



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



BBSR-
Online-Publikation
08/2025

Stadtklimaindikatoren

Entwicklung von messbaren Zielen, Indikatoren und Maßnahmen der Klimaanpassung durch Stadtentwicklung

von

Britta Jänicke
Florian Otto
René Burghard
Felix Heinze
Nisha Patel
Kay Strasser

Stadtklimaindikatoren

Entwicklung von messbaren Zielen, Indikatoren und Maßnahmen der
Klimaanpassung durch Stadtentwicklung

Das Projekt des Forschungsprogramms „Experimenteller Wohnungs- und Städtebau (ExWoSt)“ 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 (BBSR)
Referat RS 6 „Stadt-, Umwelt- und Raumbbeobachtung“
Dr. Fabian Dosch
fabian.dosch@bbr.bund.de

Begleitung im Bundesministerium

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB)
Referat S I 5 „Anpassung an den Klimawandel, Klimaschutz in der Stadt“
Dr. Lara Steup

Auftragnehmer

Bauchplan, München
Prof. Florian Otto (Projektleitung)
email@bauchplan.de

Universität Kassel, Fachgebiet Umweltmeteorologie, Kassel
Prof. Dr. Britta Jänicke
britta.jaenicke@uni-kassel.de

Redaktion

Universität Kassel, Fachgebiet Umweltmeteorologie, Kassel
Prof. Dr. Britta Jänicke

Bauchplan, München
Prof. Florian Otto

Stand

August 2024

Satz und Layout

Universität Kassel, Fachgebiet Umweltmeteorologie, Kassel

Bildnachweis

Titelbild: CDPIc – stock.adobe.com

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

Jänicke, B.; Otto, F.; Burghardt, R.; Heinze, F.; Patel, N.; Strasser, K., 2025: Stadtklimaindikatoren: Entwicklung von messbaren Zielen, Indikatoren und Maßnahmen der Klimaanpassung durch Stadtentwicklung. BBSR-Online-Publikation 08/2025. Bonn.
<https://doi.org/10.58007/508c-ww15>

DOI 10.58007/508c-ww15

ISSN 1868-0097

Bonn 2025

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Ausgangslage	6
Entwicklung	6
Fachworkshops und Experteninterviews	7
Kern- & Initialindikator „Klimaaktives Grün“	8
Kern- & Initialindikator „Naturnaher Wasserhaushalt“	8
Zusammenfassung und Schlussfolgerung	9
Abgestufte Anwendung der Indikatoren	9
Abstract	11
Initial situation	11
Development process	11
Expert workshops and interviews	12
Core & initial indicator “Climate-active green”	12
Core & initial indicator “Natural water management”	13
Summary and conclusion	13
Tiered application of indicators	14
Hintergrund und Zielsetzung	15
Zum vorliegenden Bericht	16
Wesentliche Anpassungsmaßnahmen	16
Indikatoren für Klimawandelanpassung	17
Katalog mit thematischen Steckbriefen	21
Vorarbeiten und Literaturreview	21
Übersicht möglicher thematischer Bereiche und Kennwerte	23
Auswahlprozess	40
Workshop 1	40
Workshop 2	43
Workshop 3	45
Auswahl und Konkretisierung der Kern- und Initialindikatoren	47
„Klimaaktives Grün“ und „Naturnahe Wasserbilanz“	49
Kern- & Initialindikator „Klimaaktives Grün“	49
Kern- & Initialindikator „Naturnaher Wasserhaushalt“	63
Mögliche Priorisierung und Umsetzung	73
Räumliche Priorisierung durch Klimaanpassungsgebiete	73
Forschungs- und Erprobungsbedarf	76
Zusammenfassung und Schlussfolgerung	78
Kritische Wertung zur Anwendung der messbaren Ziele durch die Stadtentwicklung	78
Kurzbiografie	84
Literaturverzeichnis	86

Abbildungsverzeichnis

95

Tabellenverzeichnis

96

Kurzfassung

Ausgangslage

Die Auswirkungen des Klimawandels sind bereits heute spürbar und werden sich voraussichtlich weiter verschärfen. Neben dem Klimaschutz bedarf es auch der Klimawandelanpassung, um die Folgen und Risiken durch den Klimawandel abzufedern. Deutsche Städte sind zunehmend durch die Auswirkungen des Klimawandels betroffen, einschließlich städtischer Hitzeinseln und damit verbundener Gesundheitsrisiken, die durch den Rückgang der Grünflächen noch verstärkt werden. Starke Regenfälle stellen aufgrund der städtischen Versiegelung und der hohen Bebauungsdichte ebenfalls ein erhebliches Risiko dar.

Um Schäden durch Klimafolgen für Menschen und die Umwelt zu vermeiden oder zu reduzieren, sollte die zukünftige Stadtentwicklung entsprechend dem Vorsorgeprinzip der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel gestaltet werden. Am 13. Juli 2023 wurde vom Bundeskabinett der Entwurf eines Klimaanpassungsgesetzes verabschiedet und am 22. Dezember 2023 veröffentlicht (BGBl. 2023 I Nr. 393 vom 22.12.2023).

Um zur Umsetzung des Bundes-Klimaanpassungsgesetzes (KAnG) messbare Ziele und ein Monitoringsystem zu entwickeln, hat das Bundesumweltministerium (BMUV) Ende 2022 einen Prozess zur Entwicklung dieser messbaren Ziele in sieben Clustern eingeleitet. Das Bundesbauministerium (BMWSB) hat dabei die Federführung für das sechste Cluster „Stadtentwicklung, Raumplanung und Bevölkerungsschutz“. Dafür sollen wenige aber aussagekräftige Handlungsziele identifiziert und Indikatoren entwickelt werden, mit denen die Zielerreichung über einen längeren Zeitraum gemessen werden können. Der Fokus liegt auf der Reduktion der Hitzegefährdung und der wassersensiblen Stadtgestaltung.

Entwicklung

Die Ziele in der Klimaanpassung durch Indikatoren im Bereich Stadtplanung lediglich quantitativ zu messen wird der Komplexität und Logik von Stadt- und Raumentwicklung nicht gerecht. Die Beurteilung guter Lebensverhältnisse in der Stadt kommt nicht ohne eine qualitative Betrachtungsebene aus. Bei der Auswahl geeigneter Indikatoren ist besonders auf die übergeordneten Ziele der Stadtentwicklung zu achten, da die Klimawandelanpassung und die hierfür benötigten Flächen gerade in Städten in starker Konkurrenz zueinander stehen, was zum Beispiel soziale, wirtschaftliche und andere ökologische Bedarfe angeht. Dem Ziel eines klimaoptimierten grünen Stadtraums stehen aktuell noch gesellschaftspolitische Aspekte wie eine schleppende Verkehrswende und der starke Bedarf an zusätzlichem Wohnraum entgegen. Nach Möglichkeit sollte es durch die Wahl entsprechender Indikatoren gelingen, einen steuernden Impuls in Richtung einer klimaoptimierten aber sozial gerechten und räumlich dichten Stadtstruktur zu setzen. Hierfür müssen Anpassungsmaßnahmen eine Mehrzahl sich überlagernder Funktionen erfüllen. Die ausgewählten Indikatoren sollen zudem mit den sonstigen Zielen der Bundesregierung vereinbar sein wie der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie mit dem Ziel den täglichen Flächenverbrauch zu reduzieren und bis 2050 in Deutschland eine Flächenkreislaufwirtschaft zu etablieren. Indikatoren müssen daher auch nach ihrer Widersprüchlichkeit beziehungsweise ihren Zielkonflikten bewertet werden. Durch eine grundsätzliche Flächenkonkurrenz kommen auch Zielkonflikte zwischen Klimaanpassung und Klimaschutz in der (kompakten) Stadt hinzu.

In einer vorbereitenden Literaturrecherche wurden sieben mögliche Indikatorenbereiche und Kennwerte identifiziert. Für die Indikatorenbereiche werden verschiedene Kennwerte vorgeschlagen und in Impact-, Outcome- und Output-Indikatoren untergliedert:

- Vorsorge und Vorbereitung (Output)
- Gebäudestruktur und bauliche Dichte (Outcome)

- Oberflächeneigenschaften (Albedo) (Outcome)
- grüne Infrastruktur (Outcome)
- Versiegelung (Outcome)
- wassersensible Stadtgestaltung (Outcome)
- städtische Überwärmung (Impact)

Fachworkshops und Experteninterviews

Der Auswahlprozess geeigneter Indikatoren und Maßnahmen erfolgte über einen Prozess (Trichtern) in Fachworkshops, in Abstimmung mit dem BBSR und dem BMWBS unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Erkenntnisse aus den parallelen Indikatorenprozessen anderer Cluster und Referate, sowie durch zusätzliche Interviews zu spezifischen Fragestellungen, welche im Zuge der Erarbeitung entstanden.

Aus den Beiträgen im ersten Fachgespräch wurde deutlich, dass die Komplexität und Querschnittsorientierung der Stadtplanung einen mehrdimensionalen Ansatz erforderlich macht und sich auf folgende Bereiche zunächst konzentriert:

- städtische Wärmeinseln/Hitzebelastungen (Tag/Nacht) als Impact-Indikator, der jedoch mit den Maßnahmen und ergänzenden Outcome-Indikatoren aus den aufgezeigten Handlungsbereichen zu verbinden ist;
- ein Indikatoren-Mix für grüne Infrastruktur, dabei Grünausstattung und -erreichbarkeit mit Bäumen verbinden, was über das Grünvolumen noch schwer messbar ist, aber näherungsweise auch über den Kronenüberschirmungsgrad zu messen wäre;
- die wassersensible Stadt mit dem Indikator eines naturnahen Wasserhaushalts;
- die Versiegelung als vergleichsweise einfach zu messender stadtoökologischer Schlüsselindikator;
- Klimaanpassungsgebiete zur Priorisierung und zur gezielteren Förderung.

In der weiteren Abstimmung des Forschungsprojekts wurden die Kernbereiche zu zwei Kernindikatoren verdichtet: „Hitzevorsorge durch klimaaktives Stadtgrün“ und „Naturnaher Wasserhaushalt“.

Der Ansatz des Forschungsprojekts, den Erfolg von Klimaanpassungsmaßnahmen in der Stadtentwicklung allein quantitativ zu bemessen, wurde kontrovers diskutiert. Zum Abschluss des Forschungsvorhabens wurden die Kernindikatoren und ihre Teilindikatoren mit Vertreterinnen und Vertretern aus der kommunalen Praxis diskutiert, um die Praxistauglichkeit zu überprüfen und um Synergien und Hindernisse in der Umsetzung zu identifizieren. Die Einführung von verbindlichen Zielwerten auf Bundesebene für diese Indikatoren, die die Klimaanpassung messbar machen, wird von der kommunalen Praxis für sehr wertvoll erachtet, um eigene Anpassungsbemühungen zu bewerten und als argumentative Unterstützung in kommunalen Abwägungs- und Entscheidungsprozessen. Gleichzeitig erfordert die Vielgestaltigkeit der kommunalen Realitäten eine Offenheit in der Reaktion, falls Zielwerte nicht erreicht werden können. Um der Komplexität und Kleinräumigkeit der realen Gegebenheiten in Kommunen Rechnung zu tragen werden vielfach auch qualitative Aspekte als Ergänzung der quantitativ erfassten Indikatoren angesprochen.

Die durch die Fachworkshops und Expertenergebnisse bestätigten Indikatorenbereiche „Hitzevorsorge durch klimaaktives Stadtgrün“ als Mischindikator, welcher insbesondere die Qualität von Bäumen in der Stadt und die Grünerreichbarkeit in ihrer sozialen Dimension hervorhebt, sowie „Naturnaher Wasserhaushalt“ werden im Projekt vertieft betrachtet.

Kern- & Initialindikator „Klimaaktives Grün“

Für den Indikatorbereich „Hitzevorsorge durch klimaaktives Stadtgrün“ kristallisierten sich die Teilindikatoren „Grünanteil“, „Grünversorgung“, „Grünerreichbarkeit“ und „Baumbedeckung“ heraus, die unterschiedliche Aspekte der Hitzevorsorge durch Stadtgrüns abbilden.

Der Teilindikator „Grünanteil“ bemisst den Flächenanteil an privatem und öffentlichem Stadtgrün in einem urbanen Bezugsraum. Für einen Flächenanteil ab 30 bis 40 % ist eine signifikante positive klimatische Wirkung und die Minderung von Temperaturmaxima erwartbar. Ein weiterer Teilindikator, die „Grünversorgung“, bemisst den Anteil öffentlicher und für die Bevölkerung nutzbarer Flächen in Bezug auf Wohn- oder Arbeitsbevölkerung. Der Teilindikator „Grünerreichbarkeit“ ist dann gegeben, wenn eine klimarelevante öffentliche Grünfläche in einer fußläufig leicht zu bewältigenden Distanz vorhanden ist. Die Teilindikatoren „Grünanteil“ und „Grünversorgung“ beschreiben grundsätzlich neben der direkten klimatischen Wirkung eine soziale Dimension des Stadtgrüns für die Bevölkerung.

Der Teilindikator „Baumbedeckung“ (oder „Überschirmung durch Grün“) beschreibt den Flächenanteil, welcher in der Horizontalprojektion von Stadtgrün bedeckt wird, und stellt mit seiner Verschattungswirkung ein essenzielles Maß für den Schutz vor Hitze dar. Dem Indikator kommt insbesondere in hoch verdichteten und innerstädtischen Quartieren eine wichtige Bedeutung zu, da in diesen Stadtbereichen eine großflächige Begrünung oftmals aufgrund begrenzter Flächenverfügbarkeit nicht realistisch ist und in starker Konkurrenz zu anderen Nutzungen steht.

Als wesentliches qualitatives Merkmal für alle Indikatoren im Bereich Stadtgrün gilt es, die Wasserversorgung der Grünflächen und Baumpflanzungen zu berücksichtigen.

Kern- & Initialindikator „Naturnaher Wasserhaushalt“

Historisch gesehen wurde Niederschlag in städtischen Gebieten als Gefahr angesehen, weshalb komplexe Entwässerungssysteme implementiert wurden, um Oberflächenwasser zu entfernen und es aus dem städtischen Bereich wegzuleiten. Ein Wandel hin zu nachhaltiger städtischer Entwässerung hat dazu geführt, dass Stadtplanungspolitiken zunehmend Wasser als Ökosystem und Lebensraum in unterschiedlichen räumlichen Maßstäben integrieren. In zunehmendem Maße werden lokale Maßnahmen umgesetzt, um Niederschlagswasser direkt vor Ort zu versickern und zu verdunsten und die negativen Auswirkungen von städtischem Oberflächenabfluss auf die Umgebung zu verringern. Es wird auf Maßnahmen wie Gründächer, durchlässige Befestigungen, begrünte Mulden und Regengärten verwiesen, die sich in der Nähe der Entstehungsquelle von Oberflächenabfluss befinden. Der natürliche hydrologische Kreislauf wird durch die Einführung undurchlässiger Oberflächen und künstlicher Abflusswege verändert, was zu einer verringerten Infiltration und einer reduzierten Wasserspeicherkapazität führt. Der Wasserhaushalt von Flächen, die undurchlässig befestigt sind, zeichnet sich durch einen sehr hohen Direktabfluss, eine geringe Grundwasserneubildung und eine niedrige Verdunstung aus. Im Gegensatz dazu weisen durchlässig befestigte und insbesondere nicht befestigte Flächen eine höhere Grundwasserneubildung und Verdunstung auf, während der Direktabfluss geringer ist.

In Deutschland gibt es eine beträchtliche Variation der klimatischen Bedingungen und des Wasserhaushalts. Die langjährigen Durchschnittswerte für den Niederschlag reichen von etwa 450 bis über 2.000 mm pro Jahr, für die tatsächliche Verdunstung von etwa 350 bis über 850 mm pro Jahr und für den Direktabfluss von 0 bis über 2.000 mm pro Jahr. Daraus ergeben sich abflussdominierte Gebiete, Gebiete mit hoher Infiltration und Gebiete mit geringem Niederschlag und hoher Verdunstung (vgl. DWA 2022).

