, die Ergebnisse ausgewählter Kennwerte für die Städte präsentieren sowie Download-Möglichkeiten für das Stadtgrünraster Deutschlands und der modifizierten Landbedeckungsklassifikation bieten. Eine Umsetzung dieser Konzeption im Rahmen der Website „Grün in der Stadt“ wird empfohlen. Somit können die Projektergebnisse und Daten gebündelt mit weiteren Angeboten zum Stadtgrün dargestellt werden.

Neben der Web-Präsentation bietet sich für die Kommunikation der Ergebnisse des Projektes in den Städten eine entsprechende Broschüre an. Neben der Kurzbeschreibung von Methoden können beispielhaft Ergebnisse ausgewählter Städte und deren Verwendbarkeit und Nutzen im kommunalen Alltag beschrieben werden. Damit kann eine höhere Akzeptanz für die Verwendung der im Projekt erhobenen Daten erzielt werden.

9 Literaturverzeichnis

- Bartesaghi Koc, C.; Osmond, O.; Peters, A., 2016:** A Green Infrastructure Typology Matrix to Support Urban Microclimate Studies. *Procedia Engineering*, vol. 169. DOI:10.1016/j.proeng..10.022.
- Barton, H., 2016:** City of Well-being. A Radical Guide to Planning: Taylor & Francis.
- Baumgart, S.; Köckler, H.; Ritzinger, A.; Rüdiger, A., 2018:** Planung für gesundheitsfördernde Städte. *Forschungsberichte der ARL*.
- BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2017:** Handlungsziele für Stadtgrün und deren empirische Evidenz – Indikatoren, Kenn- und Orientierungswerte. Bonn.
- BBSR – Bundesinstitut für Bau, Stadt- und Raumforschung, 2018:** Handlungsziele für Stadtgrün und deren empirische Evidenz. Bundesinstitut für Bau, Stadt- und Raumforschung. Bonn. Online verfügbar unter https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2018/handlungsziele-stadtgruen-dl.pdf;jsessionid=8C90A82C768A-D3AFBDEA622EF83EA959.live21303?__blob=publicationFile&v=1 [Zugriff: 20.10.2020].
- Bezirksregierung Köln, 2019:** ALKIS-OK NRW auf Basis AFIS-ALKIS-ATKIS Fachschema 6.0.1 (Stand 31.05.2009). Hg. v. Bezirksregierung Köln. Bezirksregierung Köln. Köln. Online verfügbar unter https://www.bezreg-koeln.nrw.de/brk_internet/geobasis/liegenschaftskataster/alkis/vorgaben/pflichtenheft_03/anlage_03_alkis_nrw_ok_max_v6_0_1.htm [Zugriff: 05.11.2020].
- BKG – Bundesamt für Kartographie und Geodäsie BKG, 2020:** Dokumentation - Digitales Landbedeckungsmodell für Deutschland LBM-DE2018. Online 5 verfügbar unter https://sg.geodatenzentrum.de/web_public/gdz/dokumentation/deu/lbm-de2018.pdf
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2015:** Grün in der Stadt – Für eine lebenswerte Zukunft. Grünbuch Stadtgrün, 1st ed. Berlin.
- BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2017:** Weißbuch Stadtgrün. Grün in der Stadt – Für eine lebenswerte Zukunft, 1st ed. Berlin.
- Böhme, C.; Preuß, T.; Bunzel, A.; Reimann, B.; Seidel-Schulze, A.; Landua, D., 2015:** Umweltgerechtigkeit im städtischen Raum - Entwicklung von praxistauglichen Strategien und Maßnahmen zur Minderung sozial ungleich verteilter Umweltbelastungen. Deutsches Institut für Urbanistik gGmbH (Difu). Berlin.
- Bolte, G.; Bunge, C.; Hornberg, C.; Köckler, H.; Mielck, A., 2012:** Umweltgerechtigkeit durch Chancengleichheit bei Umwelt und Gesundheit. In: *Umweltgerechtigkeit. Chancengleichheit bei Umwelt und Gesundheit: Konzepte, Datenlage und Handlungsperspektiven*, S. 15–37.
- Breiman, L., 2001:** Random Forests. *Machine Learning* 45 (1), S. 5–32.
- Conrad, C.; Goessl, A.; Lex, S.; Metz, A.; Esch, T.; Konrad, C.; Goettlicher, G.; Dech, S., 2010:** Mapping crop distribution in administrative districts of southwest Germany using multi-sensor remote sensing data.“ In *SPIE Remote Sensing 2010*, Toulouse, France, Sep.
- COPERNICUS: Land.** <https://land.copernicus.eu/>
- COPERNICUS, 2019:** Programme. Corine Land Cover Classes. <https://land.copernicus.eu/Corinelandcoverclasses.eps.75dpi.png/view> [Zugriff: 06.03.2019].
- COPERNICUS, 2020:** Urban Atlas. <https://land.copernicus.eu/user-corner/publications/ua-flyer/view> [Zugriff: 20.10.2020].
- D’Andrimont, R.; Yordanov, M.; Martinez-Sanchez, L.; Eiselt, B.; Palmieri, A.; et al., 2020:** Harmonised LUCAS in-situ land cover and use database for field surveys from 2006 to 2018 in the European Union. *Sci Data* 7, S. 352. DOI: 10.1038/s41597-020-00675-z.

- Demuzere, M.**; Orru, K.; Heidrich, O.; Olazabal, E.; Geneletti, D.; Orru, H.; et al., 2014: Mitigating and adapting to climate change. Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. In: *Journal of environmental management* 146, S. 107–115. DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.07.025.
- DIN EN ISO 9241-210**, 2011: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme.
- European Commission**, 2013: Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Grüne Infrastruktur (GI) – Aufwertung des europäischen Naturkapitals. COM(2013) 249 final. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52013DC0249> [Zugriff: 06.03.2019].
- ESA – European Space Agency**, 2013: Sentinel-2 User Handbook. Online verfügbar unter https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
- ESA – European Space Agency**, 2019: Sentinel-2. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> [Zugriff: 04.12.2019].
- Eurostat**: Land cover/use statistics. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/lucas> [Zugriff: 17.01.2019].
- Fernández-Delgado, M.**; Cernadas, E.; Barro, S.; Amorim D., 2014: Do we Need Hundreds of Classifiers to Solve Real World Classification Problems? In: *Journal of Machine Learning Research* 15 (1), S. 3133–3181.
- Fina, S.**; Gerten, Ch.; Gehrig-Fitting, K.; Rönsch, J., 2018: Was leistet Geomonitoring für die Stadtforschung? Das Monitoring StadtRegionen und das Kommunalpanel als aktuelle Anwendungsbeispiele. Online verfügbar unter https://www.ils-forschung.de/wp-content/uploads/2019/03/180622_trend_extra_online.pdf
- Fuller, R. A.**; Gaston, K. J., 2009: The scaling of green space coverage in European cities. In: *Biology letters* 5 (3), S. 352–355. DOI: 10.1098/rsbl.2009.0010.
- Galvão, L. S.**; Formaggio, A. R.; Tisot, D. A., 2005: Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. *Remote Sensing of Environment* 94, S. 523–534. DOI:10.1016/j.rse.2004.11.012.
- Gordon, S. I.**, 1980: Utilizing Landsat imagery to monitor land-use change: A case study in Ohio. *Remote Sensing of Environment*, 9 (3), S. 189–196.
- Grădinaru, S. R.**; Hersperger, A. M., 2018: Green infrastructure in strategic spatial plans. Evidence from European urban regions. In: *Urban Forestry & Urban Greening*. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.04.018.
- Grunewald, K.**; Richter, B.; Meinel, G.; Herold, H.; Syrbe, R.-U., 2016: Entwicklung nationaler Indikatoren zur „Erreichbarkeit von öffentlichen Grünflächen“ für die Bewertung der Ökosystemleistung „Erholung in der Stadt“. *Naturschutz und Landschaftsplanung* 48 (7), S. 218–226.
- Hansen, R.**; Pauleit, S., 2014: From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas. In: *Ambio* 43 (4), S. 516–529. DOI: 10.1007/s13280-014-0510-2.
- Hennersdorf, J.**; Lehmann, I., 2014: Grünausstattung von Städten und Regionen und klimatische Wirkungen von Stadtgrün. In: Wende, W.; Rößler, S.; Krüger, T. (Hrsg.): *Grundlagen für eine klimawandelangepasste Stadt- und Freiraumplanung*. Berlin: Rhombos-Verlag, 2014, (Publikationsreihe des BMBF-geförderten Projektes REGKLAM – Regionales Klimaanpassungsprogramm für die Modellregion Dresden; 6), S. 21–41.
- Hussain, M.**; Chen, D.; Cheng, A.; Wei, H.; Stanley, D., 2013: Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 80, S. 91–106.
- IÖR – Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung**, 2019: Indikator. <https://www.ioer-monitor.de/methodik/glossar/i/indikator/> [Zugriff: 17.04.2019].