Der Indikator „Naturnaher Wasserhaushalt“ bildet den Ansatz einer wassersensiblen Stadt ab und beschreibt das Verhältnis von Grundwasserneubildung (Versickerung), Evapotranspiration (Verdunstung) und Abfluss. Die drei Teilindikatoren können jeweils in Bezug gesetzt werden zu einem Referenzwert, welcher eine unbe-

baute Situation in gleicher geografischer, geologischer und morphologischer Situation abbildet. Die Abweichung von diesem Referenzwert lässt sich als Abweichung von einem potenziellen naturnahen Wasserhaushalt verstehen. Für die Anwendung bestehen Rechenwege und Beiwerte, welche von der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) im Merkblatt DWA-M 102-4/BWK-M 3-4 „Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 4“ definiert sind. Die Methodik ist sehr präzise, verlangt jedoch eine detaillierte Erhebung der Grundlagen zur Berechnung, die bundesweit so nicht möglich ist. Die Parameter, die durch die drei Teilindikatoren gemessen werden, umfassen unterschiedliche Aspekte einer wassersensiblen Stadtgestaltung.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Für den Indikatorbereich „Hitzevorsorge durch klimaaktives Stadtgrün“ kristallisierten sich im Forschungsprojekt Kern- und Initialindikatoren heraus, die unterschiedliche Aspekte einer erfolgreichen Umsetzung abbilden und möglicherweise auch unterschiedliche räumliche Ausprägungen haben sollten (für Kernstadt, Stadtrand, Umland oder vergleichbare stadregionale Teilräume). Ein zielgerichtetes Monitoring setzt zudem eine längerfristige und methodisch vergleichbare Messmethode (Indikatorik) voraus. Die spezifische Umsetzbarkeit und die Auswirkung des Monitorings auf die künftige Stadtentwicklung sollen im Folgenden veranschaulicht werden.

Der Forschungsprozess zur Entwicklung von messbaren Zielen, Indikatoren und Maßnahmen der Klimaanpassung durch Stadtentwicklung ergab in mehreren Fachworkshops und Experteninterviews eine klare Fokussierung auf die beiden Kernindikatoren „Hitzevorsorge durch klimaaktives Stadtgrün“ und „Naturnaher Wasserhaushalt“.

Der Kernindikator „Hitzevorsorge durch klimaaktives Grün“ setzt sich aus den Teilindikatoren „Grünanteil“ (öffentliches und privates Grün in % je Fläche), „Grünversorgung“ (öffentliches Grün in m² je Einwohner), „Grünerreichbarkeit öffentlich nutzbarer Grünflächen“ und „Baumbedeckung“ zusammen. Die Teilindikatoren bilden unterschiedliche Aspekte des Stadtgrüns in seiner klimatischen Funktion und Bedeutung für die Bevölkerung ab. Sie bilden zum einen das Verhältnis von öffentlichen Grünflächen je Einwohner ab, zum anderen bezeichnen sie die Grünerreichbarkeit, die dann gegeben ist, wenn eine relevante und qualitätsvolle öffentliche Grünfläche in einer fußläufig leicht zu bewältigenden Distanz erreichbar ist. Schließlich stellt der Teilindikator „Baumbedeckung“ (oder „Überschirmung durch Grün“), als Annäherung an die Bemessung des Grünvolumens, eine aussagekräftige Größe dar, nicht zuletzt zur Kühlungswirkung durch Evapotranspiration und Verschattung. Für jeden der oben benannten Teilindikatoren liegen Datensätze in unterschiedlicher Qualität und Aussagekraft vor, um zu bundeseinheitlichen quantitativen Aussagen zur Klimaanpassung in den jeweiligen Indikatoren zu gelangen.

Der Kernindikator „Naturnaher Wasserhaushalt“ bildet den Ansatz einer wassersensiblen Stadt ab und beschreibt das Verhältnis von Grundwasserneubildung (Versickerung), Evapotranspiration (Oberflächen- und Pflanzenverdunstung) und Abfluss. In Deutschland gibt es eine beträchtliche Varianz der klimatischen Bedingungen und des natürlichen Wasserhaushalts. Es wird daher empfohlen, den vorgeschlagenen Kernindikator zur Wasserbilanz ΔW und einen Indikator für wasserdurchlässige Flächen vorzusehen, welche sich bundesweit erheben lassen.

Abgestufte Anwendung der Indikatoren

Die Ziele in der Klimaanpassung durch Indikatoren im Bereich Stadtplanung lediglich quantitativ zu messen wird der Komplexität und Logik von Stadt- und Raumentwicklung nicht gerecht. Dazu gehört das grundsätzliche Spannungsfeld zwischen einer einheitlichen Erfassung auf Bundesebene und der Umsetzung der Maßnahmen auf lokaler Ebene, unter Wahrung der kommunalen Planungshoheit.

Für die Kernindikatoren „Hitzevorsorge durch klimaaktives Stadtgrün“ und „Naturnaher Wasserhaushalt“, ihre Teilindikatoren und mögliche Initialindikatoren für eine schnelle Implementierung in der Praxis wird deshalb eine abgestufte Anwendung vorgeschlagen:

- Bundeseinheitliche Erfassung durch vorhandene Datensätze in niedriger Auflösung.
- Durch die flächendeckende Verfügbarkeit der notwendigen Datengrundlagen sollte die Abbildung der genannten Kern- und Initialindikatoren in einer Auflösung von 10 x 10 m möglich sein.
- Identifikation von Klimasanierungs- oder Klimaanpassungsgebieten auf Basis einer Gradientendarstellung zur Erfassung von räumlichen Priorisierungsbereichen.
- Entgegen einem/einer flächenscharfen (administrativen) Bezug/Grenze, entspricht die Verwendung einer Gradientendarstellung als Definitionsgrundlage für die Ableitung von Klimaanpassungsgebieten dem „natürlichen“ Aspekt des realen klimatischen Wirkraums. Gleichzeitig besteht auf Grundlage einer pixelbezogenen Gradientendarstellung weiterhin die Möglichkeit der statistischen Übertragung/Auswertung der Ergebnisse auf eine beliebige vektorgebundene (administrative) Flächeneinheit.
- Prüfung, Korrektur und Konkretisierung der bundeseinheitlichen Erfassung der Indikatoren und der räumlichen Abgrenzung von Klimaanpassungsgebieten in höherer Auflösung auf kommunaler Ebene:
 - a. durch die kommunale Verwaltung, sofern diese dazu operativ in der Lage ist;
 - b. durch eine Bundes-Förderkulisse, welche die Umsetzung auf der lokalen Ebene durch externe privatwirtschaftliche Büros ermöglicht; hierfür wären einheitliche Vorgaben zu erarbeiten;
 - c. durch eine zentrale Konkretisierung auf Landesebene für die jeweilige Gemeinde.
- Umsetzung und Evaluierung der Klimaanpassungsmaßnahmen unter Einbezug der kleinräumigen lokalen Verhältnisse sowie den qualitativen Aspekten der Stadtplanung.

Für eine grundsätzliche Umsetzung der Klimaanpassungsmaßnahmen ist ein prinzipielles Verschlechterungsverbot für alle Stadtbereiche zu fordern, um den Erfordernissen der Vorsorge gegen die Folgen eines sich verändernden Klimas in den Städten Rechnung zu tragen. Für die Klimaanpassungsgebiete als Fokusräume einer zügigen und prioritären Anpassung ist ein Verbesserungsgebot zur Erreichung der Zielwerte der Indikatoren anzustreben.

Abstract

Initial situation

The impacts of climate change are already noticeable and are only expected to worsen, requiring both climate protection and adaptation efforts, especially in cities due to their dense populations and critical infrastructure. German cities face increasing vulnerability to climate impacts, including urban heat islands and associated health risks, exacerbated by declining green spaces. Heavy rainfall also poses significant risks due to urban sealing and high building density.

To mitigate these risks, Germany's urban development must align with its precautionary climate adaptation principles. The draft of the Climate Adaptation Act, approved by the Federal Cabinet on July 13, 2023, mandates a proactive strategy with measurable goals at federal, state, and municipal levels in seven thematic clusters. The act emphasizes ongoing monitoring and evaluation to ensure goal achievement.

Cluster No. 6, led by the Federal Ministry of Housing, Urban Development, and Building, focuses on urban development, spatial planning, and civil protection. Key focusses include reducing heat risks during daytime as well as stormwater protection and water availability in drought periods through water-sensitive designs.

Development process

Quantifying climate adaptation goals in urban planning is complex due to the unique logic of urban and spatial development. Evaluating assessment indicators for urban living conditions requires a qualitative approach. Indicators must align with urban development goals, which often conflict with social, economic, and ecological needs. Competing demands for space in compact cities create conflicts between climate adaptation and protection goals. Socio-political factors, such as the sluggish transition to more sustainable transportation and the strong demand for additional housing, stand in opposition to the objective of climate-optimized urban spaces. Ideal indicators should steer towards a socially just, spatially dense, and climate-optimized urban structure, fulfilling multiple functions simultaneously. Selected indicators should also support federal sustainability goals, such as reducing daily land consumption and fostering a land recycling economy by 2050.

Criteria for selecting indicators include relevance to urban development, applicability to existing conditions, ability to reflect temporal changes, capability to depict federally fundable measures, and minimal conflict with other urban and climate goals. Indicators should be easily comprehensible, technically feasible without additional costs, and should be easy to collect using existing data.

The international literature highlights challenges in evaluating adaptation measures due to ambiguous terminology and lack of standardized metrics. A literature review identified seven indicator areas and metrics, categorized as impact, outcome, and output indicators, with impact indicators crucial for assessing effectiveness:

- Precaution and Preparation (Output Indicator)
- Building Structure and Construction Density (Outcome Indicator)
- Surface Properties (Albedo) (Outcome Indicator)
- Green Infrastructure (Outcome Indicator)
- Sealing (Outcome Indicator)
- Water-sensitive Urban Design (Outcome Indicator)

- Urban Overheating (Impact Indicator)

Expert workshops and interviews

The selection of indicators and measures involves expert workshops with the BBSR and BMWStB, integrating insights from parallel processes and interviews. Urban planning's multidimensional nature necessitates a comprehensive approach, focusing on key areas identified:

- Urban Heat Islands/Heat Stress (Day/Night) as an impact indicator, linked with outcome indicators from action areas.
- Green Infrastructure indicators, emphasizing greenery provision and accessibility, approximated by canopy cover.
- Water-sensitive cities with a natural water balance indicator.
- Sealing as a straightforward urban ecological indicator.
- Climate Renovation Areas for prioritization and support.

Core indicators 1 through 4 were consolidated in a subsequent workshop with state and association representatives into two key indicators: Heat prevention through climate-active urban green spaces and Natural water balance.

Debates highlighted the challenge of solely using quantifiable indicators in urban planning for climate adaptation, stressing the need for qualitative considerations.

Consultations with municipal representatives confirmed the general suitability of the discussed indicators in practice, with some municipalities already utilizing them to identify deficiencies and action needs. Federal-level target values for these indicators were seen as beneficial for measuring climate adaptation efforts and supporting municipal decision-making, albeit adjustments may be needed due to varying municipal realities.

Given the diversity in city sizes and conditions, a flexible approach involving different indicators or combinations thereof was suggested to better reflect local practicalities. Qualitative aspects such as green space provision, urban tree vitality, and rainwater use for irrigation were also considered essential complements to quantitative measurements, acknowledging the complexity of real urban environments.

Confirmed indicators, such as heat mitigation through urban greenery and social accessibility of green spaces, are being refined. Natural water management approaches are also being improved upon.

Core & initial indicator "Climate-active green"

For the indicator area "Heat prevention through climate-active urban green spaces" sub-indicators are emerging that, with appropriate support, could impact the urban form in various ways during implementation. These include green cover/share/fraction, green supply, green accessibility, and tree canopy cover, each impacting the climatic function of urban green spaces. Urban green spaces cool through evapotranspiration and shading, reducing local temperatures and potentially creating cooling oases within urban heat islands.

The green cover/share/fraction, aiming for 30 % to 40 % of a city/city district, affects climatic impact but varies with urban density, challenging denser areas to focus on alternative measures like facade or rooftop greening.

Green supply measures accessible public green spaces in relation to the population, crucial for heat relief in densely populated neighborhoods.

Green accessibility indicates walkable proximity to cooling green spaces, enhancing climate resilience. These indicators address both climatic effects and social equity in urban greenery provision, provided a certain quality of stay and relief features like seating and fountains are given.

Tree canopy cover, directly impacts heat protection through shading and evapotranspiration. It varies by species and vitality, influencing urban greenery quality and shading effectiveness. This indicator is critical in dense urban areas, promoting oasis-like spaces and enhancing street infrastructures with trees.

Effective water supply management also demands specific consideration alongside the green indicators and is crucial for sustaining the climate benefit of urban green.

Core & initial indicator “Natural water management”

Historically, urban areas viewed precipitation as a threat, prompting the installation of intricate drainage systems to divert surface water away from cities. This approach involved piping and sealing open channels beneath urban surfaces to minimize flood risks, but it brought consequences to the ecosystems in urban water bodies (cf. McGrane 2016).

The shift towards sustainable urban drainage has led urban planning to increasingly incorporate water environments and ecosystems at various scales. Local measures like green roofs, permeable pavements, and rain gardens are used to manage stormwater on-site and reduce urban runoff impacts. Impermeable surfaces and artificial drainage disrupt the natural hydrological cycle, resulting in reduced infiltration and water storage. Impermeable areas increase direct runoff, decrease groundwater recharge, and limit evaporation, while permeable surfaces enhance groundwater recharge and evaporation, with reduced runoff. These factors vary based on local conditions such as soil type, groundwater levels, vegetation density, and meteorological factors like precipitation and evaporation.

Germany's climate and water conditions vary widely, detailed in the Hydrological Atlas (cf. DWA 2022), with precipitation ranging from 450 mm/year to over 2,000 mm/year, evaporation from 350 mm/year to over 850 mm/year, and direct runoff from 0 mm/year to over 2,000 mm/year. This diversity results in regions with runoff dominance, high infiltration, and areas of low precipitation and high evaporation (cf. DWA 2022).

The “Natural Water Balance” indicator reflects the concept of a water-sensitive city and describes the relationship between groundwater recharge (infiltration), evapotranspiration (evaporation), and runoff. Each of these three sub-indicators can be compared to a reference value that represents an undeveloped situation under the same geographical, geological, and morphological conditions. The deviation from this reference value can be understood as a deviation from a potential natural water balance. Detailed calculation methods outlined by DWA guidelines ensure precision but demand detailed data. Each of these sub-indicators impacts urban structure differently.

Summary and conclusion

Core indicators have emerged from literature and scientific discourse, particularly in the “heat mitigation through climate-active urban green spaces” area, which influences urban structure across different spatial contexts (core city, outskirts, regional subspaces). Long-term monitoring feasibility and impact assessment are key considerations of this quantitative approach. Though, the assessment of good living conditions in cities requires a qualitative perspective encompassing climatic, functional, social, and spatial-aesthetic aspects.

From extensive expert workshops and interviews, two core indicators have been identified: “heat mitigation through climate-active urban green space” and “nature-based water management”. The former includes green space percentage (public and private), green supply (public green space per capita), accessibility to public green spaces, and tree coverage, all crucial for climate and public health benefits. Sub-indicators within green

supply assess the ratio of public green spaces per capita and their accessibility, vital for providing high-quality green spaces within walking distance. Tree coverage, approximating green volume, is essential for its cooling effects through evapotranspiration and shading, with water supply being a critical qualitative factor influencing their effectiveness.

Each sub-indicator relies on varying datasets to derive nationally uniform quantitative assessments for climate adaptation strategies. “Nature-based water management” focuses on groundwater recharge, evapotranspiration, and runoff, tailored to Germany's diverse climatic and hydrological conditions. Spatially detailed water balance mapping, achievable through diverse calculation methods (cf. DWA 2022), informs localized management practices, yet uniform nationwide application remains a challenge. Recommendations include integrating the ΔW water balance core indicator and an initial permeable area indicator for nationwide data collection efforts.

Tiered application of indicators

Quantifying the achievement of climate adaptation measures through indicators in urban development is situated within the independent and integrative logic of urban and spatial planning. This involves the fundamental tension between uniform data collection at the federal level and the implementation of goals at the local level, while respecting municipal planning authority.

For the core indicators “Heat prevention through climate-active urban green spaces” and “Natural water balance”, their sub-indicators, and potential initial indicators for rapid implementation in practice, a tiered application is therefore recommended.

1. Utilize existing datasets for nationwide data capture at a resolution of 10m x 10m to depict core and initial indicators.
2. Define climate remediation areas using a gradient representation to prioritize spatial zones, avoiding rigid administrative boundaries.
3. Refine federal data capture and spatial delineation of climate remediation areas at higher resolutions, potentially managed by municipal administrations, supported by federal sources, or clarified centrally at the state level.
4. Implement and evaluate climate adaptation measures, integrating local conditions and qualitative aspects of urban planning.

For the fundamental implementation of climate adaptation measures, a fundamental ban on deterioration should be demanded for all urban areas in order to take account of the need to take precautions against the consequences of a changing climate in cities. For the climate remediation areas as focus areas for rapid and prioritized adaptation, an improvement requirement to achieve the target values of the indicators should be sought.

Hintergrund und Zielsetzung

Die Auswirkungen des Klimawandels sind bereits heute spürbar und werden sich voraussichtlich weiter verschärfen. Neben dem Klimaschutz zur Begrenzung des Klimawandels bedarf es auch der **Klimawandelanpassung**, um die Folgen und Risiken durch den Klimawandel abzufedern. Anpassungsmaßnahmen sind **entscheidend**, um Städte widerstandsfähiger gegenüber Hitze, Überschwemmungen und anderen Extremwetterereignissen zu machen, die absehbar in Zukunft häufiger auftreten werden.

Um diesen Entwicklungen sowohl bundesweit als auch auf Ebene der Städte und Kommunen zu begegnen, wurde am 13. Juli 2023 vom Bundeskabinett der Entwurf eines Bundes-Klimaanpassungsgesetzes verabschiedet. Dieses Gesetz zielt darauf ab, der Klimaanpassung in Bund, Ländern und Gemeinden eine verbindliche Struktur zu geben. Gleichzeitig soll die Klimaanpassung von der Bundesregierung aktiv unterstützt werden. Ein wesentlicher Baustein des Gesetzentwurfs ist die **Verpflichtung der Bundesregierung, eine vorsorgende Klimaanpassungsstrategie mit klaren, messbaren Zielen zu entwickeln**, die regelmäßig überarbeitet und konsequent umgesetzt wird. Die Erreichung dieser Ziele wird durch ein kontinuierliches Monitoring und eine Überwachung sichergestellt. Nach dem Kabinettsbeschluss werden die Beratungen im Deutschen Bundestag und im Bundesrat fortgesetzt. Das Bundes-Klimaanpassungsgesetz (KANg) ist am 22.12.2023 in Kraft getreten.

Um in Vorbereitung auf das Bundes-Klimaanpassungsgesetz (KANg) messbare Ziele und ein Monitoringsystem zu entwickeln, hat das **Bundesumweltministerium (BMUV)** Ende 2022 einen Prozess zur **Entwicklung** dieser **messbaren Ziele** in sieben Clustern eingeleitet. Das Bundesbauministerium (BMWSB) hat die Federführung für das sechste Cluster „Stadtentwicklung, Raumplanung und Bevölkerungsschutz“. Eine solche laufende Erfolgskontrolle hilft, Anpassungsstrategien weiter zu verfeinern und von erfolgreichen Praktiken zu lernen (vgl. EEA 2020).

Städte sind besonders von den Folgen des Klimawandels betroffen, da sie dicht besiedelt sind und viele Bau- sowie kritische Infrastrukturen beherbergen. Die steigende Anfälligkeit deutscher Städte für die Auswirkungen des Klimawandels wird durch die Klimawirkungs- und Risikoanalyse des Bundes deutlich (vgl. UBA 2021a). Hohe Temperaturen und Hitzewellen haben in Europa bisher mehr Opfer gefordert als alle anderen wetterbedingten Katastrophen (vgl. EEA 2019). Insbesondere Hitze führt in Städten aufgrund der vorhandenen Baustrukturen und dem reduzierten Vegetationsanteils zur städtischen Überwärmung (städtische Wärmeinsel). In Kombination dieser stadttypischen Eigenschaft mit steigenden Temperaturen und der Zunahme von Hitzeereignissen steigt das gesundheitliche Hitzesrisiko für die Stadtbevölkerung. **Zu den Herausforderungen gehören höhere Maximaltemperaturen und längere Hitzeperioden, die das Gesundheitsrisiko in städtischen Gebieten erhöhen.** Diese steigenden Temperaturen belasten das menschliche Herz-Kreislauf-System. Gleichzeitig wird städtisches Grün durch zunehmende Hitze und Trockenheit gestresst. Die Gefährdung und die Risiken können von Stadt zu Stadt variieren, da jeder Ort unterschiedlich stark mit den klimatischen Einflussfaktoren konfrontiert sein kann und über unterschiedliche Ressourcen zur Anpassung verfügt (vgl. EEA 2020).

Auch die Schäden durch Starkregen sind aufgrund des hohen Versiegelungsgrads und des geringen Retentionsvolumens in Städten besonders hoch. **Starkregenereignisse bergen** aufgrund von verstärkter Versiegelung im städtischen Umfeld und der dort erhöhten baulichen und demografischen Dichte **zusätzliche Risiken**. Um Schäden durch Klimawandelfolgen für Menschen und die Umwelt zu reduzieren und im besten Fall zu vermeiden, sollte die zukünftige Stadtentwicklung entsprechend dem Vorsorgeprinzip der Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel gestaltet werden. Besonders in Städten geht es darum, Klimarisiken wie Hitze, Trockenheit und Starkregen vorausschauend zu begegnen. Dabei spielen natürliche wie auch technische Lösungen eine wichtige Rolle, sowohl bei Neubauten als auch bei der Sanierung bestehender Strukturen. Zudem ist es entscheidend, die negativen Auswirkungen neuer Wohnungsbauentwicklung auf das Stadtklima – wie die **Zunahme der Temperaturen** durch zusätzliche Versiegelung und die **Reduzierung von Kaltluftentstehungsgebieten** – zu **minimieren oder auszugleichen**.

Für das Cluster Nr. 6 „Stadtentwicklung, Raumplanung und Bevölkerungsschutz“ sollen wenige, aber aussagekräftige Handlungsziele (Anzahl 2–3) identifiziert und Indikatoren entwickelt werden, mit denen über einen längeren Zeitraum die Zielerreichung und damit die Erfolge oder Nichterfolge der Stadt- und Raumentwicklung in der Klimaanpassung in ihrer eigenständigen Logik gemessen werden können.

Während vielfältige Klimarisiken im Cluster „Stadtentwicklung, Raumplanung und Bevölkerungsschutz“ zu adressieren sind, konzentriert sich dieses Projekt auf die folgenden Handlungsbereiche:

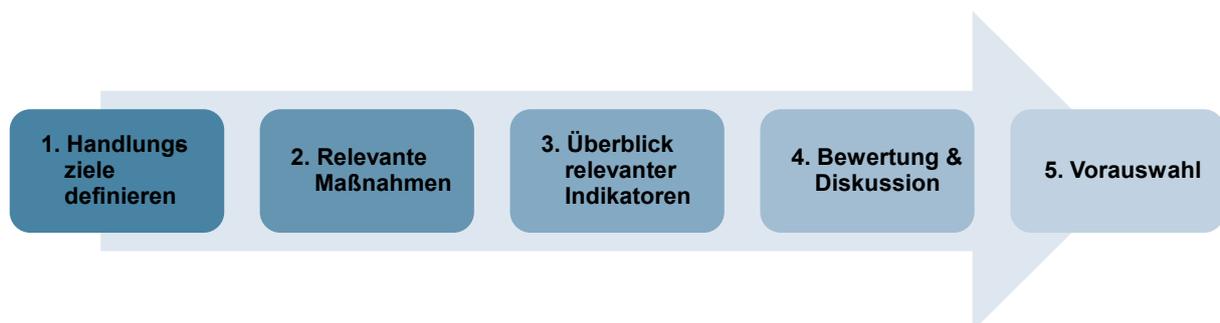
- die Hitzegefährdung in besonders thermisch belasteten Gebieten beziehungsweise Gebieten mit hitzeempfindlicher Bevölkerung reduzieren und die Nutzbarkeit, Erreichbarkeit und Erholungsfunktion von Freiflächen verbessern (Tag-Situation) (Reduktion der Hitzebelastung am Tag) und
- die Gefährdung und das Risiko von Sturzfluten und Starkregen in Städten reduzieren und die Wasserverfügbarkeit sichern (wassersensible Stadtgestaltung).

Dies geschieht auf Quartiers- bis kommunaler Ebene mit Fokus auf Stadt- und Freiraumentwicklung.

Zum vorliegenden Bericht

Der vorliegende Bericht gibt einen Überblick zum Auswahlprozess potenzieller Ziele, Indikatoren und Maßnahmen sowie zu den entsprechenden Ergebnissen. Um geeignete Ziele, Indikatoren und Maßnahmen auszuwählen beziehungsweise abzuleiten, wurde zunächst eine Literaturrecherche zu den Herausforderungen der Klimaanpassung in Städten inklusive möglicher Indikatoren durchgeführt, welche geeignet sein können, den Umsetzungsfortschritt (der Klimaanpassung) abzubilden. Dieser Vorschlag des thematischen Katalogs mündete in sieben thematischen Bereichen, die anschließend in drei Expertinnen- und Experten-Workshops und durch Hintergrundgespräche (Schritt 5: Bewertung & Diskussion) überprüft und weiterentwickelt wurden. Am Ende wurden zwei thematische Bereiche ausgewählt und weiter ausgearbeitet (Abbildung 1).

Abbildung 1
Übersicht über Anpassungsmaßnahmen



Quelle: Eigene Darstellung

Wesentliche Anpassungsmaßnahmen

Zur Anpassung an den Klimawandel sind prinzipiell zahlreiche Maßnahmen vorhanden (siehe Typologie in Abbildung 2; vgl. Kalbarczyk/Kalbarczyk 2020), die sich in ähnlicher Form auch in der deutschen sowie ausschnittsweise in den kommunalen Klimawandelanpassungsstrategien wiederfinden.

In Abbildung 2 werden Maßnahmen zur Anpassung an Hitze (vgl. Rufenacht/Acero 2017) sowie prinzipielle Maßnahmen zur Starkregenvorsorge (vgl. BBSR 2018a; Kotzee/Reyers 2016; Metropolregion Bremen-Oldenburg & im Nordwesten e. V. 2016) dargestellt. Im Folgenden wird der Fokus auf Maßnahmen der blauen, grü-

nen und grauen Infrastruktur gelegt. Strukturelle und prozessorientierte Maßnahmen werden weniger berücksichtigt, da diese nur bedingt in der unmittelbaren Stadtplanung zu finden sind und diese nur unzureichend als Output-Impact-Indikator dargestellt werden können (siehe Abbildung 4).

In der Praxis wird es darauf ankommen, Indikatoren anzubieten, die im Sinne eines Mehrwertprinzips in der Lage sind, mehrere Ziele zu adressieren. So sollten im Kontext der Überlagerung der Ziele für eine nachhaltige Entwicklung (entsprechend der Sustainable Development Goals, SDGs) der Vereinten Nationen neben **klimatischen** auch **soziale, ökonomische** und **ökologische** Ebenen angesprochen werden. Nur so wird es gelingen, politisch Verantwortliche sowie Bürgerinnen und Bürger für Maßnahmen, welche gegebenenfalls auch Einschränkungen für andere (urbane) Flächenfunktionen bedeuten können, zu gewinnen.

Abbildung 2
Übersicht über Anpassungsmaßnahmen



Quelle: Eigene Darstellung

Indikatoren für Klimawandelanpassung

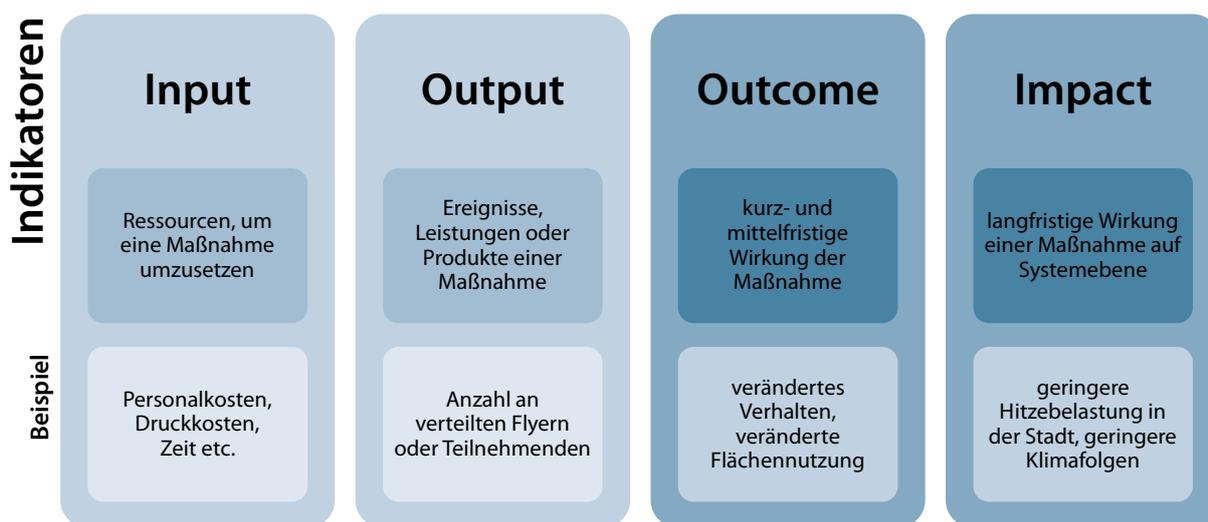
Während international nur etwa 18 % der Städte mit über 1 Million Einwohnerinnen und Einwohnern Pläne und Strategien zur Anpassung an den Klimawandel entwickelt und veröffentlicht haben (vgl. Araos et al. 2016), sind es in Deutschland circa 50 % (vgl. Difu 2021). Das Aufstellen von Strategien sagt allerdings nur bedingt etwas darüber aus, inwieweit tatsächlich Maßnahmen zur Reduktion von Hitzestress und zur Starkregenvorsorge in den Städten implementiert wurden, und ob diese Maßnahmen auch wirksam sind, um die typischen urbanen Klimawandelfolgen in ihrer Intensität abzumildern. So verfügen zum Beispiel nur knapp die Hälfte (40 %) der Staaten (weltweit) mit nationalen Klimaanpassungsprogrammen auch über Strategien und Indikatoren zur Evaluation und Bewertung der Umsetzung der Klimaanpassungsmaßnahmen (vgl. Leiter 2021).

Um die Handlungsziele operationalisierbar zu machen und damit auch eine Evaluation der Veränderungen über einen längeren Zeitraum zu ermöglichen, sollen Zieldefinitionen, Indikatoren und Kennwerte eingesetzt werden:

- Ein **Indikator** ist ein beschreibender Hinweis (Messwert oder Eigenschaft) eines vorgefundenen Sachverhalts oder eines anzustrebenden Zustands. Anstelle von inputbasierten Größen wie finanzielle Unterstützung oder Konzepte sollte der Fortschritt in der Umsetzung als Maßstab dienen (Output) (siehe Abbildung 1).
- Ein **Kennwert** beschreibt die eigentliche quantifizierbare Größe, die als absoluter oder relativer Wert angegeben werden kann. Ein Merkmal beschreibt die Eigenschaft zumeist qualitativ (vgl. BBSR 2018b).
- Die **Zieldefinition** soll möglichst spezifisch das messbare Ziel im Sinne des Handlungsziels definieren. Dieses Ziel soll eine hohe Relevanz aufweisen und die dringendsten Klimawirkungen adressieren. Es soll faktenbasiert und zuverlässig eine regelmäßige Fortschreibung erlauben und vorsorgend und konsistent mit internationalen Verpflichtungen und Verträgen der Bundesregierung sein (was an anderer Stelle zu prüfen ist). Auch Klarheit und Nachvollziehbarkeit für Bürgerinnen und Bürger sowie die Machbarkeit und Beeinflussbarkeit auf der Bundesebene sind wichtige Kriterien. Die Ziele sollten so gewählt werden, dass sie Erfolge der Stadtentwicklung in der Klimaanpassung vor allem in der Bestandsentwicklung möglichst gut abbilden und bundesweit Gültigkeit haben. Die Zielvorgabe kann absolut, in Prozentsätzen oder durch Bezugnahme auf den aktuellen Status (Verbot der Verschlechterung) oder andere messbare Bezugsgrößen erfolgen.

Dabei ist die kommunale Planungshoheit zu beachten und nach Möglichkeit soll eine Mehrzahl unterschiedlicher Maßnahmen zur Auswahl stehen, mit denen die definierten Ziele erreicht werden können. Somit sollten auch gegebenenfalls bereits in den Kommunen vorhandene (Monitoring-)Systeme genutzt werden können, sofern sie einen vergleichbaren oder detaillierteren Aussagewert im Kontext der Zieldefinition besitzen.