- Jiménez-Muñoz, J. C.; Cristóbal, J.; Sobrino, J. A.; Sòria, G.; Ninyerola, M.; Pons, X., 2009:** „Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat thermal-infrared data“. In: IEEE Transactions on geoscience and remote sensing 47.1, S. 339–349.
- Jiménez-Muñoz, J. C.; Sobrino, J. A.; Skokovic, D.; Mattar, C.; Cristóbal, J., 2014:** „Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data“. In: IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 11.10, S. 1840–1843.
- Johansen, K.; Arroyo, L. A.; Phinn, S.; Witte, C., 2010:** Comparison of geo-object based and pixel-based change detection of riparian environments using high spatial resolution multi-spectral imagery. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 76 (2), S. 123–136.
- Khatami, R.; Mountrakis, G.; Stehman, S. V., 2016:** A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes: General guidelines for practitioners and future research. Remote Sensing of Environment, 177, S. 89–100.
- Krüger, T.; Held, F.; Hoehstetter, S.; Goldberg, V.; Geyer, T.; Kurbjuhn, C., 2013:** A new heat sensitivity index for settlement areas. In: Urban Climate, 6, S. 63–81. DOI: 10.1016/j.uclim.2013.09.003.
- LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2020:** Fachinformationssystem Klimaanpassung. Thermische Belastung. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf. Online verfügbar unter <http://www.klimaanpassung-karte.nrw.de/index.html?feld=urbane%20R%C3%A4ume¶m=Klimaanalyse&indikator=Klimaanalyse%20Gesamtbetrachtung> [Zugriff: 06.11.2020].
- Lang, S.; Tiede, D., 2003:** vLATE Extension für ArcGIS – vektorbasiertes Tool zur quantitativen Landschaftsstrukturanalyse. Conference Paper- ESRI European User Conference 2003 Innsbruck, https://www.researchgate.net/publication/258892081_vLATE_Extension_fur_ArcGIS_-_vektor-basiertes_Tool_zur_quantitativen_Landschaftsstrukturanalyse [Zugriff: 12.08.2020].
- Lehmann, I.; Behnisch, M.; Gruhler, K.; Schumacher, U.; Deilmann, C.; Bräuer, A., 2017:** Zusammenhangsvermutungen. In: Deilmann, Clemens; Lehmann, Iris; Schumacher, Ulrich; Behnisch, Martin (Hrsg.): Stadt im Spannungsfeld von Kompaktheit, Effizienz und Umweltqualität – Anwendungen urbaner Metrik. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Leichtle, T.; Geiß, C.; Wurm, M.; Lakes, T.; Taubenböck, H., 2017:** Unsupervised change detection in VHR remote sensing imagery—an object-based clustering approach in a dynamic urban environment. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 54, S. 15–27.
- Lennon, M.; Scott, M., 2014:** Delivering ecosystems services via spatial planning. Reviewing the possibilities and implications of a green infrastructure approach. In: Town Planning Review 85 (5), S. 563–587. DOI: 10.3828/tpr.2014.35.
- Liquete, C.; Kleeschulte, S.; Dige, G.; Maes, J.; Grizzetti, B.; Olah, B.; Zulian, G., 2015:** Mapping green infrastructure based on ecosystem services and ecological networks. A Pan-European case study. In: Environmental Science & Policy 54, S. 268–280. DOI: 10.1016/j.envsci.2015.07.009.
- Ma, L.; Li, M.; Blaschke, T.; Ma, X.; Tiede, D.; Cheng, L.; Chen, Z.; Chen, D., 2016:** Object-based change detection in urban areas: The effects of segmentation strategy, scale, and feature space on unsupervised methods. Remote Sensing, 8 (9), S. 761.
- Mack, B.; Leinenkugel, P.; Kuenzer, C.; Dech, S., 2017:** A semi-automated approach for the generation of a new land use and land cover product for Germany based on Landsat time-series and Lucas in-situ data. Remote sensing letters, 8 (3), S. 244–253.
- Maes, J.; Barbosa, A.; Baranzelli, C.; Zulian, G.; Batista E Silva, F.; Vandecasteele, I.; et al., 2015:** More green infrastructure is required to maintain ecosystem services under current trends in land-use change in Europe. In: Landscape ecology 30 (3), S. 517–534. DOI: 10.1007/s10980-014-0083-2.

- McFeeters, S. K.**, 1996: The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. In: *International Journal of Remote Sensing*, 17 (7), S. 1425–1432.
- Meinel, G.; Krüger, T.**, 2014: Methodik eines Flächennutzungsmonitorings auf Grundlage des ATKIS-Basis-DLM. *KN Kartographische Nachrichten*, (6), S. 324–331.
- Meinel, G.; Sikder, S.; Krüger, T.**, 2021: IOER Monitor: A Spatio-Temporal Research Data Infrastructure on Settlement and Open Space Development in Germany. *Jahrbücher für Nationalökonomie und Statistik (Online First)*. DOI: 10.1515/jbnst-2021-0009.
- Mell, I. C.**, 2017: Green infrastructure. Reflections on past, present and future praxis. In: *Landscape Research* 42 (2), S. 135–145. DOI: 10.1080/01426397.2016.1250875.
- Mell, I.; Allin, S.; Reimer, M.; Wilker, J.**, 2017: Strategic green infrastructure planning in Germany and the UK. A transnational evaluation of the evolution of urban greening policy and practice. In: *International Planning Studies* 22 (4), S. 333–349. DOI: 10.1080/13563475.2017.1291334.
- Niemeyer, I.; Canty, M. J.**, 2002: Object oriented post-classification of change images. In *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology* (H. 4545, S. 100–108). International Society for Optics and Photonics.
- Pflugmacher, D.; Rabe, A.; Peters, M.; Hostert, P.**, 2019: Mapping pan-European land cover using Landsat spectral-temporal metrics and the European LUCAS survey. In: *Remote Sensing of Environment*, 221, S. 583–595.
- Quarmby, N. A.; Cushnie, J. L.**, 1989: Monitoring urban land cover changes at the urban fringe from SPOT HRV imagery in south-east England. *International Journal of Remote Sensing*, 10 (6), S. 953–963.
- Reyer, M.; Fina, St.; Siedentop, St.; Schlicht, W.**, 2014: Walkability is Only Part of the Story. Walking for Transportation in Stuttgart, Germany. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 11 (6), S. 5849–5865.
- Richter, B.; Grunewald, K.; Meinel, G.**, 2016: Analyse von Wegedistanzen in Städten zur Verifizierung des Ökosystemleistungsindikators“ Erreichbarkeit städtischer Grünflächen“. In: *AGIT Journal* 2, S. 472–481.
- Rouse, J. W.; Haas, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W.**, 1974: Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, In: S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (Hrsg.): *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium. Volume I: Technical Presentations*, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C., S. 309–317.
- Rusche, K.**, 2012: Ökonomischer Nutzen grüner Infrastruktur : mehr Lebensqualität durch Stadtgrün? In: *Berichte zur deutschen Landeskunde* 86 (3), S. 255–268.
- Rusche, K.; Fina, St.**, 2019: One size fits all? Die Qualität von Stadtgrün aus der Nutzerperspektive. In: G. Meinel, U. Schumacher, M. Behnisch und T. Krüger (Hg.): *Flächennutzungsmonitoring XI. Flächenmanagement – Bodenversiegelung – Stadtgrün*. Dresden: Rhombos Verlag (IÖR Schriften, 77), S. 211–221.
- Rusche, K.; Reimer, M.; Stichmann, R.**, 2019: Mapping and Assessing Green Infrastructure Connectivity in European City Regions. In: *Sustainability* 11 (6), S. 1819.
- Serra, P.; Pons, X.; Sauri, D.**, 2003: Post-classification change detection with data from different sensors: some accuracy considerations. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (16), S. 3311–3340.
- Schulze, H.-D.; Pohl, W.; Großmann, M.**, 1984: Gutachten: Werte für die Landschafts- und Bauleitplanung: Bodenfunktionszahl, Grünvolumenzahl. Schriftenreihe der Behörde für Bezirksangelegenheiten. Naturschutz und Umweltgestaltung Freie Hansestadt Hamburg. 9. 1. Aufl. Christians. Hamburg.
- Schwidersky, K.**, 1960: Kontrastübertragungsfunktion zur Bewertung der Bildgüte in der Photogrammetrie. S. 86–101, *Bildmess. u. Luftbildw.*, 28.
- Tucker, C. J.**, 1979: Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8 (2), S. 127–150.