Abbildung 3
 Schema für die Einstufung von Indikatoren je nach Ansatzpunkt im Wirkmodell



Quelle: Eigene Darstellung nach Kaiser/Kind 2018

Eine quantifizierende Messung der Zielerreichung in der Klimaanpassung durch Indikatoren im Bereich Stadtplanung steht im Spannungsfeld mit der eigenständigen Logik von Stadt- und Raumentwicklung. Die Beurteilung guter Lebensverhältnisse in der Stadt kommt nicht ohne eine qualitative Betrachtungsebene aus. Bei Auswahl und Beurteilung der Indikatoren wird es deshalb auch darum gehen, die stadtplanerischen und stadträumlichen Wirkungen einer Beurteilung künftiger Entwicklungen zur Klimaanpassung durch die jeweiligen Indikatoren zu betrachten. Insbesondere die im Kontext der Weiterentwicklung der deutschen Klimaanpas-

sungsstrategie erforderliche Reduktion auf wenige Indikatoren birgt das Risiko einer Ausrichtung von Stadtentwicklung an wenigen Förderkriterien, die zu einer unausgewogenen räumlichen Veränderung in Städten führen kann.

Bei der Auswahl geeigneter Indikatoren ist besonders auch auf die übergeordneten Ziele der Stadtentwicklung Rücksicht zu nehmen, da die Klimawandelanpassung und die hierfür benötigten Flächen gerade in Städten in starker Konkurrenz zueinander stehen, was zum Beispiel soziale, wirtschaftliche und andere ökologische Bedarfe angeht. Indikatoren müssen daher auch nach ihrer Widersprüchlichkeit beziehungsweise ihren Zielkonflikten bewertet werden. Hinzu kommen durch eine grundsätzliche Flächenkonkurrenz auch Zielkonflikte zwischen Klimaanpassung und Klimaschutz in der (kompakten) Stadt. Dem Ziel eines klimaoptimierten grünen Stadtraums stehen aktuell noch gesellschaftspolitische Aspekte wie eine schleppende Verkehrswende und der starke Bedarf an zusätzlichem Wohnraum entgegen. Nach Möglichkeit sollte es durch die Wahl entsprechender Indikatoren gelingen, einen steuernden Impuls in Richtung einer klimaoptimierten, aber sozial gerechten und räumlich dichten Stadtstruktur zu setzen. Hierfür müssen Anpassungsmaßnahmen eine Vielzahl sich überlagernder Funktionen erfüllen.

Der ausgewählte Indikator soll zudem mit den sonstigen Zielen der Bundesregierung vereinbar sein. Dies betrifft zum Beispiel die deutsche Nachhaltigkeitsstrategie von 2002 mit dem Ziel, den täglichen Flächenverbrauch bis 2030 auf unter 30 Hektar zu reduzieren und bis 2050 in Deutschland eine Flächenkreislaufwirtschaft zu etablieren. Dies bedeutet, dass es keinen Nettozuwachs an Flächen für Siedlungs- und Verkehrszwecke geben soll. Daraus folgt das Erfordernis einer verstärkten Verdichtung beim Bauen, was auch aus Gründen des Klimaschutzes dringend erforderlich ist. Jedoch hat diese Entwicklung auch negative Auswirkungen, da Grünflächen und die grüne Infrastruktur verloren gehen. Bestehende Grünflächen werden reduziert, überbaut und versiegelt, was zu steigenden Ansprüchen und einem verstärkten Nutzungsdruck auf die verbleibenden städtischen Grünflächen führt (vgl. Dosch 2021).

Als besonders geeignet erscheinen Indikatoren und Kennwerte, die sich mit relativ geringem Aufwand zum Beispiel aus bestehenden übergeordneten Indikatoren (zum Beispiel auf europäischer Ebene) oder Satellitendaten/Luftbildbefliegungen erheben lassen, wenn auch komplexere Berechnungen zu diesem Schritt nicht ausgeschlossen werden können. Verschiedene Satelliten- und Luftsensor-Systeme können dazu dienen, Informationen zur Umsetzung von Maßnahmen im Bereich von Landbedeckungsänderungen zu erfassen, zum Beispiel Veränderungen in der Vegetation oder der Versiegelung (vgl. Wang et al. 2019). Multispektrale Orbitalsensor-Systeme wie Landsat, Sentinel, Spot, Rapid Eye (mit jeweils 30 m, 20 m, 10 m und 6,5 m Bodenauflösung) sowie Luftbildsysteme (mit 40 bis 20 cm Bodenauflösung), die digitale (Nah-)Infrarot-Orthofotos erstellen, können sehr relevant sein (vgl. Wang et al. 2019).

Zusammenfassend werden für die Auswahl geeigneter Indikatoren und Kennwerte Kriterien angelegt, die:

- im Wirkungsbereich Stadtentwicklung liegen und in diesem Rahmen beeinflussbar sind;
- die Anwendbarkeit im Bestand ermöglichen und abbildbar sind (zum Beispiel auch kleinräumige Maßnahmen wie Stadtbäume und Dachbegrünung sollten abbildbar sein), sodass eine ausreichend hohe räumliche Auflösung und Differenzierung notwendig ist;
- zeitliche Veränderungen im Sinne einer fortschreitenden Implementierung von Klimawandelanpassungsmaßnahmen zum Beispiel im Turnus von fünf Jahren abbilden können;
- Anpassungsmaßnahmen abbilden, die durch den Bund förderbar und beeinflussbar sind;
- Anpassungsmaßnahmen abbilden, die verschiedene Klimarisiken adressieren und möglichst wenig Zielkonflikte mit anderen Zielen der Stadtentwicklung und der Klimawandelanpassung aufweisen;

- mit bestehenden oder einfach erhebbaren Datengrundlagen erfasst werden können (Datengrundlage sollte entsprechend möglichst vergleichbar zwischen den Städten sein und ohne zusätzliche Belastung, insbesondere der Kommunen, zugänglich gemacht werden können);
- möglichst ohne zusätzliche Kosten für die Datenbeschaffung möglich sind (technische Ableitung der Indikatoren).

Katalog mit thematischen Steckbriefen

Vorarbeiten und Literaturreview

In der internationalen wissenschaftlichen Literatur gibt es zahlreiche Studien zur Evaluierung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen (zumeist Adaptation Tracking, Evaluation, Monitoring oder Assessment) (zum Beispiel vgl. Olazabal/Ruiz De Gopegui 2021). Dies ist eine schwierige Aufgabe, unter anderem aufgrund der unklaren Begrifflichkeit „Klimaanpassung“ und des Fehlens von vergleichbaren und aggregierbaren Größen, sodass keine konsistente und einheitliche Empfehlung besteht, wie dies vorgenommen werden soll (vgl. Olazabal/Ruiz De Gopegui 2021).

Im Allgemeinen verfolgt die Evaluierung einen oder mehrere der folgenden Zwecke: (1) Beurteilung der Notwendigkeit eines Programms oder Projekts, (2) Unterstützung bei der Konzeption und Handlungslogik, (3) Anleitung zur Umsetzung, (4) Bewertung von Ergebnissen und Auswirkungen und (5) Bewertung von Kosten und Effizienz (vgl. Arnott et al. 2016).

Der Prozess der Überwachung, Berichterstattung und Bewertung (Monitoring, Reporting and Evaluation, MRE) ist ein wesentlicher Teil eines Lernprozesses zur kontinuierlichen Verbesserung (vgl. Street/Jude 2019) und zum Erreichen weiterer Fortschritte bei Anpassungsstrategien und -maßnahmen, um die kontinuierliche Verbesserung der Klimaanpassung zu bewerten (Monitoring and Evaluation of National Adaptation Policies throughout the Policy Cycle). In dem Bericht wird erwähnt, dass gut entwickelte nationale Anpassungsstrategien (NAS) eine Vision für den Umgang mit den Auswirkungen des Klimawandels in den nächsten Jahrzehnten formulieren. Sie beschreibt die horizontalen und vertikalen Koordinierungsstrukturen und benennt die verschiedenen Akteure und Aktionsbereiche. Im Vergleich zum NAS haben die nationalen Anpassungspläne (NAP) dann idealerweise einen kürzeren Zeithorizont. Der NAP legt fest, wie der NAS umgesetzt wird und von wem er ausgeführt werden soll. Die bestehenden Strategien für Europa geben Aufschluss über die klimabedingten Auswirkungen auf europäische Städte und Gemeinden (vgl. EEA 2020). Die European Environment Agency (2020) liefert detaillierte Informationen über die Zunahme der Lufttemperatur und Niederschläge in den Städten und bereitet einen Rahmen und Strategien für die Klimaanpassung vor. Die Daten für diese Strategien stammen von verschiedenen Plattformen, darunter das Urban Adaptation Support Tool, die Leitlinien für die Berichterstattung über Klima und Energie sowie der Urban Adaptation Map Viewer und frühere Veröffentlichungen der EEA und dem Copernicus Climate Data Store für Klimaanpassungsstrategien.

Ford et al. (2013) unterscheidet prinzipiell zwei Ansätze der Evaluation: Der erste Ansatz konzentriert sich auf die Ergebnisse und erfasst auftretende Schäden, zum Beispiel hitzebezogene Mortalität, sowie eine reduzierte Gefährdung beispielsweise durch eine abnehmende Intensität der städtische Wärmeinsel (siehe Abbildung 1). Dies hat den Vorteil, dass die Wirksamkeit von Maßnahmen erfasst werden kann. Nachteile sind, dass dies nur für messbare Ergebnisse möglich ist und sich viele „weiche“ Maßnahmen nicht abbilden lassen. Der zweite Ansatz bezieht sich auf die Vorbereitung und politische Umsetzung (Preparedness) und analysiert weiche Maßnahmen wie Pläne, Veranstaltungen, Programme und eingesetzte Mittel (siehe Abbildung 1). Dies hat den Vorteil, dass Prozesse und Schritte sichtbar werden und ein detailliertes Bild über die Hintergründe geliefert wird. Die tatsächliche Wirksamkeit der Aktivitäten lässt sich so jedoch nicht erkennen.

In der Evaluation von Vorsorge (Preparedness) wird häufig ein Fokus darauf gelegt, welche Pläne und Strategien in den jeweiligen Städten vorhanden sind. Entsprechend werden diese detailliert untersucht und bewertet. Solche Studien setzen primär auf Selbstauskunft und Fragebogen zur Analyse des Stands der Umsetzung oder auf die im Internet verfügbaren Dokumente. Entsprechende Evaluationen konzentrieren sich jedoch auf die gesamte Bewertung der Anpassungsstrategie und nicht nur auf einzelne Handlungsbereiche oder Klimarisiken:

- Die von Olazabal et al. (2019) vorgeschlagene Adaptation-Policy-Credibility(APC)-Methode fasst frühere Vorschläge aus der wissenschaftlichen Literatur zusammen, die sich mit verschiedenen Teilen des politischen Anpassungsprozesses und -ergebnisses befassen, zum Beispiel Ressourcen, Planqualität, Anpassungsfähigkeit und -bereitschaft, politischer Prozess und Legitimität. Dazu werden 17 Indikatoren verwendet. Die APC-Methode wird als ein Ex-ante-Bewertungsinstrument beschrieben, mit dem beurteilt wird, wie wahrscheinlich es ist, dass lokale Anpassungsmaßnahmen wirksam sind, umgesetzt werden und langfristig Bestand haben.
- Otto et al. (2021) verwenden einen Adaptation Readiness Index, der ebenfalls eher übergeordnete Themen erfasst und bepunktet: (1) politische Führung für die Anpassung, (2) institutionelle Organisation für die Anpassung, (3) Entscheidungsfindung für die Anpassung und Einbindung von Stakeholdern, (4) Verfügbarkeit brauchbarer wissenschaftlicher Informationen für die Entscheidungsfindung, (5) Finanzierung für die Planung, Umsetzung und Bewertung der Anpassung und (6) öffentliche Unterstützung für die Anpassung (vgl. Ford/King 2015; Otto et al. 2021). Auf der Grundlage dieses Index wurden die deutschen Städte in Pionierstädte, aktive Städte, weniger aktive Städte und aufstrebende Städte eingeteilt. Als Pionierstädte wurden so Bremen, Köln, Frankfurt (Main), Hamburg, Berlin, Dresden, Potsdam, Karlsruhe, Stuttgart, Hannover, Essen und Leipzig definiert (vgl. Otto et al. 2021).
- Ein Urban Adaptation Index (UAI) wurde von (vgl. Neder et al. 2021) entwickelt, welcher auf 26 Indikatoren basiert und anhand mehr als 600 Gemeinden in São Paulo getestet wurde. Der Index beinhaltet die Themenfelder Wohnen, Mobilität, Landwirtschaft, Umweltplanung und Umgang mit Klimafolgen, für die jeweils Indikatoren definiert werden, die sich auf die Vorbereitung und die weichen Maßnahmen konzentrieren.
- Des Weiteren gibt es auch Evaluationsansätze, die auf die Qualität der Pläne und der Strategie fokussieren wie die AD Adaptation Plan Quality Assessment (ADAQA), die sechs Kriterien bewertet: (1) Ziele, (2) Faktenbasis, (3) Politiken, (4) Beteiligung der Öffentlichkeit an der Planerstellung, (5) organisationsübergreifende Koordination und (6) Details zur Umsetzung und Überwachung (vgl. Reckien et al. 2023).

Die genannten Indikatoren basieren überwiegend auf dem Monitoring der Inputs und Outcomes. Output- beziehungsweise impactorientierte Ansätze sind deutlich seltener zu finden. Außerdem zielen diese Indikatoren auf die gesamte Bewertung des Stands zur Klimawandelanpassung und beziehen sich nicht nur auf ein Handlungsfeld. Aufgrund des Fokus auf Output- und Impact-Indikatoren und des speziellen Clusters werden diese Mix-Ansätze hier nicht weiterverfolgt. Es ist aber möglich, verschiedene Indikatoren und Kennwerte zu einem Index zusammenzuführen.

Beim Thema Hitzestress wird häufig auf messbare Größen zurückgegriffen, welche die Hitzestressgefährdung wie Reduktion beziehungsweise Veränderungen der Lufttemperatur und den thermischen Komfort im Außenraum beschreiben. Dazu gehören Beobachtungen und Modellierungen der Oberflächen- und Lufttemperatur, der mittleren Wärmestrahlungstemperatur (TMRT), der Physiological Equivalent Temperature (PET), des Predicted Mean Vote (PMV) und des Universal Thermal Climate Index (UTCI) (vgl. Bouzouidja et al. 2021).

Fallbeispiel Gelsenkirchen

In Gelsenkirchen wurde ein sogenanntes Stadtklimamanagementsystem etabliert, welches GIS-basiert eine Flächenbewertung stadtklimatologischer Belange vornimmt, um die sowohl positiven als auch negativen Veränderungen im Stadtgebiet objektiv zu überwachen. Das System wurde in Zusammenarbeit mit der Abteilung Angewandte Klimatologie und Landschaftsökologie der Universität Duisburg-Essen, Prof. Dr. Wilhelm Kuttler für die Stadt Gelsenkirchen entwickelt (vgl. Stadt Gelsenkirchen 2023; Düttemeyer et al. 2013).