- U.S. Geological Survey** (Hrsg.), 2016: Landsat 8 (L8) Data Users Handbook – Version 2.0. Sioux Falls: EROS, S. 1–106.
- Voskamp, I. M.; van de Ven, F. H. M.**, 2015: Planning support system for climate adaptation. Composing effective sets of blue-green measures to reduce urban vulnerability to extreme weather events. In: *Building and Environment* 83, S. 159–167. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.07.018.
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen**, (Hrsg.), 2016: *Der Umzug der Menschheit. Die transformative Kraft der Städte. Hauptgutachten. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung: Globale Umweltveränderungen.* Berlin: WBGU.
- Weigand, M.; Staab, J.; Wurm, M.; Taubenböck, H.**, 2020: Spatial and semantic effects of LUCAS samples on fully automated land use/land cover classification in high-resolution Sentinel-2 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 88, 102065.
- Wurm, M.; Taubenböck, H.; Schardt, M.; Esch, T.; Dech, S.**, 2011: Object-based image information fusion using multisensor earth observation data over urban areas. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2 (2), S. 121–147.
- Zha, Y.; Gao, J.; Ni, S.**, 2003: Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. In: *Int. J. Remote Sens.*, 24, S. 583–594.
- Zhu, Z.; Woodcock, C. E.**, 2014: Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote sensing of Environment*, 144, S. 152–171.
- Zillmann, E.; Gonzalez, A.; Montero Herrero, E. J.; Wolvelaer, J. van.; Esch, T.; Keil, M. H. W.; Garzon, A. M.**, 2014: Pan-European Grassland Mapping Using Seasonal Statistics From Multisensor Image Time Series. In: *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7 (8): S. 346–3472.

10 Anhang

10.1 LUCAS-Klassen

Die genaue Beschreibung der LUCAS-Daten und deren Unterscheidung kann im technischen Referenzdokument⁷ nachgelesen werden.

Landbedeckungsklasse	Verwendete LUCAS Klassen	Generell ausgeschlossene LUCAS Klassen
Bebaut	A	A13; A22 mit anderer Landnutzung als U21, U22, U31, U34, U36, U37; A30; B55; B71; B75; B83; Bx1; Bx2; C3; D10; E10; E30; F40; G50; H21; H23
Offener Boden	F10, F30	
Laubholz	C10, B71, B74	
Nadelholz	C21, C23	
Ackerland	B, außer B84	
Wiese	B84, D20, E20, H11, H12	
Wasser	G	

Quelle: DLR

10.2 Indikatorsteckbriefe

Indikator	Grünausstattung
Kennwert	Grünanteil bezogen auf das administrative Stadtgebiet
Maßeinheit	%
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt das Verhältnis des Grüns zur Gesamtfläche des administrativen Stadtgebietes. Dabei wird das Grün weder nach Nutzung, Funktion, Zugang oder ähnlichem unterschieden.
Bedeutung und Interpretation	Mit der Berechnung des Indikators auf unterschiedlichen Bezugsebenen können differenzierte Aussagen zum Grün in der Stadt getroffen werden: - Berechnung für die Gesamtstadt: Wie viel Grün ist grundsätzlich vorhanden/ Wie „grün“ ist die Stadt? Ermöglicht Stadtvergleiche - Berechnung für Stadtteile: Wie verteilt sich das Grün/Wo sind grüne/weniger grüne Stadtteile? (Hinweis auf Lebensqualität, Defizit) Ermöglicht Stadtteilvergleiche
Datengrundlage	Landbedeckungsklassifikation, Stadtgrenzen (VG250 Gemeindegrenzen), Stadtteilgrenzen (IÖR)
Methodik	Quotient aus der Fläche Grün und der Fläche des administrativen Stadtgebiets, multipliziert mit 100 Die Grünfläche bildet sich aus den Klassen 3, 4, 6 (Laubholz, Nadelholz und Wiese) der Landbedeckungsklassifikation.
Bemerkungen	Das administrative Stadtgebiet umfasst insbesondere bei kleineren Städten auch viel Umland, welches sich in einem hohen Grünanteil widerspiegelt. Daher ist dieser Kennwert nur bedingt geeignet für Aussagen zu innerstädtischem Grün.
Bezugsebenen	Städte ab 5.000 Einwohner, Stadtteile für Städte ab 50.000 Einwohner

Quelle: IÖR

(7)

<https://ec.europa.eu/eurostat/documents/205002/8072634/LUCAS2018-C3-Classification.pdf>

Indikator	Grünausstattung
Kennwert	Grünanteil bezogen auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche
Maßeinheit	%
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt das Verhältnis des Grüns zur Siedlungs- und Verkehrsfläche des administrativen Stadtgebietes. Dabei wird das Grün weder nach Nutzung, Funktion, Zugang oder ähnlichem unterschieden.
Bedeutung und Interpretation	Der Kennwert gibt einen Hinweis auf die Durchgrünung des Siedlungs- und Verkehrsraumes. Unter Abgrenzung der Siedlungs- und Verkehrsfläche werden land- und forstwirtschaftliche Flächen des Umfelds bei der Berechnung dieses Kennwertes nicht berücksichtigt, vielmehr erfolgt die Konzentration auf das „städtische Grün“ in Form von Parks, Alleen, Straßenbegleitgrün, Sportflächen, Friedhöfen etc.
Datengrundlage	Landbedeckungsklassifikation, Stadtgrenzen (VG250 Gemeindegrenzen), Stadtteilgrenzen (IÖR), aus dem ATKIS Basis-DLM abgeleitete IÖR-Monitor Basisgeometrie
Methodik	Quotient aus der Fläche Grün und der Siedlungs- und Verkehrsfläche, multipliziert mit 100 Die Grünfläche bildet sich aus den Klassen Laubholz, Nadelholz und Wiese (3, 4, 6) der Landbedeckungsklassifikation. Die Siedlungs- und Verkehrsfläche bildet sich aus Objekten des ATKIS Basis-DLMs, wobei Straßen innerhalb der Ortslage gepuffert dargestellt werden, außerhalb der Ortslage jedoch als Linienobjekte nicht in die Siedlungs- und Verkehrsfläche eingehen. Die Siedlungs- und Verkehrsfläche ist mit den Städten zu verschneiden, um eine Zuordnung zu den Städten zu gewährleisten.
Bemerkungen	Die Bildung der Siedlungs- und Verkehrsfläche ist auch nur auf Basis des ATKIS-BasisDLMs möglich.
Bezugsebenen	Städte ab 5.000 Einwohner, Stadtteile für Städte ab 50.000 Einwohner

Quelle: IÖR

Indikator	Grünraumversorgung
Kennwert	Grünbedeckung pro Einwohner bezogen auf das administrative Stadtgebiet
Maßeinheit	m ² /EW
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt das Verhältnis des Grüns zur Einwohnerzahl. Dabei wird das Grün weder nach Nutzung, Funktion, Zugang oder ähnlichem unterschieden.
Bedeutung und Interpretation	Dieser Kennwert gibt einen Hinweis auf die Relation des vorhandenen Grüns zur Einwohnerzahl (viel Grün/wenig EW vs. wenig Grün/viele EW) und kann somit potenzielle Defizite aufzeigen. Aussagen zu dem für die Einwohner tatsächlich nutzbaren Grün, für beispielsweise Erholungszwecke, sind auf dieser Ebene jedoch nicht möglich. Denn Barrieren, die einen Zutritt zu Grünflächen verhindern, Eigentumsverhältnisse und damit verbundene Betretungsbeschränkungen sowie der qualitative Ausstattungsgrad der Grünflächen werden nicht berücksichtigt. Vielmehr wird deutlich, welche Städte/Stadtteile bezogen auf ihre Einwohnerzahl, gut mit Grün ausgestattet sind.
Datengrundlage	Landbedeckungsklassifikation, Stadtgrenzen (VG250 Gemeindegrenzen) mit Einwohnerzahlen, Stadtteilgrenzen (IÖR) mit Einwohnerzahlen
Methodik	Quotient aus der Fläche Grün und der Einwohnerzahl des administrativen Stadtgebietes Die Grünfläche bildet sich aus den Klassen 3, 4, 6 (Laubholz, Nadelholz und Wiese) der Landbedeckungsklassifikation.
Bemerkungen	Das administrative Stadtgebiet umfasst insbesondere bei kleineren Städten mit wenigen Einwohnern auch viel Umfeld, welches sich in einem hohen Grünversorgungsgrad widerspiegelt. Daher nur bedingt geeignet für Aussagen zur Versorgung der Einwohner durch innerstädtisches Grün.
Bezugsebenen	Städte ab 5.000 Einwohner, Stadtteile für Städte ab 50.000 Einwohner