Kern dabei ist die Bewertung der Klimaqualität anhand verschiedener Parameter der Stadtklimaanalysekarte

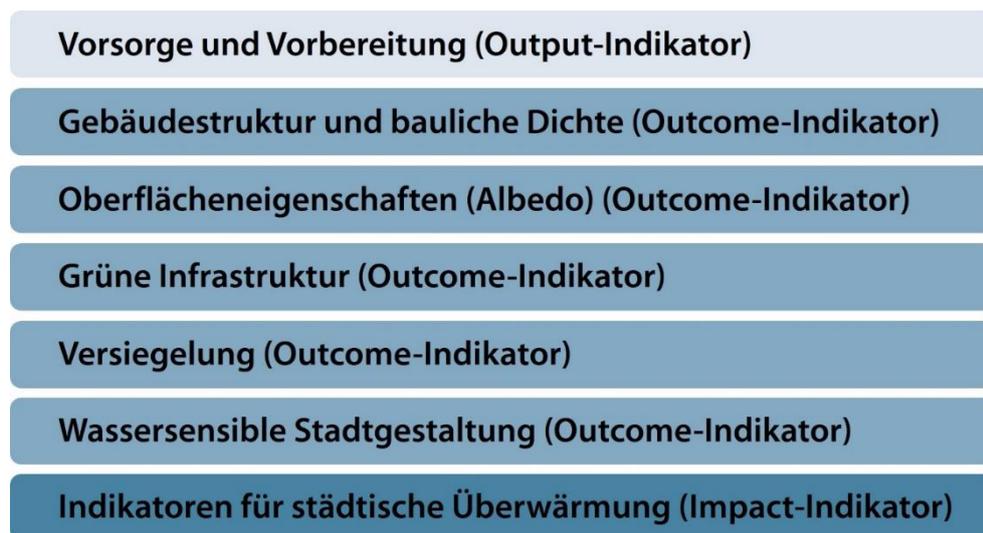
wie der Kaltluftproduktivität, der Intensität der nächtlichen städtischen Wärmeinsel, des thermischen Komforts (PET), der Ventilation (anhand der Oberflächenrauigkeit) und der Luftqualität (anhand Luftqualitätsindex). Dies ermöglicht der Stadt Gelsenkirchen unter anderem

- die Anwendung der Klimaqualität auf sämtliche Flächen im Gebiet der Stadt Gelsenkirchen,
- die Abfrage der Klimaqualität von Flächen,
- die Bilanzierung der Klimaqualität für ausgewählte, frei definierbare Flächenkontingente und
- die Bilanzierung der Klimaqualität in Relation zum Gesamtklimazustand der Stadt Gelsenkirchen.

Übersicht möglicher thematischer Bereiche und Kennwerte

Im Folgenden werden sieben mögliche thematische Bereiche und Kennwerte vorgestellt sowie eine erste Sichtung möglicher Datensätze aufgeführt. Für die Bereiche werden verschiedene Kennwerte vorgeschlagen und in Impact-, Outcome- und Output-Indikatoren untergliedert. Die Outcome-Indikatoren fokussieren sich überwiegend darauf, die Umsetzung von Maßnahmen und die zeitliche Entwicklung beziehungsweise Veränderungen zu erfassen. Die Wirksamkeit wird allerdings nur bei dem Impact-Indikator erfasst. Dies könnte in manchen Fällen im nächsten Schritt anhand statistischer Modelle, zum Beispiel bezüglich der durchschnittlichen Kühlungswirkung und der Reduktion von Hitzebelastungen, erfolgen. Ein möglicher Ansatz wäre auch, komplexere Indikatoren beziehungsweise Kennwerte nur für ausgewählte Städte anzuwenden und so auch die Repräsentativität der einfacheren Indikatoren zu überprüfen. Die in den nachfolgenden Steckbriefen angegebenen Zieldefinitionen sind nur beispielhaft zu verstehen.

Abbildung 4
Übersicht der Indikatorbereiche



Quelle: Eigene Darstellung

Steckbrief für Vorsorge und Vorbereitung durch Planungskarten oder Klimaanpassungsstrategien im Kontext Hitze & Starkregen (Output-Indikator)

Beschreibung:

Wie eingangs erwähnt, lassen sich mit den quantitativen Indikatoren die Wirksamkeit, der Stand der Umsetzung und der Grad der Implementierung (im Planungskontext) abschätzen. Ein tieferer Einblick in die Zusammenhänge und Gründe für eine Umsetzung fehlt allerdings. Daher wird hier ergänzend auch ein Output-Indikator vorgeschlagen, der Prozesse und Bemühungen bezüglich der Handlungsziele wiedergeben kann.

Mögliche Kennwerte:

Entwicklung eines Index mit Kennwerten:

- a. Zur Reduktion der städtischen Wärmeinsel: Vorhandensein von Stadtklimaanalyse- und Planungshinweiskarte, Vorhandensein von Hitzeaktionsplan, gegebenenfalls Qualität der Pläne, Vorhandensein von dezernatsübergreifendem, institutionalisiertem Austausch (zum Beispiel runder Tisch, Arbeitsgruppe) zu Hitze, Informationsangebote und Handreichungen zu Objektschutz und Verhalten auf der Website, Kataster zu Dachbegrünungspotenzial, kommunales Förderprogramm für Entsiegelung, Begrünung et cetera.
- b. Zur Erhöhung des thermischen Komforts am Tag: zusätzlich zu vorherigen noch soziale Angebote wie Hitzetelefon, gezielte Informationen für soziale Einrichtungen, vorhandenes Konzept zur Umweltgerechtigkeit und soziale Verteilung der Hitzebelastungen.
- c. Zum Starkregen: Vorhandensein von Starkregenanalyse- und Risikokarte, Vorhandensein von dezernatsübergreifendem, institutionalisiertem Austausch (zum Beispiel runder Tisch, Arbeitsgruppe) zu Starkregen, Anreize für dezentrale Regenwasserbewirtschaftung, Informationsangebote und Handreichungen zu Objektschutz und Verhalten auf der Website, Beratungsangebote.

Mögliche Zieldefinition:

80 % aller Großstädte und 50 % aller Landkreise haben 2025 eine Klimaanpassungsstrategie (dieser Aspekt wird bereits durch ein weiteres [übergreifendes] Cluster abgedeckt)

Datensätze:

Entweder Abfrage und Selbsteinschätzung der Kommunen oder Internetrecherche ausgewählter Kommunen.

Vorteile:

- bei Abfrage (verhältnismäßig) geringer Erhebungsaufwand
- Einblicke in die Prozesse und das formale Vorankommen
- Statistiken und Übersicht zu Zusammenhängen möglich (zum Beispiel führen diese Strategien auch zu einer erhöhten Umsetzung bezogen auf die Outcome-Impact-Indikatoren)

Nachteil:

- Wirksamkeit der Maßnahmen nicht erfasst

Steckbrief für Gebäudestruktur und bauliche Dichte (Outcome-Indikator)

Beschreibung:

Die Stadtstrukturen, die bauliche Dichte und das Verhältnis von Gebäude und Freiraum sind wesentliche Faktoren, die die Intensität der städtischen Wärmeinsel beeinflussen. Mit zunehmendem Gebäudevolumen und zunehmender Stadtgröße nimmt in der Regel auch die Intensität der städtischen Wärmeinsel zu (vgl. Li et al. 2020). Dieser Effekt ist etwas abgeschwächt, wenn das Gebäudevolumen auf höhere Gebäude mit breiten Straßenquerschnitten beziehungsweise Freiflächen zurückzuführen ist, anstatt auf eine flächige Bebauung (vgl. Li et al. 2020).

Um den Stadtklimaeffekt zu reduzieren und weitere ökologische Funktionen zu verbessern, wäre eine möglichst lockere und vegetationsreiche Baustruktur anzustreben. Dies lässt sich bei steigender beziehungsweise höherer Bevölkerungsdichte und Nutzfläche zum Beispiel durch Zeilenbebauung sowie Hochhäuser erreichen (hohe Geschossflächenzahl, niedrige Grundflächenzahl), wenn diese hinsichtlich des Windfelds und der konkreten Ausgestaltung lokalklimatisch optimiert gestaltet sind. Die Gebäudestruktur umfasst eine Vielzahl von Faktoren wie architektonische Gestaltung, Lage sowie Ausrichtung und Belüftung, von denen die Windmuster und der Luftaustausch abhängen. Dies kann allerdings im Widerspruch zu dem heutigen Planungsziel nach einer kompakten Stadt mit kurzen Wegen stehen. Eine kompakte Stadt hat bezüglich des Aspekts der nachhaltigen Mobilität, Energie- und Ressourceneffizienz und des Klimaschutzes sowie des Sozialgefüges wesentliche Vorteile (vgl. Koch et al. 2018). Um der zunehmenden Dichte und dem Klimaschutz in den Städten Rechnung zu tragen, wurden in den letzten Jahren kompakte und dichte Gebäudestrukturen angelegt, und es ist zu erwarten, dass dieser Anteil laut Bundesministerium für Wirtschaft und Energie in den kommenden Jahren deutlich zunehmen wird (vgl. BMWi 2017). Dieser Widerspruch oder das „Paradox der kompakten Stadt“ kann bedingt durch den Fokus auf doppelter Entwicklung von Bau- und Grünflächen oder dreifacher Innenentwicklung von Bau-, Grün- und Mobilitätsflächen entschärft werden (vgl. Kahlenborn et al. 2022; Koch et al. 2018).

Das Umland und die Stadtstrukturen inklusive der Gebäudestellung, Freiflächen und Verkehrsflächen spielen eine wesentliche Rolle für die Durchlüftung einer Stadt. Entsprechend können diese Luftleitbahnen entstehen lassen beziehungsweise behindern. Freiflächen, aber auch Verkehrsflächen und andere offene Flächen können als Luftleitbahn fungieren, wofür eine Mindestbreite von circa 100 bis 400 m notwendig ist. Die Luftleitbahnen stellen typischerweise auch einen Bestandteil von Stadtklimaanalysekarten dar, lassen sich aber auch bedingt näherungsweise als Ventilationspotenzial aus Satellitendaten abschätzen (vgl. Shi et al. 2022). Der Aspekt der Durchlüftung wird hier nicht weiterverfolgt, da er bereits in einem anderen Cluster abgedeckt ist.

Mögliche Kennwerte:

- a. Himmelsichtfaktor (aka baulich-räumliche Offenheit; engl. Sky View Factor, SVF). Der SVF beschreibt das Verhältnis zwischen der Strahlung, die von einer ebenen Fläche empfangen (oder emittiert) wird, und der von der gesamten Umgebung emittierten (oder empfangenen) Strahlung. Es handelt sich um einen Wert zwischen Null und Eins, der den vollständig bedeckten beziehungsweise freien Himmel beschreibt (vgl. Watson/Johnson 1987). Der SVF ist dort niedriger, wo die Hochhausdichte groß ist, weil die Höhe der Gebäude die Sicht auf den Himmel beeinträchtigt. Der SVF weist in der Regel eine hohe Korrelation mit der Intensität der städtischen Wärmeinsel auf (vgl. Liu et al. 2023).
- b. Local Climate Zones (LCZ) sind ein Klassifizierungssystem (vgl. Chen et al. 2022; Stewart/Oke 2012). Das System umfasst 17 Zonen, die hauptsächlich auf Eigenschaften der Oberflächenstruktur (zum Beispiel Höhe und Dichte von Gebäuden und Bäumen) und der Oberflächenbedeckung (durchlässig vs. undurchlässig) basieren. Jede Zone hat einen lokalen Maßstab, das heißt sie repräsentiert horizontale Entfernungen von einigen 100 m bis zu mehreren Kilometern.
- c. Auch weitere Kennwerte wie das Höhen-Weiten-Verhältnis, das Gebäudevolumen, die Bevölkerungs- und Siedlungsdichte wären denkbar und sind ein Indikator für die nächtliche Ausprägung der städtischen Wärmeinsel (vgl. Liu et al. 2023).

Mögliche Zieldefinition:

- SVF: keine Verringerung des SVFs (Verschlechterungsverbot), steht dann jedoch in Konkurrenz zum Themenfeld der vertikalen Nachverdichtung durch Hochhäuser und/oder Aufstockung
- LCZ: geringerer Anteil an Flächen mit dichten und pflanzenarmen LCZ-Klassen

Datensätze:

- SVF: Zur Berechnung des SVF werden häufig GIS-basierte Modellierungsansätze und Fischaugenkammermodelle verwendet. Diese können entweder punktuell mit Fisheye-Bildern oder flächendeckend, auf Basis von digitalen Oberflächenmodellen (DOM), welche die Gebäudehöhen abbilden, berechnet werden. Die Berücksichtigung der Baumhöhen, welche standardmäßig Bestandteil eines DOM sind, ist im Kontext der Abbildung der Bebauungsstrukturen, aber auch bei der Identifikation von städtischen Wärmeinseln, und entsprechend aus den Datensätzen herauszurechnen. Alternativ kann ein angepasster Eingangsdatsatz zur flächendeckenden Berechnung des SVF durch die Verschneidung von digitalen Geländemodellen (DGM) mit den Gebäudegrundflächen (inklusive der Gebäudehöhen) erfolgen. DGM, DOM sowie Daten zu den Gebäudehöhen liegen bundesweit flächendeckend vor. Erprobte Modelle zur Berechnung des SVFs wie eine Standardfunktion innerhalb ArcGIS PRO, ArcView SVF Extension (vgl. Unger 2009; Gál et al. 2009), SkyHelios (vgl. Matzarakis/Matuschek 2010) oder SOLWEIG (vgl. Lindberg et al. 2008) sind verfügbar.
- LCZ: Global steht ein einfacher Ansatz zur Verfügung, um die LCZ anhand von Satellitendaten zu ermitteln. Unter Verwendung des LCZ-Generators kann die Identifikation und Abgrenzung auch automatisiert durchgeführt werden (vgl. Demuzere et al. 2021).

Vorteile:

- großer Einfluss auf die nächtliche städtische Wärmeinsel
- Verknüpfung mit dem Indikator der grünen Stadt zur Darstellung der doppelten Innenentwicklung

Nachteile:

- Stehen teilweise im Widerspruch zur kompakten Stadt oder Stadt der kurzen Wege, somit auch zum Klimaschutz.
- Möglicherweise nur wenige Veränderungen, da sich die Gebäudedichte und Struktur im Bestand kaum verändern lässt.
- Gegebenenfalls eher schwieriger verständlich.
- LCZ ist erstmal nur rein quantitativ ein Merkmal. Eine Verknüpfung mit städtischer Wärmeinsel ist aber denkbar.

Steckbrief für Oberflächeneigenschaften (Outcome-Indikator)**Beschreibung:**

Um den Hitzestress in Städten zu verringern, spielt das Sonnenreflexionsvermögen (Albedo) verschiedener Oberflächen eine wichtige Rolle. Die Oberflächen und Materialien, die mehr Sonnenstrahlung absorbieren und weniger reflektieren, tragen zur Ausbildung der städtischen Wärmeinsel bei.

Um die städtische Wärmeinsel zu verringern, werden stärker reflektierende Oberflächen auf Gebäudedächer und Straßenbeläge verwendet. Aus den vorhandenen Studien geht hervor, dass etwa 20 bis 40 % der Gesamt-

fläche einer Stadt von Dächern bedeckt ist und die Verwendung hochreflektierender Oberflächen die Überhitzung um 0,2 bis 0,6 °C pro 10 % Albedo-Erhöhung reduzieren kann, wobei maximal 1,2 bis 3,7 °C erreicht werden (vgl. Rossi et al. 2014; Santamouris 2014; Kolokotsa et al. 2012; Synnefa et al. 2007).

Dieser Effekt ist besonders in der Nacht und für die Reduzierung der nächtlichen Wärmeinsel wirksam, weil durch die erhöhte Reflektion potenziell weniger Wärme vom Material aufgenommen und gespeichert werden kann. Tagsüber hingegen kann ein hoher Albedo-Wert im bodennahen Bereich die thermische Belastung und somit möglicherweise den Hitzestress erhöhen, da mehr reflektierte Strahlung auf eine Person einwirkt (vgl. Lee/Mayer 2018). Planerisch bedeutet dies, darauf zu achten, dass die Anpassung der Albedo-Eigenschaften von Oberflächen im direkten Kontext zur Funktion des Raums steht. So ist bspw. zu unterscheiden, ob ein Raum eine reine Transitfunktion (zum Beispiel Fußwege entlang größerer Verkehrsachsen oder diese querend) erfüllt, oder ob es sich um einen Raum handelt, der einen gesellschaftlich relevanten Nutzen wie die Aufenthaltsfunktion zu erfüllen hat.

Eine fehlende Berücksichtigung dieser heterogenen Eigenschaft kann zu Zielkonflikten zwischen der Tag- und Nachtsituation führen. Entsprechend sind Maßnahmen zur flächenhaften Erhöhung des Reflexionsvermögens von Oberflächen vor allem in Bereichen geeignet, wo sich keine beziehungsweise wenige Menschen aufhalten (zum Beispiel in Industriegebieten). Dabei kann auf Ebene der Dachflächen ein zusätzliches Konfliktpotenzial im Kontext der vermehrten Installation von Photovoltaik und Solarthermie entstehen (wobei davon auszugehen ist, dass die klimatischen Eigenschaften der Module in Abhängigkeit der Installation differieren). Aktuelle Forschungen liegen in diesem Bereich noch nicht vor.

Mögliche Kennwerte:

Als Albedo wird das Verhältnis von der gesamt einfallenden Sonnenstrahlung zur reflektierten Sonnenstrahlung bezeichnet. Die Albedo ist dimensionslos und nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, wobei niedrige Werte ein geringes Reflexionsvermögen bedeuten.

Mögliche Zieldefinition:

Erhöhung der Albedo um 10 % bis 2030

Datensätze:

- Satellitendaten sind anhand verschiedener Datensätze vorhanden. Copernicus bietet Oberflächen-Albedo in 1 km Auflösung. Aus Sentinel-2-Satelliten lassen sich Albedo-Werte in 10 m Auflösung erhalten, wie zum Beispiel in Lin et al. (2022) beschrieben wird.
- Luftbildbefliegungen der Bundesländer, die hochaufgelöste Bildprodukte mit einer räumlichen Auflösung von 20 bis 40 cm liefern und in der Regel alle 3 Jahre aktualisiert werden.

Vorteile:

- Synergien mit Klimaschutz und Energieeffizienz von Gebäuden möglich
- messbarer Indikator mit deutlichem Einfluss auf die städtische Wärmeinsel
- gute Datenverfügbarkeit über Satellitendaten und Luftbildbefliegungen

Nachteile:

- Je nach Einsatzort (zum Beispiel Boden) kann unter Umständen Hitzestress am Tag erhöht werden.
- Möglicherweise schwer verständlicher Indikator.
- Kaum verfügbare Daten außerhalb von Satellitendaten und Luftbildern, mit denen sich typischerweise vor allem die Dachflächen abbilden lassen.

- Bildet nur eine Anpassungsmaßnahme ab.

Steckbrief für grüne Infrastruktur (Outcome-Indikator)

Beschreibung:

Grüne Infrastruktur ist wichtig, um Bereiche mit hoher thermischer Belastung und die Intensität der städtischen Wärmeinsel zu reduzieren. Grüne Infrastruktur umfasst die verschiedensten Formen von Grünanlagen – grüne Parks, grüne Dächer, grüne Wände und das damit verbundene Kühlungspotenzial (vgl. Wong et al. 2021).

Darüber hinaus trägt sie auch dazu bei, die Auswirkungen von Starkniederschlägen speziell im urbanen Raum zu verringern und die Luftqualität in Städten zu verbessern. Viele Studien haben zudem gezeigt, dass das Betrachten und das Betreten von Grünflächen positive Gesundheitseffekte mit sich bringen. Dazu zählen unter anderem eine schnellere Erholung nach Operationen, Ertüchtigung des Herzkreislaufsystems und der mentalen Gesundheit, Erhöhung des wahrgenommenen Gesundheitsgefühls und eine verringerte Mortalität (vgl. Huang et al. 2017). Diese Wirkung ist komplex und basiert sowohl auf der sozialen (zum Beispiel Entspannung, Sport, Treffpunkt) als auch auf der ökologischen Funktion (zum Beispiel Verbesserung der Luftqualität, Reduktion der Lärmbelastung, Verbesserung des thermischen Komforts) (vgl. Huang et al. 2017), sodass sich diese Wirkungen nur bedingt über einen einfachen Indikator abbilden lassen.

Indikatoren für Stadtgrün wurden und werden bereits ausführlich durch das BBSR (2018b, 2021) und BfN (2023) behandelt und sind überwiegend unmittelbar auf die Klimaanpassung übertragbar. Daher werden diese hier nur kurz behandelt. Hier sollten Synergien gesucht und geklärt werden, ob diese Indikatoren bereits erhoben werden.

In BfN (2023) wurde bereits eine Bewertung der verschiedenen Kennwerte durchgeführt mit dem Ziel, „bundesweitliche Orientierungswerte für die Grünausstattung und Erholungsversorgung vorzulegen, die auch neue Herausforderungen der Städte wie anhaltendes Wachstum, bauliche Innenentwicklung, Anpassung an den Klimawandel, Erhalt der biologischen Vielfalt und Umweltgerechtigkeit berücksichtigen“. Bezogen auf die Klimafunktion wurden dabei folgende Kennwerte als empfohlen ausgewählt: Grünversorgung, Erreichbarkeit von Grünflächen, Ausstattung mit Straßenbäumen, Ausstattung mit Begleitgrün an Straßen, Grünraumvernetzung/Konnektivität und Umweltgerechtigkeit. Grünausstattung und Grünvolumen werden hingegen in BfN (2023) nicht weiterverfolgt.

Grundsätzlich ist, bezogen auf die Klimawandelanpassung, die Auswahl geeigneter Kennwerte für grüne Infrastruktur nicht einfach, was bereits an dem umfangreichen Werk des BfN (2023) ersichtlich wird. Dies liegt unter anderem daran, dass sich die tatsächliche klimatische Wirksamkeit der Grünfläche sowie die Entlastungsfunktion für die Bevölkerung nicht direkt abbilden lassen, da vielfältige Aspekte miteinander in Wechselbeziehungen stehen und sich entsprechend auswirken. Darüber hinaus ließen sich weitere daran angelehnte Kennwerte wie die Erreichbarkeit oder die Konnektivität entwickeln. Beispielsweise könnten diese mit einer höheren Gewichtung, in den von Überwärmung besonders betroffenen Gebieten, als Modifikator in der Entwicklung eines komplexen Index verwendet werden, wodurch verschiedene Faktoren zusammenfasst werden könnten.

Mögliche Kennwerte:

- a. Grünausstattung: Kann definiert werden als Grünanteil in % bezogen auf die gesamte administrative Fläche oder nur auf den Siedlungs- und Verkehrsflächenanteil. Grünausstattung wird auch bezeichnet als Grünbedeckung oder Green Fraction je nach Raumeinheit (vgl. Pan/Kao 2021; BfN 2023). Der Indikator

„Ausstattung mit Grünflächen“, also der Anteil von öffentlichen Grünflächen im Verhältnis zur Gesamtstadt oder einem Stadtteil oder Quartier, beschreibt keine räumliche Verteilung und hat keinen Bezug zur Zahl der Einwohnerinnen und Einwohner.

- b. Baumdeckung oder Kronenbedeckung beschreibt den Anteil der Fläche, die von Bäumen beziehungsweise höherer Vegetation bedeckt ist. Hierfür gibt es bereits auf europäischer Ebene entsprechende Indizes wie den High Resolution Layer Tree Cover Density sowie den daraus abgeleiteten Urban Atlas Street Tree Layer der Europäischen Umweltagentur.
- c. Grünraumversorgung (oder Grünversorgung) beschreibt den Versorgungsgrad der Bevölkerung mit öffentlichen (und privaten) klimawirksamen Grünflächen in einer Raumeinheit (in m^2/EW). Grünversorgung bildet somit einen Bezug zur Versorgung und räumlichen Verteilung für die Bevölkerung ab.
- d. Grünvolumenzahl (GVZ) oder Grünvolumenfläche (GVF) in m^3 Grünvolumen pro m^2 Fläche: Dieser Kennwert wird in der Literatur häufiger verwendet und hat einen deutlichen Einfluss auf das Lokalklima (vgl. Frick/Tervooren 2019; BfN 2023).
- e. Grünerreichbarkeit (zum Beispiel Verhältnis der Anzahl an Personen, die im Umkreis von zum Beispiel 300/500 m einer mindestens 1 ha großen Grünfläche wohnen zu der Gesamtbevölkerung) (vgl. BfN 2023). Urban Green Space Indicator: Die WHO (2016) schlägt einen Green-Space-Indikator vor, der sich als prozentueller Anteil an Bewohnerinnen und Bewohnern ausdrücken lässt, die eine Grünfläche einer bestimmten Mindestgröße von 0,5 oder 1 ha in 300 m Luftlinie erreichen lassen. Dieser Indikator wird in Berlin verwendet (vgl. SenStadt 2020). Der Indikator hat das Ziel die Gesundheit der Bevölkerung zu verbessern. Als Datenbasis kann hierfür der Urban Atlas verwendet werden, der im Bericht anhand einer GIS-Analyse beschrieben ist.
- f. Grünraumvernetzung/Konnektivität: Durchgängigkeit der klimatisch wirksamen Grünflächen (in Höchstabstand zwischen zwei Grünflächen in m) (vgl. BfN 2023).
- g. Grünvolumendefizit: In der Studie von Frick et al. (2020) wird Grünvolumendefizit als ein Indikator vorgeschlagen und getestet. Das Grünvolumendefizit wird auf Basis der Oberflächentemperatur, des Versiegelungsanteils und Grünvolumens pro Fläche berechnet. Basierend auf fünf deutschen Städten wurde ein lineares Modell in der Form $T(s, g) = T_0 + cs \times s - cg \times g$ entwickelt, um die Temperatur T einer Zelle in Abhängigkeit ihres Versiegelungsgrades s und der Grünvolumenzahl g zu beschreiben. Hierbei stellen T_0 , cs und cg die freien Parameter des Modells dar, welche in einem Fitprozess für jede Stadt individuell empirisch ermittelt wurden. Die Generalisierung auf alle Städte Deutschlands würde also noch weitere Analysen bedeuten. Gleichwohl wird seitens der Projektverantwortlichen eine bundesweite Möglichkeit der Bearbeitung als umsetzbar erachtet, da unter anderem auch flächendeckende Satellitendaten/Luftbilddaten vorliegen.
- h. Mikroklimatischer Wirksamkeitsindex: noch zu entwickelnder Index, der die relevanten Faktoren wie die Wasserverfügbarkeit, Form und Gestalt (zum Beispiel Anteil Bäume, Wiesen, Versiegelung) und die Konnektivität zusammenfasst, um sowohl die Quantität in Form der räumlichen Verteilung als auch die lokal klimatische Wirksamkeit als Qualität zu bewerten.
- i. Daneben gibt es noch zahlreiche weitere Kennwerte, zum Beispiel Baumartenindex (Tree Species Composition) (vgl. Huang et al. 2017), Leaf Area Index (LAI), Baumbedeckung, Biotopflächenfaktor (zum Beispiel in Berlin verwendet), Green Plot Ratio, beschattete Flächen. Es gibt auch Ansätze, welche die verschiedenen Ökosystemfunktionen von Vegetation gemeinsam abbilden (vgl. Charoenkit/Piyathamrongchai 2019).

Generell ist zu beobachten, dass vermehrt dreidimensionale Indikatoren wie Grünvolumen zum Einsatz kommen (vgl. Giannico et al. 2022). Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Kennwerten können mitunter sehr deutlich sein (vgl. Giannico et al. 2022), wodurch die Qualität – bezogen auf die entsprechende Fragestellung – nicht einheitlich verglichen werden kann.

Mögliche Zieldefinition:

Für eine mögliche Zieldefinition eignen sich aufgrund der deutlichen Unterschiede je nach Bezugsraum (ob Gesamtstadt oder Stadtteil) und den unterschiedlichen Ausgangssituationen in den verschiedenen Städten eher relative Definitionen, welche die zeitlichen Veränderungen deutlich machen. Es sollten auch längerfristige Ziele definiert werden. Hier kann auf bestehende Überlegung und Orientierungswerte, zum Beispiel von BfN (2023), zurückgegriffen werden.

Datensätze:

Die meisten der Kennwerte lassen sich anhand von Luft- und Satellitenbildern in Falschfarben-Darstellung abschätzen. Lidar-Daten geben detailliertere Ergebnisse. Das BBSR (2021) hat bereits auf Basis eines Stadtgrünrasters verschiedene Kennwerte abgeleitet wie Grünausstattung, Grünraumvernetzung, klimaaktive Flächen, Grünvolumen, Grünraumversorgung und Grünerreichbarkeit.

- a. ALKIS (Amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem) und ATKIS (Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem): Grünflächen und Parks sind eine Kategorie von amtlichen vektorbasierten Geobasisdaten, die aus den Datenbanken ALKIS oder ATKIS abgeleitet werden können. Es ist jedoch zu beachten, dass diese Daten nutzungsbezogen sind und die Erfassungsmethoden in den verschiedenen Bundesländern nur in begrenztem Maße einheitlich sind, was die Durchführung von Zeitreihenanalysen erschwert (vgl. Dosch 2021). Über die ALKIS-Liegenschaftsdaten lassen sich zudem die Flächen (Flurstücke) zwischen öffentlichen und privaten Räumen differenziert unterteilen.
- b. Landbedeckungsklassifikation des DLR, basierend auf Sentinel-2-Bildern (vgl. Weigand et al. 2020). Hier wird zwischen niedriger und hoher Vegetation unterschieden und eine räumliche Auflösung von 10 x 10 m erreicht.
- c. Grünvolumen: Das Grünvolumen lässt sich über vorhandene Satellitendaten ermitteln wie in Frick/Tervooren 2019 beschrieben ist. Einige Städte und Bundesländer erheben diese Daten bereits, zum Beispiel Berlin, Potsdam, Sachsen. Möglicherweise zukünftig abrufbar über das Projekt UrbanGreenEye und erprobt in BBSR (2021). Zusätzlich kann das Grünvolumen auch in einer höheren Auflösung über die Kombination von Luftbildbefliegungen mit digitalen Oberflächenmodellen ableiten.
- d. Baumbedeckung: mittlere Baumbedeckung in Prozent im Verhältnis zur Stadtfläche für 127 Städte in Deutschland. Der Datensatz wird alle drei Jahre fortgeschrieben. Datensatz wird als Urban Tree Cover von EEA herausgegeben.
- e. Incora-Bodenbedeckung: Die Klassifikationen beinhalten die folgenden Klassen (Rasterwerte in Klammern): Wald, niedrige Vegetation, Wasser, baulich geprägte Fläche, vegetationslose Fläche, Landwirtschaft bei einer räumlichen Auflösung von 10 x 10 m pro Pixel. Herausgegeben und entwickelt wurden sie vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) sowie mundialis GmbH & Co. KG; Incora Fläche – Dashboard (incora-flaeche.de). Das Projekt hat eine Laufzeit von 2018 bis 2022 und es ist zu prüfen, ob auch in Zukunft von weiteren Aktualisierungen auszugehen ist.
- f. IÖR-Monitor zur Grünerreichbarkeit: Dieser Indikator ist unterteilt in Erreichbarkeit städtischer Grünflächen, Grünflächenausstattung pro Einwohner:in, Erreichbarkeit naher städtischer Grünflächen und Erreichbarkeit größerer städtischer Grünflächen. Die Daten sind für deutsche Städte mit mehr als 50.000 Einwohnerinnen und Einwohnern verfügbar und werden auf einem 100-m-Raster beziehungsweise als Gebietsmittel erhoben. Diese Datensätze sind aktuell nur für 2012 verfügbar. Eine Aktualisierung für 2023 wird derzeit in einem Forschungsvorhaben des BfN durch IÖR durchgeführt.
- g. IÖR-Monitor Siedlungs- und Freiraumentwicklung: gliedert in die Typen „Grünbedeckt“, „Überbaut“ und „Sonstiges“. Aktuell nur für 2018 verfügbar.

- h. Städtische Baumkataster: Viele Städte verfügen über ein Baumkataster, in dem die vorhandenen Straßen und Stadtbäume auf öffentlichen Gebieten erhoben und charakterisiert sind. Diese Daten beinhalten allerdings in der Regel keine Bäume auf privaten Grundstücken sowie forstwirtschaftlichen Flächen und z. T. sogar nur die Straßenbäume. Die Daten liegen zudem meist nur den Kommunen selbst vor und sind oftmals nicht frei verfügbar. Ein Beispiel für die selektive und entsprechend nicht bundesflächendeckende Verfügbarkeit liefert die Plattform BaumCloudViewer des Leibniz-Instituts für ökologische Raumentwicklung e. V.
- i. Auch aus Luftbildern lassen sich Einzelbäume und Baumkronendurchmesser ableiten, wie für München von Leichtle et al. (2021) untersucht wurde. Dieser Ansatz wird gerade in der Forschung erprobt und ist aktuell nicht flächendeckend beziehungsweise für Städte verfügbar. Unter anderem wird aktuell eine kombinierte Methode vom LUP Potsdam entwickelt, mit der Luftbilder und Satellitenbilder kombiniert werden.

Vorteile:

- Anschauliche und allgemein akzeptierte Maßnahmen zum Stadtgrün werden abgebildet.
- Verschiedene erprobte Indikatoren und Datensätze verfügbar.
- Grün leistet weitere Ökosystemfunktionen, daher sind Synergien zu unter anderem Biodiversität und Erholungsfunktion zu erwarten.
- Möglicherweise sowieso schon erhobene Indikatoren.