Quelle: IÖR

Indikator	Grünerreichbarkeit
Kennwert	Anteil der für Wohnen genutzten Siedlungsfläche in definierter Entfernung zu grünbedeckter Fläche mit definierter Mindestgröße
Maßeinheit	%
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt das Verhältnis der für Wohnen genutzten Siedlungsfläche, welche sich im definierten Einzugsgebiet von definierten Grünflächen (Grünflächen größer 1 Hektar: fußläufige Entfernung 300 m Luftlinie; Grünflächen größer 10 Hektar: mittlere Entfernung 700 m Luftlinie) befindet, zur Gesamtsiedlungsfläche für Wohnen. Dabei wird das Grün weder nach Nutzung, Funktion, Zugang oder ähnlichem unterschieden.
Bedeutung und Interpretation	Dieser Kennwert gibt einen Hinweis auf Erreichbarkeit des vorhandenen Grüns. Aussagen zu dem für die Einwohner tatsächlich nutzbaren Grün für beispielsweise Erholungszwecke sind auf dieser Ebene jedoch nicht möglich. Denn Barrieren in Form von nicht querbaren Verkehrsstrassen oder Umzäunungen, die einen Zutritt zu Grünflächen verhindern, Eigentumsverhältnisse und damit verbundene Betretungsbeschränkungen sowie der qualitative Ausstattungsgrad der Grünflächen werden nicht berücksichtigt. Vielmehr wird deutlich, welche Städte/Stadtteile bezogen auf die Größe und Verteilung ihrer Grünflächen, gut mit erreichbarem Grün ausgestattet sind.
Datengrundlage	Landbedeckungsklassifikation, Stadtgrenzen (VG250 Gemeindegrenzen), Stadtteilgrenzen (IÖR), ATKIS-BasisDLM
Methodik	Quotient aus der für Wohnen genutzten Siedlungsfläche, welche innerhalb eines Einzugsgebietes von Grünflächen liegt, und der Gesamtsiedlungsfläche mit Wohnnutzung, multipliziert mit 100 Die Grünfläche bildet sich aus den Klassen Laubholz, Nadelholz und Wiese (3, 4, 6) der Landbedeckungsklassifikation. Grünflächen bis 2 km außerhalb des administrativen Stadtgebietes werden in die Berechnungen einbezogen. Die für Wohnen genutzte Siedlungsfläche bildet sich aus den Objektarten „Wohnbebauung“ und „Fläche Gemischter Nutzung“ des ATKIS-BasisDLMs.
Bemerkungen	Die Definition der Größe der Grünflächen sowie deren Einzugsgebiet erfolgt nach Grunewald et al. (2016).
Bezugsebenen	Städte ab 5.000 Einwohner, Stadtteile für Städte ab 50.000 Einwohner

Quelle: IÖR

Indikator	Grünerreichbarkeit
Kennwert	Durchschnittliche Euklidische Distanz
Maßeinheit	m
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt die durchschnittliche Entfernung von Siedlungs-Rasterzellen zur nächstgelegenen Grün-Rasterzelle einer Grünfläche mit Mindestgröße 1 Hektar. Dabei wird das Grün weder nach Nutzung, Funktion, Zugang oder ähnlichem unterschieden.
Bedeutung und Interpretation	Dieser Kennwert gibt einen Hinweis auf die Erreichbarkeit des vorhandenen Grüns. Aussagen zu dem für die Einwohner tatsächlich nutzbaren Grün für beispielsweise Erholungszwecke sind auf dieser Ebene jedoch nicht möglich. Denn Barrieren in Form von nicht querbaren Verkehrsstrassen oder Umzäunungen, die einen Zutritt zu Grünflächen verhindern, Eigentumsverhältnisse und damit verbundene Betretungsbeschränkungen sowie der qualitative Ausstattungsgrad der Grünflächen werden nicht berücksichtigt. Vielmehr wird deutlich, wie weit Grünflächen durchschnittlich von Siedlungsflächen in den Städten/Stadtteilen entfernt sind.
Datengrundlage	Landbedeckungsklassifikation, Stadtgrenzen (VG250 Gemeindegrenzen), Stadtteilgrenzen (IÖR)
Methodik	Durchschnittliche Distanz baulich geprägter Siedlungsfläche zu nächstgelegener Grünfläche mit Mindestgröße 1 Hektar Die Grünfläche bildet sich aus den Klassen 3, 4, 6 (Laubholz, Nadelholz und Wiese) der Landbedeckungsklassifikation. Grünflächen bis 2 km außerhalb des administrativen Stadtgebietes werden in die Berechnungen einbezogen. Die Siedlungsfläche bildet sich aus der Klasse 1 (Versiegelt) der Landbedeckungsklassifikation.
Bemerkungen	Die Rastergröße bei der Berechnung der euklidischen Distanz beträgt 10 m analog der Landbedeckungsklassifikation.
Bezugsebenen	Städte ab 5.000 Einwohner, Stadtteile für Städte ab 50.000 Einwohner

Quelle: IÖR

Indikator	Grünraumvernetzung
Kennwert	Isolation von anderen Grünflächen: durchschnittlicher Abstand zur nächsten grünbedeckten Fläche
Maßeinheit	m
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt die Entfernung einer Grünfläche zu der ihr am nächsten liegenden Grünfläche. Dabei wird das Grün weder nach Nutzung, Funktion, Ausstattung oder ähnlichem unterschieden.
Bedeutung und Interpretation	Dieser Kennwert gibt einen Hinweis auf Vernetzung des vorhandenen Grüns. Aussagen zum Biotopverbund sind jedoch nicht möglich, da das Grün nicht hinsichtlich seiner Ausstattung und Funktion unterschieden wird. Vielmehr wird deutlich, ob und wo Grünflächen eher enger miteinander verknüpft oder isoliert sind.
Datengrundlage	Landbedeckungsklassifikation, Stadtgrenzen (VG250 Gemeindegrenzen), Stadtteilgrenzen (IÖR), Bundeslandgrenzen (VG250 Landesgrenzen)
Methodik	Durchschnitt aller Distanzen benachbarter Grünflächen im Stadtgebiet Die Grünfläche bildet sich aus den Klassen Laubholz, Nadelholz und Wiese (3, 4, 6) der Landbedeckungsklassifikation. Grünflächen bis 2 km außerhalb des administrativen Stadtgebietes werden in die Berechnungen einbezogen.
Bemerkungen	Bei der Betrachtung des Durchschnitts von Distanzen muss beachtet werden, dass sich gleiche Beträge der Durchschnitte aus annähernd gleichgroßen Abständen oder aus vielen kleinen und wenigen sehr großen Abständen ergeben können. Somit kann unklar sein, wie sich Grünflächen verteilen: gleichmäßig oder schwerpunktmäßig plus isolierter Flächen in weiter Entfernung.
Bezugsebenen	Städte ab 5.000 Einwohner, Stadtteile für Städte ab 50.000 Einwohner

Quelle: IÖR

Indikator	Grünraumvernetzung
Kennwert	Proximity
Maßeinheit	m
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt die Eingebundenheit einer Grünfläche. Dabei wird das Grün weder nach Nutzung, Funktion, Ausstattung oder ähnlichem unterschieden.
Bedeutung und Interpretation	Dieser Kennwert gibt einen Hinweis auf Vernetzung des vorhandenen Grüns. Ein hoher Wert zeigt eine starke Eingebundenheit durch große, nahe Grünflächen auf. Ein niedriger Wert weist auf eine isolierte Lage mit nur kleinen, weiter entfernten Grünflächen hin. Aussagen zum Biotopverbund sind nicht möglich. Vielmehr wird deutlich, wo Grünflächen enger miteinander verknüpft oder weiter isoliert sind.
Datengrundlage	Landbedeckungsklassifikation, Stadtgrenzen (VG250 Gemeindegrenzen), Stadtteilgrenzen (IÖR), Bundeslandgrenzen (VG250 Landesgrenzen)
Methodik	Median aller Proximity-Werte (Summe der Quotienten aus Flächengröße und Distanz aller Grünflächen im festgelegten Suchradius um eine Grünfläche) Die Grünfläche bildet sich aus den Klassen Laubholz, Nadelholz und Wiese (3, 4, 6) der Landbedeckungsklassifikation.
Bemerkungen	Der Proximity-Puffer wurde auf 750 m festgelegt, (vgl. Lehmann et al. 2017), kann aber je nach Fragestellung angepasst werden.
Bezugsebenen	Städte ab 5.000 Einwohner, Stadtteile für Städte ab 50.000 Einwohner

Quelle: IÖR

Indikator	Klimaaktive Flächen
Kennwert	Versiegelungsgrad des administrativen Stadtgebietes
Maßeinheit	%
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt das Verhältnis der Versiegelung zur Gesamtfläche des administrativen Stadtgebietes.
Bedeutung und Interpretation	Versiegelte Flächen sind das Gegenteil von positiven klimaaktiven Flächen. Betrachtet für zwei Zeitschnitte als Differenz, kann eine Zunahme des Versiegelungsgrades auf den Verlust von klimaaktiver Flächen und Beeinträchtigungen des Stadtklimas hinweisen. Unabhängig vom Aspekt der Zeitdifferenz bietet der Versiegelungsgrad auch einen Hinweis auf stark versiegelte Bereiche und somit fehlendes ausgleichendes Grün.
Datengrundlage	Landbedeckungsklassifikation, Stadtgrenzen (VG250 Gemeindegrenzen), Stadtteilgrenzen (IÖR)
Methodik	Prozentualer Anteil der bebauten Fläche aus dem Stadtgrünraster an der administrativen Gebietsfläche, multipliziert mit 0,71. Der Korrekturfaktor von 0,71 ergibt sich aus der Verschneidung der Landbedeckungsklassifikation mit dem High Resolution Layer Imperviousness Degree aus dem europäischen Copernicus-Erdbeobachtungsprogramm.
Bemerkungen	Eine Zunahme bzw. Abnahme des Versiegelungsgrads innerhalb zweier Zeitschnitte kann auch auf Fehlklassifikationen in der Landbedeckungsklassifikation zurückzuführen sein, sodass die Aussagekraft des Kennwerts Veränderung des Versiegelungsgrades stark eingeschränkt ist.
Bezugsebenen	Städte ab 5.000 Einwohner, Stadtteile für Städte ab 50.000 Einwohner

Quelle: IÖR

Indikator	Klimaaktive Flächen
Kennwert	Anteil potentieller (klimaaktiver) Defizitflächen bezogen auf das administrative Stadtgebiet
Maßeinheit	%
Kurzbeschreibung	Der Indikator beschreibt das Verhältnis der potenziell klimaaktiven Defizitfläche (Siedlungsfläche außerhalb des klimatischen Wirkungsbereichs von Grün) zur Gesamtfläche des administrativen Stadtgebietes.
Bedeutung und Interpretation	Siedlungsflächen außerhalb des klimatischen Wirkungsbereichs von Grün können als potentielle klimaaktive Defizitfläche bezeichnet werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass eine klimatisch positive Wirkung von Grün- und Wasserflächen mit einer Mindestgröße von 1 Hektar bis zu 75 m in locker bebaute Bereiche reicht. Dicht bebaute Bereiche sind von dieser Wirkung ausgeschlossen. Die Defizitfläche setzt sich daher aus den dicht bebauten Bereichen, und Bereichen lockerer Bebauung außerhalb des klimatischen Wirkungsbereichs von Grün- und Wasserflächen zusammen. Dabei wird das Grün weder hinsichtlich Funktion, Nutzung und Ausstattung unterschieden.
Datengrundlage	Landbedeckungsklassifikation (mit Klasse 8 durchgrünte Bebauung), Stadtgrenzen (VG250 Gemeindegrenzen), Stadtteilgrenzen (IÖR)
Methodik	<p>Quotient aus der Defizitfläche und der Fläche des administrativen Stadtgebiets, multipliziert mit 100</p> <p>Die klimatische Defizitfläche setzt sich zusammen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - aus der versiegelten Fläche, gebildet aus der Klasse 1 (Versiegelt/Bebaut) der Landbedeckungsklassifikation, - der versiegelten Fläche mit starker Durchgrünung, gebildet aus der Klasse 8 (durchgrünte Bebauung) der Landbedeckungsklassifikation, welche nicht innerhalb des Wirkungsbereiches von Grün liegt <p>Die Grün- und Wasserflächen bilden sich aus den Klassen 3, 4, 6, 7 (Laubholz, Nadelholz, Wiese, Wasser) der Landbedeckungsklassifikation. Grün- und Wasserflächen bis 2 km außerhalb des administrativen Stadtgebietes werden in die Berechnungen einbezogen.</p>
Bemerkungen	Der klimatische Wirkungsbereich von Grün- und Wasserflächen wurde auf 75 m festgelegt (vgl. Lehmann et al. 2017), kann aber je nach Fragestellung angepasst werden.
Bezugsebenen	Städte ab 5.000 Einwohner, Stadtteile für Städte ab 50.000 Einwohner

Quelle: IÖR

10.3 Auswahl der getesteten Indices für die Vitalitätsanalyse

Index	Beschreibung	Quelle	Bänder	Formel
CTVI	Corrected Transformed Vegetation Index	Perry1984	red, nir	$(NDVI + 0.5) / \sqrt{abs(NDVI + 0.5)}$
DVI	Difference Vegetation Index	Richardson1977	red, nir	$s * nir - red$
EVI	Enhanced Vegetation Index	Huete1999	red, nir, blue	$G * ((nir - red) / (nir + C1 * red - C2 * blue + L_{evi}))$
EVI2	Two-band Enhanced Vegetation Index	Jiang 2008	red, nir	$G * (nir - red) / (nir + 2.4 * red + 1)$
GEMI	Global Environmental Monitoring Index	Pinty1992	red, nir	$((nir^2 - red^2) * 2 + (nir * 1.5) + (red * 0.5)) / (nir + red + 0.5) * (1 - (((nir^2 - red^2) * 2 + (nir * 1.5) + (red * 0.5)) / (nir + red + 0.5) * 0.25)) - ((red - 0.125) / (1 - red))$
GNDVI	Green Normalised Difference Vegetation Index	Gitelson1998	green, nir	$(nir - green) / (nir + green)$
MNDWI	Modified Normalised Difference Water Index	Xu2006	green, swir2	$(green - swir2) / (green + swir2)$
MSAVI	Modified Soil Adjusted Vegetation Index	Qi1994	red, nir	$nir + 0.5 - (0.5 * \sqrt{(2 * nir + 1)^2 - 8 * (nir - (2 * red))})$
MSAVI2	Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2	Qi1994	red, nir	$(2 * (nir + 1) - \sqrt{(2 * nir + 1)^2 - 8 * (nir - red)}) / 2$
NBRI	Normalised Burn Ratio Index	Garcia1991	nir, swir3	$(nir - swir3) / (nir + swir3)$
NDVI	Normalised Difference Vegetation Index	Rouse1974	red, nir	$(nir - red) / (nir + red)$
NDVIC	Corrected Normalised Difference Vegetation Index	Nemani1993	red, nir, swir2	$(nir - red) / (nir + red) * (1 - ((swir2 - swir2_{ccc}) / (swir2_{ccc} - swir2_{ccc})))$
NDWI	Normalised Difference Water Index	McFeeters1996	green, nir	$(green - nir) / (green + nir)$
NDWI2	Normalised Difference Water Index	Gao1996	nir, swir2	$(nir - swir2) / (nir + swir2)$
NRVI	Normalised Ratio Vegetation Index	Baret1991	red, nir	$(red/nir - 1) / (red/nir + 1)$
RVI	Ratio Vegetation Index		red, nir	red/nir
SATVI	Soil Adjusted Total Vegetation Index	Marslett2006	red, swir2, swir3	$(swir2 - red) / (swir2 + red + L) * (1 + L) - (swir3/2)$
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index	Huete1988	red, nir	$(nir - red) * (1 + L) / (nir + red + L)$
SLAVI	Specific Leaf Area Vegetation Index	Lymburger2000	red, nir, swir2	$nir / (red + swir2)$
SR	Simple Ratio Vegetation Index	Birth1968	red, nir	nir/red
TVI	Transformed Vegetation Index	Deering1975	red, nir	$\sqrt{(nir - red) / (nir + red) + 0.5}$
TTVI	Thiam's Transformed Vegetation Index	Thiam1997	red, nir	$\sqrt{abs((nir - red) / (nir + red) + 0.5)}$
WDVI	Weighted Difference Vegetation Index	Richardson1977	red, nir	$nir - s * red$

Quelle: www.rdr.io/cran/RStoolbox/man/spectralIndices.html

10.4 Flächenbilanzen Stadtgrünraster, ALKIS und ATKIS im Vergleich

In einem ersten Schritt wurden für die Zwecke der nachfolgenden Indikatorentwicklung ein Flächenabgleich zwischen den Gebietskulissen (1) der im Projekt entwickelten Landbedeckungsklassifikation und (2) der amtlichen Grünflächendatenbasis aus ALKIS für die Stadt Solingen vorgenommen. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Ergebnisse des Gesamtvergleichs mit (1) 5.989 ha und (2) 5.255 ha in ALKIS. Die Differenz dürfte sich maßgeblich aus der Abdeckung privater Flächen in (1) erklären, die in (2) nicht enthalten sein können.

Die Tabelle differenziert zudem für die Unterkategorien der enthaltenen Landbedeckungsklassen und den ALKIS-Objektarten. Die Zuordnung ist aufgrund der unterschiedlichen Definitionen der einzelnen Klassen nicht trennscharf möglich, es gibt sicherlich Überlappungen. Dennoch ergeben sich daraus Erkenntnisse für die Weiterverarbeitung der Daten und insbesondere die Interpretation der Ergebnisse.