Nachteile:

- Kein Impact-Indikator.
- Notwendige Details zur Wirksamkeit lassen sich mit den Kennwerten kaum abschätzen.

Steckbrief für Versiegelung (Outcome-Indikator)**Beschreibung:**

Versiegelung ist ein verständlicher Indikator, der die Aspekte einer Vielzahl von Maßnahmen abbilden kann. Hierzu zählen bspw. der Grünflächenanteil, die bauliche Entwicklung und die Flächeninanspruchnahme. Eine reduzierte Versiegelung zeigt also eine potenziell verminderte Aufheizung von Oberflächen und eine erhöhte Wasserdurchlässigkeit an, was für alle Handlungsziele (Reduzierung der nächtlichen Wärmeinsel, Erhöhung des thermischen Komforts am Tag und der wassersensiblen Stadtentwicklung) wichtig ist. Gleichzeitig ist der Versiegelungsgrad in einem gewissen Maße auch ein Indikator für grüne Infrastruktur.

Kirchner et al. (2021) haben herausgefunden, dass der Versiegelungsgrad ein hilfreicher Indikator für Stadtklimaeffekte ist. Eine erhöhte Bodenversiegelung im Umkreis von 1 bis 5 km kann sich erhöhend auf die Lufttemperatur auswirken, was zu einem Anstieg der Lufttemperatur im Bereich von 0,5 bis 1,5 °C führen kann. Auf der Mikroskala (im Umkreis von circa 20 m) hingegen spielt die Bodenversiegelung eine geringe Rolle, da hier andere Prozesse wie der Einfluss von Gebäuden einen größeren Effekt auf die Lufttemperaturvariabilität haben.

Die Gebäudestruktur und das Wohnumfeld haben eine große Wirkung auf die Versiegelung. Nach einer Studie von Taubenböck et al. (2021) sind aktuell 7,2 % der Gesamtfläche von Deutschland versiegelt. Wenn die gesamte Bevölkerung Deutschlands in kleinen Dörfern leben würde, so stiege der Versiegelungsgrad auf 42 % an. Wenn hingegen die gesamte Bevölkerung eine Pro-Kopf-Versiegelung wie in Innenstädten hätte, läge der gesamtdeutsche Versiegelungsgrad nur bei 2,8 %. Dies zeigt den enormen Einfluss der Bebauungsstruktur auf den Versiegelungsgrad.

Über die Entwicklung des Versiegelungsgrads lässt sich auch die Entsiegelung abbilden. Dies ist allerdings aufgrund der Kleinteiligkeit deutlich schwieriger anhand von Datensätzen abzuleiten, da verschiedene Abstufungen der Teilentsiegelung möglich sind. Hierzu zählen beispielsweise der Belagswechsel zu wasserdurchlässigen Flächen (zum Beispiel durch Rasengitterstein, Pflaster mit großem Fugenanteil, wassergebundene Decke) und die funktionale Entsiegelung (zum Beispiel durch Baumrigolen, Versickerungsschächte et cetera) (vgl. UBA 2021b). Diese Abstufungen sind jedoch, je nach gewählten Datensatz, kaum kommunal oder bundesweit flächendeckend abbildbar.

Mögliche Kennwerte:

- Bodenversiegelung in Prozent: Hier können verschiedene Bezugssysteme berücksichtigt werden. Meist bezieht sich der Wert auf die gesamte administrative Fläche oder nur auf die Straßen und Siedlungsräume.
- Versiegelte Fläche pro Einwohnerin und Einwohner: Hier wird der Anteil der versiegelten Flächen (entweder im Gesamtgebiet oder bezogen auf die Siedlungs- und Verkehrsflächen) in Relation zur Zahl der Einwohnenden gesetzt. Dies kann zu einer gewissen Umkehrung der Verhältnisse von dichten Stadtstrukturen zu ländlichen Strukturen führen. So wies zum Beispiel die Stadt München den niedrigsten Anteil versiegelter Flächen pro Kopf in Bayern auf (vgl. Esch et al. 2007).
- Entsiegelung (rückgebaute Bodenversiegelung).
- Veränderung der Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV) als Proxy-Indikator.

Mögliche Zieldefinition:

Keine zusätzliche Netto-Bodenversiegelung.

Datensätze:

Die Bodenversiegelung lässt sich aus Satellitendaten in Näherung ermitteln, wobei insbesondere die Bewertung teilversiegelter Flächen mit höheren Unsicherheiten behaftet ist. Die meisten verfügbaren Datensätze basieren auf dem Copernicus-Produkt „European Union, Copernicus Land Monitoring Service, European Environment Agency (EEA), Copernicus High Resolution Layer (CLMS-HRL-IL): Imperviousness Surface Map“. Die Daten werden alle 3 Jahre seit 2006 erfasst, zuletzt für 2018 mit einer Auflösung von 10 m, zuvor 20 m. Eine andere Methodik basiert auf den Meldungen der Nutzungsänderung zu den ALKIS-Daten (siehe Regionalstatistik). Auch andere Satelliten wie Landsat und Modis liefern prinzipiell Daten zur Versiegelung. Detaillierter und kommunal von größerer Relevanz sind hochaufgelöste Luftbildbefliegungen, die in regelmäßigen Abständen bundesweit durch Bundesländer beauftragt werden.

a. Grad der Bodenversiegelung (%) beziehungsweise Entsiegelung

- IncoRa-Bodenversiegelung basiert auf Sentinel-2-Satellitendaten mit einer räumlichen Auflösung von 10 m für Deutschland mit Fokus auf Siedlungsgebieten. Entwickelt für die Untersuchung städtischer Flächen und deren Veränderung. Aktuell verfügbar für die Jahre 2018, 2019 und 2020, Gesamtgenauigkeit von 87 %. Herausgegeben und entwickelt wurde es vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) sowie mundialis GmbH & Co. KG. Das Projekt hat eine Laufzeit von 2018 bis 2022; es ist zu prüfen, ob auch in Zukunft von weiteren Aktualisierungen auszugehen ist.
- Versiegelungsindex des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) für 134 Städte in Deutschland basiert ebenfalls auf hochauflösenden Versiegelungsdaten von Copernicus, mit einer flächendeckenden Genauigkeit von 10 x 10 m. Der mittlere Versiegelungsgrad wurde nur innerhalb der Siedlungsgebiete ausgewertet. Daher ist dieser Datensatz weniger detailliert und der IncoRa-Datensatz erscheint zunächst detaillierter, zumal zum GDV-Datensatz weniger Informationen zu Qualitätssicherung und Datenverfügbarkeit gemacht werden.

- IÖR-Monitor: Bodenversiegelungsgrad: ebenfalls auf dem Copernicus-Datensatz basierend, flächendeckend in Deutschland für die räumlichen Verwaltungseinheiten aggregiert verfügbar.
 - Daten: Verfügbarkeit alle drei Jahre, von 2006 bis 2018. Herausgegeben vom Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. Es scheint, als wäre dies ein langfristiges Projekt mit dreijährlichen Updates und daher gut geeignet. Dies ist aber zu verifizieren.
 - Darüber hinaus verfügen einige Bundesländer über eigene Versiegelungsdatensätze (zum Beispiel Niedersachsen 2021) auf Grundlage von Copernicus-Daten. Bayern nutzt Landsat-Satellitendaten von 2015. Viele Städte wie zum Beispiel Berlin oder Kassel haben ebenfalls Daten zum mittleren Versiegelungsgrad, die vermehrt aus den Copernicus-Daten abgeleitet werden.
- b. Veränderung der Siedlungs- und Verkehrsfläche (SuV)
- Länderinitiative Kernindikatoren: Veränderung der Siedlungs- und Verkehrsflächen. Zeitlich weit zurückreichender Datensatz in jährlicher Auflösung seit 1993 bis aktuell 2021 mit räumlichem Bezug auf Bundeslandebene. Der Datensatz basiert auf dem Amtlichen Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) (einheitlicher Datensatz seit 2016). Durch eine Änderung der Erfassungsgrundlage (siehe Abschnitt: Datenquellen) ist die Vergleichbarkeit der Daten seit dem Berichtsjahr 2016 mit den Vorjahren aus methodischen Gründen erheblich eingeschränkt.
 - Regionalstatistik Flächenerhebung: jährliche einheitliche Daten (seit 2016) über die Nutzung als Mittelwert pro Raumeinheit. Angegeben werden die Flächentypen: Siedlung, Verkehr, Vegetation (Landwirtschaft, Wald, Gehölz, Heide, Moor, Sumpf, vegetationslose Fläche) und Gewässer (Fließgewässer, Hafenbecken, stehendes Gewässer, Meer). Allerdings kann hier die Bodenversiegelung nur über die Änderung der Siedlungs- und Verkehrsfläche näherungsweise beschrieben werden.

Vorteile:

- prinzipiell notwendige Datensätze vorhanden, insbesondere der CLMS-HRL-IL; Nutzbarkeit für Entsiegelung möglicherweise gering, da mit einer Auflösung von 400 m² (20 x 20 m) für eine Gitterzelle für Zeitvergleiche im Kontext der Entsiegelung zu grob
- einfacher und nachvollziehbarer Indikator
- Outcome-Indikator, der die Umsetzung misst

Nachteile:

- Technische Normen, gegebenenfalls zusätzliche Kosten (BBSR).
- Nutzen in der Praxis ist zu evaluieren, um herauszufinden, auf welcher Ebene dies anwendbar ist und ob es nicht zumeist eine Erhöhung der Versiegelung gibt.
- Gegebenenfalls im Widerspruch zur Wohnraumentwicklung.
- Nur durch öffentliche Hand beeinflussbar im Bereich von Verkehrsflächen, sonst nur bedingt, vor allem Potenzial in Gewerbeflächen.
- Nutzungskonflikte mit Anwohnenden bei Entsiegelung häufig (zum Beispiel Umwidmung von Parkplätzen).

Steckbrief für wassersensible Stadtgestalt und Stadtentwicklung (Outcome-Indikator)

Beschreibung:

Bedingt durch den Klimawandel ist auch mit einem zunehmenden Auftreten von Starkregenereignissen, aber auch von Dürren, in Deutschland zu rechnen. Bei einem Temperaturanstieg von 1 °C ist eine Zunahme der

Niederschlagsmenge von fast 7 % zu erwarten (vgl. Martinkova/Kysely 2020). Zur Beschreibung der räumlichen Gefährdung durch Starkregen gibt es Methoden wie den KOSTRA-Datensatz des DWD und die Verwendung verschiedener Indikatoren wie dem Starkregenindex oder dem Precipitation Concentration Indicator oder Precipitation Concentration Period and Degree (PCP and PCD) (vgl. Darand/Pazhoh 2022; De Luis et al. 2010; Qian et al. 2022).

Anders als bei der städtischen Wärmeinsel lässt sich die Gefährdung beziehungsweise das Auftreten von Starkregenereignissen kaum durch die Stadtentwicklung beeinflussen. Dennoch können Kennwerte für die Gefährdung durch Starkregenereignisse hilfreich sein, um eine Priorisierung vorzunehmen und die Vulnerabilität gegenüber Starkregenereignissen zu reduzieren.

Blaue Infrastruktur kann einen Beitrag zur Reduzierung von Risiken durch Starkregenereignisse, aber auch zur Verringerung von Hitzestress leisten, indem die Wasserversorgung von Stadtgrün verbessert oder die Kühlungsleistung von Wasser am Tag genutzt wird. Sponge-City-Maßnahmen (Schwammstadt) sind eine Folge der Forderung nach einer nachhaltigen Stadtentwicklung, die Hochwasserschutz, Wassereinsparung, Verbesserung der Wasserqualität und Schutz der natürlichen Ökosysteme umfasst. Das Konzept sieht vor, dass Städte überschüssiges Wasser wie Schwämme absorbieren. Dies wurde erstmals im Jahr 2014 unter dem Namen Sponge City in China initiiert (vgl. Liu et al. 2018; Zhou et al. 2018), einige Maßnahmen sind allerdings schon seit vielen Jahrzehnten als lokale Regenwassernutzung bekannt.

Indikatoren für Maßnahmen für eine wassersensible Stadtentwicklung setzen auf verschiedenen Ebenen, zum Beispiel bei Oberflächen, beim Untergrund oder bei der technischen Aus-/Nachrüstung von Gebäuden, an.

Mögliche Kennwerte:

- a. Anteil an Wasserflächen/-körper (vgl. Balázs et al. 2018; Tymków et al. 2019) in m²: Wasserflächen können sich positiv auswirken, wenn zusätzliche Kapazitäten bei Starkregenereignissen vorhanden sind, denn sie können die Wassermengen umleiten, kanalisieren und speichern und so dabei helfen, Schäden durch Starkregen zu vermeiden. In Städten gibt es allerdings meist wenig Potenzial für neue oberirdische Wasserkörper. Jedoch kann die Offenlegung von Verrohrungen und die Renaturierung von kanalisierten Gewässern eine Möglichkeit darstellen den Anteil der Wasserflächen im Stadtgebiet zu erhöhen.
- b. Versiegelung beziehungsweise das Verhältnis von unversiegelter zu versiegelter Fläche ist ein Kennwert für wassersensible Stadtentwicklung (vgl. Charoenkit/Piyathamrongchai 2019).
- c. Änderung (Verringerung) des mittleren Abwasserbeiwerts (Runoff coefficient) (vgl. Charoenkit/ Piyathamrongchai 2019).
- d. Retentionsvolumen in m³ beschreibt das Volumen, das ein natürliches oder künstliches Gewässer aufweist, um einen zu erwartenden Zufluss zwischenspeichern.
- e. Water Retention Index: Der WRI ist ein zusammengesetzter Indikator, der Parameter berücksichtigt, welche die potenzielle Wasserrückhaltung, bestehend aus Wasserrückhalt in der Vegetation, den Gewässern, dem Boden und den darunterliegenden Grundwasserleitern sowie den Einfluss von Hängen und künstlich versiegelten Flächen beeinflussen können (vgl. Vandecasteele et al. 2018).
- f. Schwammstadt-Kennwerte:
 - Sponge green Rate (Schwammgrünfaktor) bezieht sich auf den prozentualen Anteil der gesamten Grünfläche, die in der Lage ist, den Oberflächenabfluss zu speichern, weiterzuleiten und zu behandeln. Grünflächenvegetation hat die Funktion der Wasserreinigung und der Bereitstellung anderer Ökosystemleistungen.

- Sponge Type Rate of urban Roads (Anteil an Schwammstadt/blauere Straßen) bezieht sich auf den Anteil der Straßenfläche, die Wasser speichern oder gezielt weiterleiten kann. Eingangsgrößen sind hierbei Einrichtungen zur Kontrolle des Abflusses: der jährliche Abfluss, die Begrünung und die Nutzung der Regenwasserressourcen.
- g. Maximale Überflutungshöhen bei definiertem Starkregenereignis (zum Beispiel Starkregenindex 7 oder 1000-jährliches Ereignis). Dies ließe sich anhand von Starkregenanalysekarten, die für immer mehr Städte von den Kommunen erarbeitet werden, ermitteln. Hier gibt es verschiedene Ansätze der Starkregenrisikobewertung, sodass eine Vergleichbarkeit nicht gewährleistet ist. Die Zielgröße der Überstauhöhe wäre zu definieren. Möglicherweise ist dieser Ansatz auch dazu geeignet, um lokale Priorisierungen vorzunehmen.
- h. Schadfrei überflutungsfähige Gebiete: In Anlehnung der Überflutungsnachweise könnte überschlägig die Fläche beziehungsweise das Volumen ermittelt werden, welche(s) bei einem Starkregenereignis lokal als temporär überflutbare Fläche zur Verfügung steht, wobei unter anderem Überstauhöhen im Kontext der Verkehrssicherungspflicht zu beachten sind.

Weitere Indikatoren könnten in Form von Verdunstungsraten, Versickerungsraten, Oberflächenabfluss oder Indizes gewählt werden, die bspw. den Anteil von gespeichertem Regenwasser abbilden können (vgl. Charoenkit/Piyathamrongchai 2019). Dies würde aber auch erweiterte Datensätze benötigen.

Mögliche Zieldefinition:

Vergrößerung von temporär überflutbaren Flächen um 5 % bis 2030 (noch zu definieren, sinnvollerweise als relative Änderung).