Tabelle 24
Flächenbilanz Sentinel-2 und ALKIS Grünflächen

Sentinel-2		ALKIS	
Klasse	ha	Objektart	ha
Offener Boden	0,67	Friedhof	87,5
		Böschungfläche	148,8
		Heide	18,6
		SportFreizeitunterholung	512,1
		Sumpf	4,9
Subtotal	0,67		771,9
Laubwald	2.963	Wald	2.224,3
Nadelwald	634	Gehölz	256,6
		Dammwaldteich	1,4
Subtotal	3.597		2.482,3
Ackerland	493	Landwirtschaft	2.001,7
Wiese	1.898		
Subtotal	2.391		2.001,7
Total	5.989		5.255

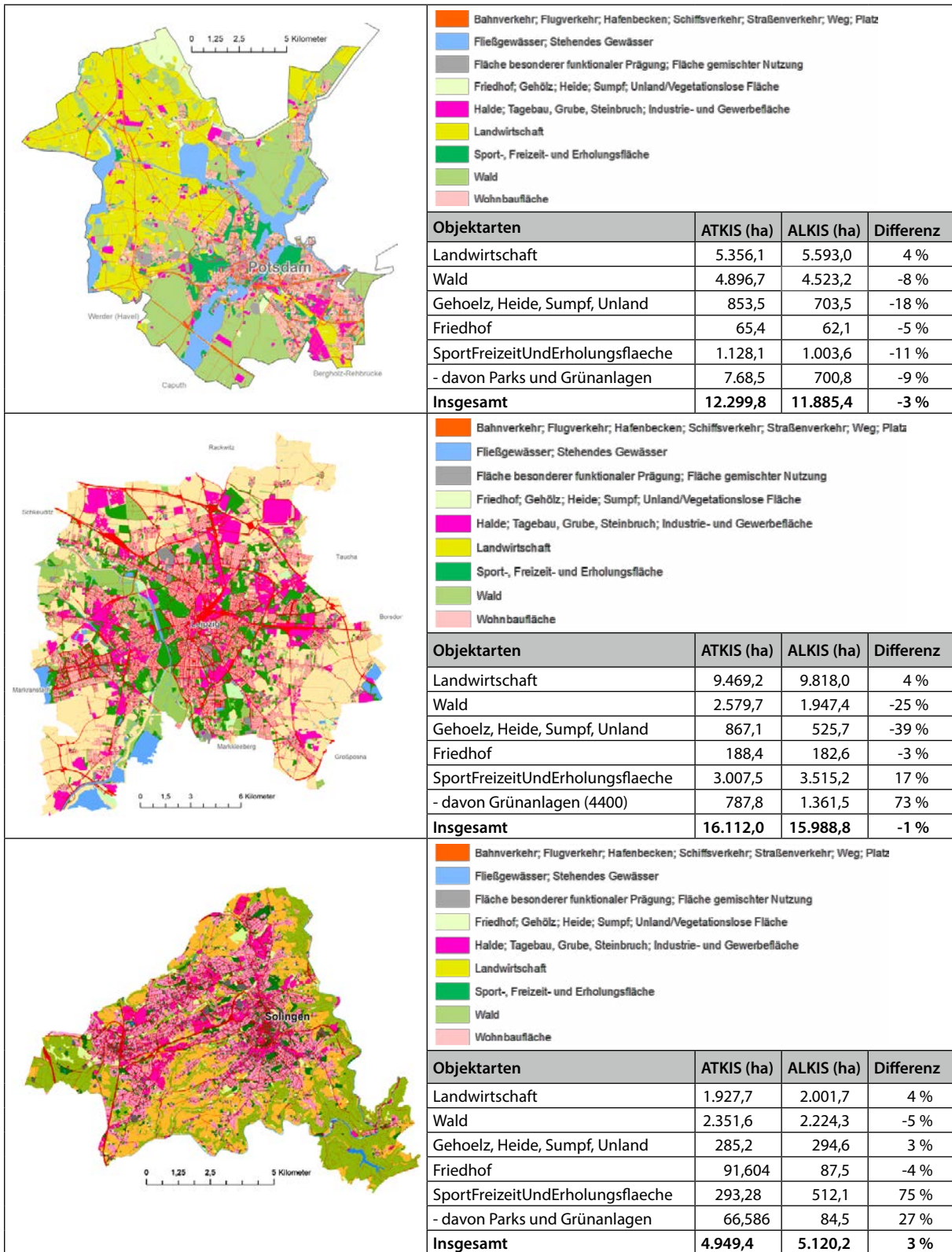
Quelle: ILS

Für die weitere Bearbeitung wurde aufgrund dieser Erkenntnis auf sozialräumliche Auswertungen mit den Sentinel-2-Ergebnissen verzichtet. Diese Entscheidung begründet sich damit, dass die Unterscheidung zwischen öffentlichen und privaten Flächen für die sozialräumliche Bewertung der Stadtgrünversorgung aus der Nutzerperspektive nicht ignoriert werden kann. Aus dem Bereich der amtlichen Daten der Landnutzung verbleiben ALKIS und ATKIS als geeignete Alternativen. ATKIS bietet zwar den Vorteil, dass es deutschlandweit zur Verfügung steht, enthält aber nicht die parzellenscharfe Genauigkeit von ALKIS. ALKIS ist für die ausgewählten Fallbeispiele verfügbar, weist jedoch Unterschiede in der Befüllung der Objektklassen auf, die auf Umwidmungen und unterschiedliche Interpretationen des Objektartenkatalogs zurückzuführen sind.

Aus diesem Grund wurden Bilanzen für den Abgleich von ALKIS-Daten und der Landnutzung aus ATKIS erstellt, die Erkenntnisse über diese Unterschiede geben (siehe die nachfolgenden Übersichten in Tabelle 25). Da ALKIS und ATKIS semantisch äquivalente Objektartenkataloge aufweisen, können die Flächensummen beider Modelle direkt gegenübergestellt werden. Tendenziell weisen beide Datenbestände vergleichbare Flächensummen auf, wenn man die Gesamtheit aller untersuchten Objektarten betrachtet. Jedoch ergeben sich teils deutliche Abweichungen bei einzelnen Flächennutzungskategorien. Dies resultiert aus den verschiedenen Modellbildungsvorschriften und Mindesterschaffungsgrößen in den jeweiligen Erfassungskriterien. Eine Überprüfung der Unterschiede konnte im Projekt aufgrund fehlender Referenzdaten und mangelnder Ressourcen nicht geleistet werden, sollte aber ein Bestandteil eines Nachfolgeprojekts sein.

Tabelle 25

Übersichten der Fallbeispielstädte Potsdam, Leipzig und Solingen (Daten: ALKIS der Geoportale der Länder Berlin, Brandenburg und Sachsen, OpenNRW)



Quelle: ILS





10.5 Datenbeschreibung infas360

Auszug aus der Datenbeschreibung für mikrogeographische Daten von infas360

Soziodemographie				
CASA_HH	Anzahl Privathaushalte	Absolute Zahl	Adresse	Numerisch
CASA_SOZ_SCH	Überwiegende Soziale Schicht auf dem Haus	-99 - keine Angabe	Adresse	Numerisch
		1 - Oberschicht		
		2 - Obere Mittelschicht		
		3 - Mittelschicht		
		4 - untere Mittelschicht		
5 - Unterschicht				

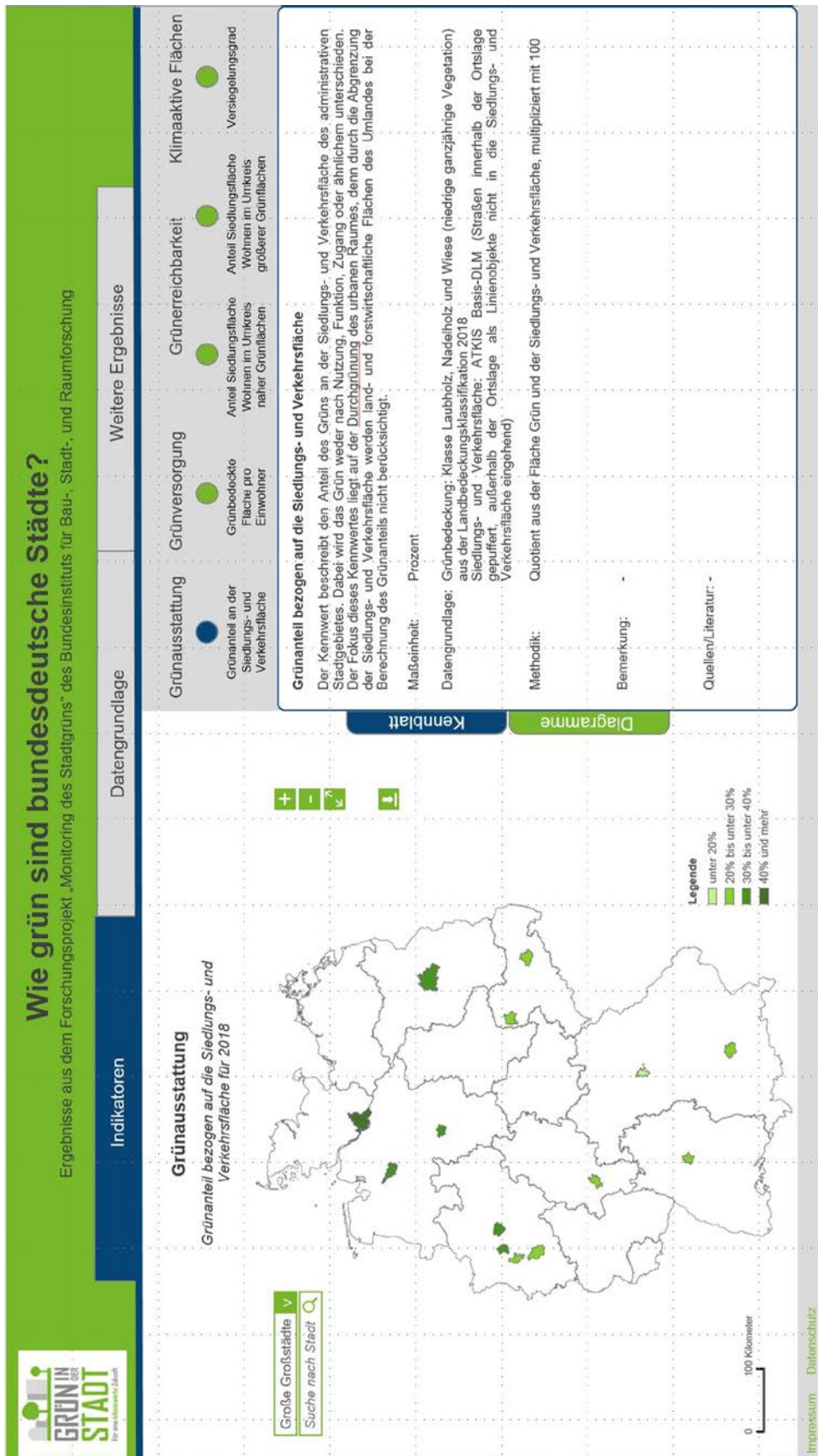
Quelle: infas 360

10.6 Zugangsbeschränkte Flächen in Solingen

Grünfläche größer 5 Hektar	Luftbild der Fläche
<p>Historischer Freizeitpark mit Märchenwald Beschränkung: derzeit dauerhaft geschlossen, sonst Öffnungszeiten und Eintritt Luftbild: https://geoportal.solingen.de/geospatialportal1/</p>	
<p>Tierpark Fauna Beschränkung: Eintritt und Öffnungszeiten Luftbild: https://geoportal.solingen.de/geospatialportal1/</p>	
<p>Parkfriedhof (24 ha Größe) Beschränkung: Öffnungszeiten Luftbild: https://geoportal.solingen.de/geospatialportal1/</p>	
<p>Botanischer Garten Beschränkung: kostenfrei, aber Öffnungszeiten Luftbild: https://geoportal.solingen.de/geospatialportal1/</p>	

Quelle: ILS

10.7 Mockups zur Webanwendung



Startansicht: Gliederungsebene Indikatoren, keine Stadt ausgewählt, Auswahl Reiter Kennblatt, Auswahl Indikator Grünausstattung

Quelle: iÖR

Wie grün sind bundesdeutsche Städte?

Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Monitoring des Stadtrüns“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt-, und Raumforschung

Indikatoren
Datengrundlage
Weitere Ergebnisse

Grünausstattung

Grünanteil bezogen auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche für 2018

Große Großstädte
Hannover

Legende

- unter 20%
- 20% bis unter 30%
- 30% bis unter 40%
- 40% und mehr

Kennblatt

Diagramme

Grünausstattung
Grünversorgung
Grünerreichbarkeit

Grünanteil an der Siedlungs- und Verkehrsfläche
Grünbedeckte Fläche pro Einwohner
Anteil Siedlungsfläche Wohnen im Umkreis größerer Grünflächen

Klimaaktive Flächen
Versiegelungsgrad

●
●
●

Grünanteil bezogen auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche

Übersicht der Indikatorausprägung

Das Diagramm zeigt einen Vergleich der Indikatorwerte der einzelnen Städte des ausgewählten Stadttyps. Beim Überfahren des Diagramms mittels des Mauszeigers werden für die einzelnen Städte die Werte angezeigt.

Hannover: 33%

Übersicht der Indikatorausprägungen von Hannover

Für jeden Indikatorwert wurden für die Städte Rankings erstellt, wobei immer nur Städte des gleichen Stadttyps für ein Ranking berücksichtigt wurden; im Diagramm ist die Position der Stadt im Ranking für jeden Indikatorwert abgetragen. Beim Überfahren des Diagramms mittels des Mauszeigers wird die Position der Stadt im Ranking angezeigt.

Hannover: 5. Platz von 14

14 Große Großstädte


Impressum

Datenschutz

0 100 Kilometer

Gliederungsebene Indikatoren, Hannover über Suchfunktion ausgewählt, Auswahl Reiter Diagramme, Auswahl Indikator Grünausstattung

Quelle: IÖR



Wie grün sind bundesdeutsche Städte?

Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Monitoring des Stadtgrüns“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt-, und Raumforschung

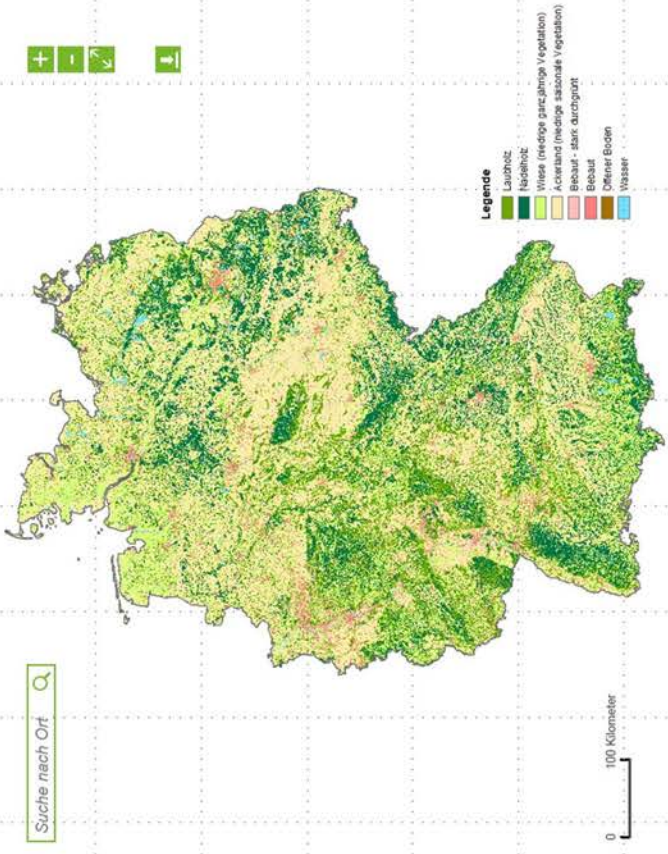
Weitere Ergebnisse

Indikatoren

Datengrundlage

Stadtgrünraster Deutschland 2018

Suche nach Ort



Legende
 Landholz
 Hochholz
 Mittel- (niedrige geringfügige Vegetation)
 Ackerland (niedrige saisonale Vegetation)
 Freizeut - stark durchgrünt
 Freizeut
 Offener Boden
 Wasser

0 100 Kilometer

Impressum [Datenschutz](#)

Daten Landbedeckungsklassifikation 2018
 Bilder des Satelliten Sentinel-2 aus dem Copernicus-Programm der EU bilden die Grundlage für die Erfassung der Landbedeckung in Deutschland. Dabei wurden Bilder von Mai bis September 2018 verwendet. Die räumlich Auflösung beträgt 10 m x 10 m.

Stadtgrünraster Deutschland 2018
 Kartographisches Produkt basierend auf der modifizierten Klassifikation, wobei bebauter Bereich hinsichtlich ihres Grünanteils bewertet werden. Als bebauter Bereich sind Gebiete mit höherem Vegetationsindex NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) markiert, werden als „stark durchgrünt“ markiert.

Datengrundlage für die Berechnung der Indikatoren

Landbedeckungsklassifikation 2018 – modifizierte Klassifikation
 Mit Informationen des ATKIS Basis-DLM modifizierter Datensatz zur Minimierung von Fehlklassifikationen. Diese betreffen insbesondere falsch-positiv klassifizierte Pixel der Landbedeckungsklassen Wasser und Ackerland im Siedlungsbereich.

Landbedeckungsklassifikation 2018 – automatische Klassifikation
 Ergebnis der automatischen Klassifizierung des Medianmosaiks hinsichtlich der Landbedeckung. Dabei wurde der Klassifikator Random Forest verwendet. Als Referenz- und Validierungsdaten dienten die LUCAS-Punkte („Land Use and Coverage Area frame Survey“) des selben Jahres.

Medianbildmosaik 2018
 Synthetisch erzeugter wolkenfreier Satellitendatensatz unter Verwendung aller verfügbaren Szenen innerhalb der Vegetationsperiode (Mai-September) eines Jahres. Dadurch wird das gesamte Bundesgebiet multitemporal abgedeckt, was eine robuste Klassifizierung jedes Punktes der Erdoberfläche erlaubt.

Gliederungsebene Datengrundlage, Auswahl Stadtgrünraster, Variante mit Auswahlmöglichkeit automatischer Landbedeckungsklassifikation und Median-Mosaik
 Quelle: IÖR

Wie grün sind bundesdeutsche Städte?

Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt „Monitoring des Stadtgrüns“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung

Indikatoren
Datengrundlage
Weitere Ergebnisse

Ergebnis 2018 für die Stadtteile ausgewählter Städte mit mehr als 50.000 Einwohnern

Grünanteil an der Stadtgrüne- und Verkehrsfläche

- Grunsausstattung
- Grünversorgung
- Grundbedeckte Fläche pro Einwohner

Grünreichtbarkeit

- Anteil Stadtgrüne Wohnen im Umkreis naher Grünflächen
- Anteil Stadtgrüne Wohnen im Umkreis größerer Grünflächen
- Klimaaktive Flächen
- Verlegetungsgrad

Stadtbezirke von Berlin 2018

Stadtbezirk	Grünbedeckung pro Einwohner in m²/EW
Friedrichshagen-Kreuzberg	12
Mitte	24
Neukölln	47
Tempelhof-Schöneberg	48
Lichtenberg	71
Marzahn-Hellersdorf	87
Charloitenburg-Wilmersdorf	96
Prenzlau	123
Reinickendorf	180
Steglitz-Zehlendorf	193
Spandau	200
Treptow-Köpenick	389
Berlin	119

Grünbedeckung pro Einwohner in m²/EW

Weitere Ergebnisse im IÖR-Monitor: <https://www.ioer-monitor.de/>

Impressum [Datenschutz](#)

Weitere Informationen

Broschüren	Methoden der Stadtgrünerfassung	Webseiten
<p>Monitoring des Stadtgrüns</p> <p>Methoden und Ergebnisse aus dem BBSR-Forschungsprojekt „Monitoring des Stadtgrüns“</p> <p style="text-align: right;">PDF</p>	<p>Beschreibung von Methoden zur Erfassung von Stadtgrün über Fernerkundungsdaten und Grünvolumenbestimmung und Ermittlung von defizitäreren Räumen</p> <p>Wie grün ist die Stadt?</p> <p>Beispielhafte Ergebnisse für ausgewählte Städte im Rahmen des BBSR-Forschungsprojekt „Monitoring des Stadtgrüns“</p> <p style="text-align: right;">PDF</p>	<p>Weitere Informationen zum Projekt: https://www.bbsr.de/BBSR/DE/forschung/programme/reif/staedtebau/2019/gruenmonitring/01-start.html?docId=2148854&noFrist=true</p> <p>Weitere Grünindikatoren im IÖR-Monitor: https://www.ioer-monitor.de/</p>
<p>Publikationen</p> <p>Beitrag zur AGIT 2020</p>		

Gliederungsebene Weitere Ergebnisse, Berlin über Suchfunktion ausgewählt
 Quelle: IÖR

10.8 Projektablauf

Die Projektbearbeitung begann am 01.11.2018 und endet nach kostenneutraler Verlängerung am 28.02.2021.

Die Bearbeitung des Projektes erfolgte durch ein Konsortium, bestehend aus dem Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR) Dresden als Lead, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen, der Luftbild-Umwelt-Planung GmbH (LUP) in Potsdam sowie dem Institut für Landes- und Stadtentwicklungsforschung (ILS) in Dortmund.

Die Arbeitsfortschritte im Projekt wurden in Sachstandsberichten, Zwischenberichten und Produktberichten dokumentiert. Mit der nachfolgenden Tabelle 26 wird eine Übersicht aller erstellten Berichte gegeben, die dem AG übergeben wurden.

Tabelle 26

Übersicht zu den im Projekt entstandenen Berichten

Art des Berichtes	Titel des Berichtes	Arbeitspaket	Versendet am
Sachstandsbericht	1. Sachstandsbericht	AP0	11.12.2018
Sachstandsbericht	2. Sachstandsbericht	AP0	07.05.2019
Sachstandsbericht	3. Sachstandsbericht	AP0	29.11.2019
Sachstandsbericht	4. Sachstandsbericht	AP0	10.08.2020
Zwischenbericht	1. Zwischenbericht	AP0	31.07.2019
Zwischenbericht	2. Zwischenbericht	AP0	28.02.2020
Produktbericht	P1.1 Stadtgrünerfassung in Deutschland	AP1	28.03.2019
Produktbericht	P1.2 Entwicklung von Indikatoren zur Erfassung von Stadtgrün	AP1	10.07.2019
Produktbericht	P2.1 Datensatz zum bundesweiten Stadtgrün	AP2	15.01.2020
Produktbericht	P2.2 Change Detection	AP2	26.10.2020
Produktbericht	P3.1 Fallstudienstädte und Testgebiete	AP3	25.11.2019
Produktbericht	P3.2 Grünvolumina und Typisierung der Grünausstattung in Fallstudienstädten	AP3	24.01.2020
Produktbericht	P3.3 Spezialauswertungen	AP3	09.07.2020
Produktbericht	P4.1/4.3 Monitoringkonzept/Webkonzept	AP4	19.11.2020
Produktbericht	P4.2 Indikatorensteckbriefe	AP4	02.11.2020

Quelle: IÖR

Vom IÖR wurde zudem eine Projektwebseite⁸ als Bestandteil des BBSR-Webauftritts gepflegt, welche über den Fortschritt und die Ergebnisse des Projektes informiert.

(8)

<https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ReFo/Staedtebau/2019/gruenmonitoring/01-start.html?nn=2148856>

Im Rahmen des Projektes wurden vom Projektkonsortium drei Veranstaltungen durchgeführt. Die Tabelle 27 gibt einen Überblick über Titel, Ort, Zeitpunkt sowie dem Teilnehmerkreis und dem Ziel der Veranstaltung.

Tabelle 27
Übersicht zu den im Projekt durchgeführten Veranstaltungen

Titel der Veranstaltung	Datum, Ort	Teilnehmer	Ziel
Stadtgrünmonitoring mittels Fernerkundung – Methoden und Indikatoren (Methodenworkshop)	14./15.10.2019 IÖR, Dresden	Projektkonsortium, BBSR, Vertreter Fallstudienstädte, Experten	Austausch zu Informationsbedarfen Stadtgrün, Projektvorstellung, Vorstellung erster Projektergebnisse
Präsentation der Zwischenergebnisse	27.05.2020 virtuell	Projektkonsortium, BBSR, BMI	Vorstellung der Zwischenergebnisse des Projektes, Abstimmungen zum weiteren Projektfortlauf
Ergebnisworkshop mit Repräsentanten der Fallstudienstädte	08./09.09.2020 IÖR/a&o Hostel Dresden/virtuell	Projektkonsortium, BBSR, Vertreter Fallstudienstädte	Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse des Projektes

Quelle: IÖR

Eine Übersicht zu der im Rahmen des Projektes veröffentlichten Publikationen bietet Tabelle 28. Wissenschaftliche Fachvorträge wurden bei der AGIT 2020 sowie beim 11. und 12. Dresdner Flächennutzungssymposium (DFNS) 2019 und 2020 gehalten.

Tabelle 28
Übersicht zu den im Rahmen des Projektes veröffentlichten Publikationen

Titel	Autoren	Journal	Inhaltlicher Schwerpunkt
Wie grün sind deutsche Städte? – Indikatorgestützte fernerkundliche Erfassung des Stadtgrüns	Lisa Eichler, Tobias Krüger, Gotthard Meinel, Julia Tenikl, Michael Wurm	AGIT Journal 06/2020	Datengrundlage Landbedeckungsklassifikation, Indikatorenkonzept
Wie grün sind deutsche Städte?	Lisa Eichler, Tobias Krüger, Gotthard Meinel, Julia Tenikl, Michael Wurm	gis.Business 03/2020	Datengrundlage Landbedeckungsklassifikation, Indikatorenkonzept
One size fits all? Zur Qualität von Stadtgrün aus Nutzerperspektive	Stefan Fina, Karsten Rusche, Verena Loosen	IÖR Schriften Nr. 77	Nutzung verschiedener Daten für Informationen zum Stadtgrün
Satellitengestützte Vermessung von städtischem Grün in deutschen Städten	Julia Tenikl, Michael Wurm, Tobias Leichtle, Hannes Taubenböck	IÖR Schriften Nr. 77	Nutzung Fernerkundung zur Erfassung von Stadtgrün
Wo fehlt Grün? – Defizitanalyse von Grünvolumen in Städten	Annett Frick, Kathrin Wagner	IÖR Schriften Nr. 78	Defizitanalyse Grünvolumen
Which city is the greenest? A multi-dimensional deconstruction of city rankings	H. Taubenböck, M. Reiter, F. Dosch, T. Leichtle, M. Weigand, M. Wurm	Computers, Environment and Urban Systems Vol. 89	Städteranking nach Grünindikatoren
Stadtgrün unter Druck: Vergleichswerte zur urbanen Grünraumversorgung in deutschen Städten	Stefan Fina	Stadtforschung und Statistik	Grünraumversorgung im Vergleich
Satellitengestützte Erfassung des Stadtgrüns	Fabian Dosch	Stadtforschung und Statistik	Erfassungsmöglichkeiten, bundesweite Klassifikation

Quelle: IÖR