Datensätze:

- a. Wasserflächen: Regionalstatistik Flächenerhebung: jährliche einheitliche Daten ab 2016 über die Nutzung als Mittelwert pro Raumeinheit. Angegeben werden die Flächentypen: Siedlung, Verkehr, Vegetation (Landwirtschaft, Wald, Gehölz, Heide, Moor, Sumpf, vegetationslose Fläche) und Gewässer (Fließgewässer, Hafenbecken, stehendes Gewässer, Meer). Ein weiterer Ansatz umfasst die Verwendung von Reflexionsdaten und die Hauptkomponentenanalyse von Landsat-Satellitenbildern (vgl. Balázs et al. 2018; Tymków et al. 2019). Auch mit ihren hochauflösenden Kameras und Sensoren können Drohnen und Luftbildbefliegungen hochaufgelöste Luftaufnahmen machen. Die gewonnenen Daten werden in detaillierte 3D-Karten und 3D-Modelle umgewandelt.
- b. Siehe Steckbrief zu Versiegelung.
- c. Abflussbeiwert aus vorhandenen Datensätzen kaum ableitbar (siehe Teilentsiegelung). Dies müsste zusätzlich erhoben werden.
- d. Retentionsvolumen: Hier kann auf verschiedene GIS-basierte beziehungsweise hydrologische Modelle zurückgegriffen werden, mit unterschiedlicher Komplexität und unterschiedlichem Aufwand. Kritisch zu überprüfen ist, inwieweit sich das Retentionsvolumen für Städte auch anhand solcher Daten abbilden lässt oder ob hierfür lokale Datensätze und Fachwissen zu Durchlässen oder Zisternen notwendig sind. Im Gegensatz zu Retentionsvolumen für Hochwasser sind solche kleinräumigen Informationen gerade für stark versiegelte Flächen wesentlich.
- e. Water Retention Index wurde bereits europaweit mit einer 1-km-Auflösung für zwei Jahre berechnet, basierend auf Reanalyse und Modellierungen (vgl. Vandecasteele et al. 2018). Die Berechnung ist recht aufwendig und die Aussagekraft der Datengrundlage auf der Stadtebene ist zu überprüfen.
- f. Schwammstadt-Kennwerte: Einige der benötigten Datensätze ließen sich ähnlich zu den Grünindikatoren beschaffen. Andere Datensätze sind aktuell noch nicht verfügbar und möglicherweise kaum bundesweit zu erheben und müssen von den Kommunen zusammengetragen und erfasst werden.

- g. Starkregenanalysen sind inzwischen in vielen Städten verfügbar, teilweise auch für ganze Bundesländer. Die Methodik der Abschätzung der Starkregengefährdung ist allerdings nicht einheitlich und diese Analysen können (je nach verwendetem Modell) sehr aufwendig sein. Hier lassen sich möglicherweise Synergien zur im Bundes-Klimaanpassungsgesetz enthaltenen Pflicht zur Erstellung von Klimaanpassungsstrategien finden.
- h. Schadfrei überflutungsfähige Gebiete: Die Möglichkeit, dies auf größere Gebiete von Städten zu übertragen, ist zu klären.

Vorteile:

- Sowohl Hitze als auch Starkregen können durch blaue Infrastruktur und Schwammstadt-Indikatoren erfasst werden.
- Z. T. Abbildung verschiedener Ziele und Ökosystemfunktionen möglich, um zusätzlich auch den Zusammenhang zwischen Trockenheit und Wasserversorgung zu zeigen.
- Hohe Entsiegelungspotenziale im Verkehrsraum und große Potenziale für die Umgestaltung zu überflutungsfähigen Räumen.

Nachteil:

- Raumknappheit im städtischen Kontext, sodass eine Ausweitung möglicherweise nur bedingt gelingen kann.
- Komplexere Indikatoren sind schwierig nachzuvollziehen und erfordern detaillierte Datensätze und Analysen.
- Eine zentrale Erhebung ist ohne das Zurückgreifen auf lokales Wissen und Datenerhebung bei einigen Kennwerten schwer möglich.

Steckbrief für städtische Überwärmung (Impact-Indikator)**Anmerkung:**

Dieser Indikatorenbereich wird im Weiteren nicht vertieft betrachtet, da das Handlungsziel „städtische Wärmeinsel“ als nächtliches Phänomen, das maßgeblich durch die Bebauung beeinflusst wird, in einem anderen Cluster betrachtet wird.

Beschreibung:

Als Indikator könnte die Veränderung der Intensität von städtischen Wärmeinseln herangezogen werden. Das hat den Vorteil, dass direkt die Wirksamkeit – also die Reduktion der nächtlichen Wärmeinsel – erhoben wird, ohne den Umweg über die Umsetzung von Maßnahmen machen zu müssen, wie es in den meisten anderen vorgeschlagenen Indikatoren der Fall ist. Gleichwohl sind die verfügbaren Datensätze eher gering und die Erhebung je nach Ansatz aufwendig. Chancen für eine Vereinheitlichung von Stadtklimaanalysekarten und somit die Schaffung einer vergleichbaren Datengrundlage im Rahmen des Klimaanpassungsgesetzes könnten genutzt werden. Die städtische Wärmebelastung lässt sich bedingt auch über einfachere Kennwerte wie die Oberflächentemperatur oder die Local Climate Zones beziehungsweise Klimatope abschätzen.

Mögliche Kennwerte:

- a. Biometeorologische Indizes: Es stehen verschiedene erprobte biometeorologische Indizes zur Verfügung wie zum Beispiel der Universal Thermal Climate Index (UTCI), die Physiological Equivalent Temperature (PET) oder Perceived Temperature (PT) (vgl. Blazejczyk et al. 2012). Sie werden typischerweise als Äquivalenztemperatur („gefühlte Temperatur“) in °C angegeben. Solche Indizes beschreiben den thermischen

Komfort (von Hitze- bis Kältestress) deutlich genauer als die Lufttemperatur allein, da weitere Klimaelemente wie die Sonnenstrahlung, die Luftfeuchtigkeit und die Windgeschwindigkeit sowie die Kleidung und die körperliche Aktivität berücksichtigt werden können. Dies spielt, bezogen auf Hitzestress, gerade für die Tagsituation, wo die Sonnenstrahlung ein wichtiger Einflussfaktor ist, eine Rolle. In Sommernächten gleichen sich die Werte mit der Lufttemperatur wieder an, sodass die Aussage für die Bewertung der nächtlichen städtischen Wärmeinsel in der Regel nicht sonderlich von der Lufttemperatur abweicht.

- b. Maximale städtische Wärmeinsel in °C: Dies ließe sich als die maximale Lufttemperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland definieren, die innerhalb des Datensatzes auftritt.
- c. Veränderung der Landoberflächentemperatur: Die Landoberflächentemperatur lässt sich relativ einfach aus Fernerkundungsdaten ableiten und ist somit flächenhaft verfügbar. Anzumerken ist, dass die Landoberflächentemperatur beziehungsweise die Oberflächentemperatur prinzipiell kein besonders guter Indikator für thermischen Komfort von Menschen ist. Über verschiedene Verfahren lässt sich die Lufttemperatur aus dem thermischen Komfort abschätzen.
- d. Verschneidung mit Vulnerabilität der Bevölkerung: Es gibt verschiedene Ansätze, um die Hitzeanfälligkeit der Bevölkerung zu beschreiben, die stark vom Alter und Gesundheitszustand beeinflusst ist. Es lassen sich hier einfache Kennzahlen wie zum Beispiel Anteil an Personen unter 3 Jahren und über 65 Jahren pro Stadtteil definieren. Es gibt aber auch aufwendigere Indikatoren wie den Heat Vulnerability Index (HVI), bei denen soziale/umweltbedingte Anfälligkeit (Bildung/Armut/Herkunft/Grünflächen), soziale Isolation, Häufigkeit von Klimaanlageanlagen und Anteil älterer Menschen/Diabetes berücksichtigt werden (vgl. Reid et al. 2009).
- e. Veränderungen der abgeschätzten hitzebezogenen Mortalitätsraten: Viele Studien haben den Zusammenhang zwischen Hitze und Mortalität auf Basis von Klimadaten aufgezeigt.

Mögliche Zieldefinition:

- a. Verringerung beziehungsweise keine Erhöhung der thermischen Belastung
- b. Verringerung der maximalen städtischen Wärmeinsel (UHI) um 2 °C bis 2030, keine Erhöhung der maximalen städtischen Wärmeinseln
- c. keine Erhöhung der maximalen Wärmeinsel der Oberflächen (SUHI) bis 2030
- d. keine Erhöhung der Wärmebelastung für vulnerable Gebiete
- e. keine Erhöhung der hitzebezogenen Mortalitätsraten

Datensätze:

- a. Biometeorologische Indizes sind in Städten räumlich sehr variabel, da sie zum Beispiel durch Schatten erheblich beeinflusst sind. Daher ließen sich diese Indizes nur mit einer hohen räumlichen Auflösung, welche die Straßen- und Gebäudestrukturen abbildet, sinnvoll nutzen. Hierfür sind Abschätzungen oder Berechnungen, zum Beispiel in GIS oder mit hochaufgelösten Klimamodellen, notwendig, die anhand der Gebäudestruktur verschiedene Dichteindikatoren wie den Himmelssichtfaktor und der vorherrschenden meteorologischen Bedingungen die biometeorologischen Indizes ermitteln. Dies ist somit recht aufwendig. Gleichwohl werden in den Stadtklimaanalysekarten typischerweise biometeorologische Indizes ermittelt, auf die zurückgegriffen werden kann.
 - Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Intensität der städtischen Wärmeinsel zu ermitteln, die sich in ihrem Aufwand und der Qualität deutlich unterscheiden. Prinzipiell ist dies weniger aufwendig als bei den biometeorologischen Indizes, da weniger Parameter aufgelöst werden müssen und somit eine niedrigere räumliche Auflösung ausreicht.

- Stadtklimamodellierung: Für ausgewählte Städte könnte in einem regelmäßigen Turnus von zum Beispiel 10 Jahren eine numerische Stadtklimaanalyse durchgeführt werden, die anhand von hochaufgelösten und aktuellen Eingangsdaten (zum Beispiel Gebäude, CityGML, Vegetationsbedeckung, Lidar-Überfliegungen, Flächenerhebung und Oberflächeneigenschaften) die städtebauliche Entwicklung und die wesentlichen Klimawandelanpassungsmaßnahmen abbildet. Solche Eingangsdaten sind in vielen Städten bereits verfügbar. Mit der numerischen Modellierung lassen sich detaillierte Aussagen über die Wirkung auf die städtische Wärmeinsel und die thermische Belastung am Tag treffen. Je nach verwendetem Modell (zum Beispiel PALM4U, WRF) sind Aussagen mit einer räumlichen Auflösung von circa 5 m bis 1 km erreichbar.
 - Vorhandene offizielle Wetterstationen des DWD: Der DWD betreibt derzeit acht Stadtklimamessstationen (Hamburg, Berlin, Hannover, Dresden, Frankfurt, München, Freiburg, Regensburg), die noch um einige Stationen erweitert werden sollen. Hier lässt sich die maximale Wärmeinsel „relativ einheitlich“ ermitteln. Auch über das Luftqualitätsmessnetz der Bundesländer werden innerstädtische Temperaturen erhoben, die herangezogen werden können.
 - Viele Städte und Forschungseinrichtungen betreiben eigene Stadtklimamessstationen mit teilweise vielen Messstationen (zum Beispiel Berlin, Kassel, Freiburg).
 - Einsatz von Crowdsourcing-Daten der Lufttemperatur, die von Bürgerinnen und Bürgern gerade in den größeren Städten in großer Zahl zur Verfügung stehen. Hierfür gibt es erprobte Qualitätssicherungswerkzeuge, die automatisiert angewendet werden können (vgl. Fenner et al. 2021; Meier et al. 2017).
 - Copernicus „Urban heat island intensity for European cities from 2008 to 2017 derived from reanalysis“, räumliche Auflösung 100 m: Dieser Datensatz basiert auf einer aufwendigen Reanalyse-Modellierung. Hier sind nur wenige deutsche Städte abgebildet (Berlin, Köln, Düsseldorf, Frankfurt, Hamburg, Leipzig, München) und es ist unklar, ob dieser Datensatz fortgeschrieben wird.
- b. Verwendung von Satelliten gestützten Datengrundlagen der Oberflächentemperatur (Land Surface Temperature, LST): Die Oberflächentemperatur ist nicht mit der Lufttemperatur gleichzusetzen und beschreibt insbesondere die thermische Belastung in einem geringeren Maße als die Lufttemperatur. Die Oberflächentemperatur kann aber dennoch geeignet sein und hierfür stehen verschiedene Produkte bereit. LST wurden auch verwendet, um Hotspots in der Stadt zu identifizieren (vgl. Coutts et al. 2016). ESA hat aktuell, basierend auf Sentinel-2-Bildern, eine räumliche Auflösung von 20 m, die über statische Ansätze noch erhöht werden kann. Außerdem ist es auch prinzipiell möglich die Lufttemperatur aus der Oberflächentemperatur abzuleiten (vgl. Goldblatt et al. 2021). Das Projekt UrbanGreenEye bietet auch bereits eine interaktive Karte der Landoberflächentemperatur an, mithilfe derer zum Beispiel Zeitreihen für Leipzig seit 1980 bis heute erstellt werden können.
- c. Datengrundlagen für die Vulnerabilitätsabschätzung sind prinzipiell, jedoch in unterschiedlicher räumlicher Auflösung (aufgrund von Datenschutzbestimmungen), verfügbar. Solche Vulnerabilitätsdaten lassen sich dann mit den Kennwerten biometeorologischer Indizes oder Temperaturen überlagern, um eine Priorisierung von Risikogebieten zu erhalten.
- d. Auf Grundlage von Temperatur oder biometeorologischen Indizes kann mittels statistischer Modelle auch eine Abschätzung der Klimarisiken wie Mortalitätsraten erfolgen. Dies macht aufgrund von enthaltenen Unsicherheiten nur bei einer guten Datengrundlage der städtischen Überwärmung Sinn. Gleichzeitig ist zu beachten, dass die Mortalität von vielen Faktoren abhängt und kaum direkt von der Stadtentwicklung beeinflussbar ist.

Vorteile:

- Sowohl Hitze als auch Starkregen können durch blaue Infrastruktur und Schwammstadt-Indikatoren erfasst werden.

-
- Zum Teil Abbildung verschiedener Ziele und Ökosystemfunktionen möglich, um zusätzlich auch den Zusammenhang zwischen Trockenheit und Wasserversorgung zu zeigen.
 - Hohe Entsiegelungspotenziale im Verkehrsraum sowie große Potenziale für die Umgestaltung zu überflutungsfähigen Räumen.

Nachteile:

- Raumknappheit im städtischen Kontext, sodass eine Ausweitung möglicherweise nur bedingt gelingen kann.
- Komplexere Indikatoren sind schwierig nachzuvollziehen und erfordern detaillierte Datensätze und Analysen.
- Eine zentrale Erhebung ist ohne das Zurückgreifen auf lokales Wissen und Datenerhebung bei einigen Kennwerten schwer möglich.

Auswahlprozess

Der Auswahlprozess geeigneter Ziele, Indikatoren und Maßnahmen erfolgt über einen Prozess (Trichtern) in Fachworkshops, in Abstimmung mit dem BBSR und dem BMWWSB, unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Erkenntnisse aus den parallelen Prozessen anderer Cluster und Referate sowie durch zusätzliche Interviews zu spezifischen Fragestellungen, welche im Zuge der Erarbeitung entstehen. Diese Entwicklung erfolgt auf Basis der Vorüberlegungen des Auftraggebers BBSR/BMWSB in iterativer Abstimmung bis zur abschließenden Verdichtung (siehe Abbildung 1).

Workshop 1

Der erste fachwissenschaftliche Workshop für das Forschungsprojekt fand am 24. Mai 2023 als Onlinetermin (WebEx) statt. Den eingeladenen circa 30 Vertreterinnen und Vertretern aus Behörden, Instituten und Ministerien wurden im Vorfeld des Workshops die – aus der Literaturrecherche entwickelten – thematischen Steckbriefe mit Indikatoren und zugeordneten Zielen als Arbeitspapier für das erste Fachgespräch vorgelegt. Die fachwissenschaftliche Diskussion erfolgte in drei Gruppen, entsprechend der jeweiligen fachlichen Ausrichtung der Expertinnen und Experten:

- Themengruppe A: (maximale) städtische Überwärmung: Oberflächeneigenschaften (Albedo) und Gebäudestruktur und Durchlüftung
- Themengruppe B: grüne Infrastruktur
- Themengruppe C: Versiegelung und wassersensible Stadtentwicklung

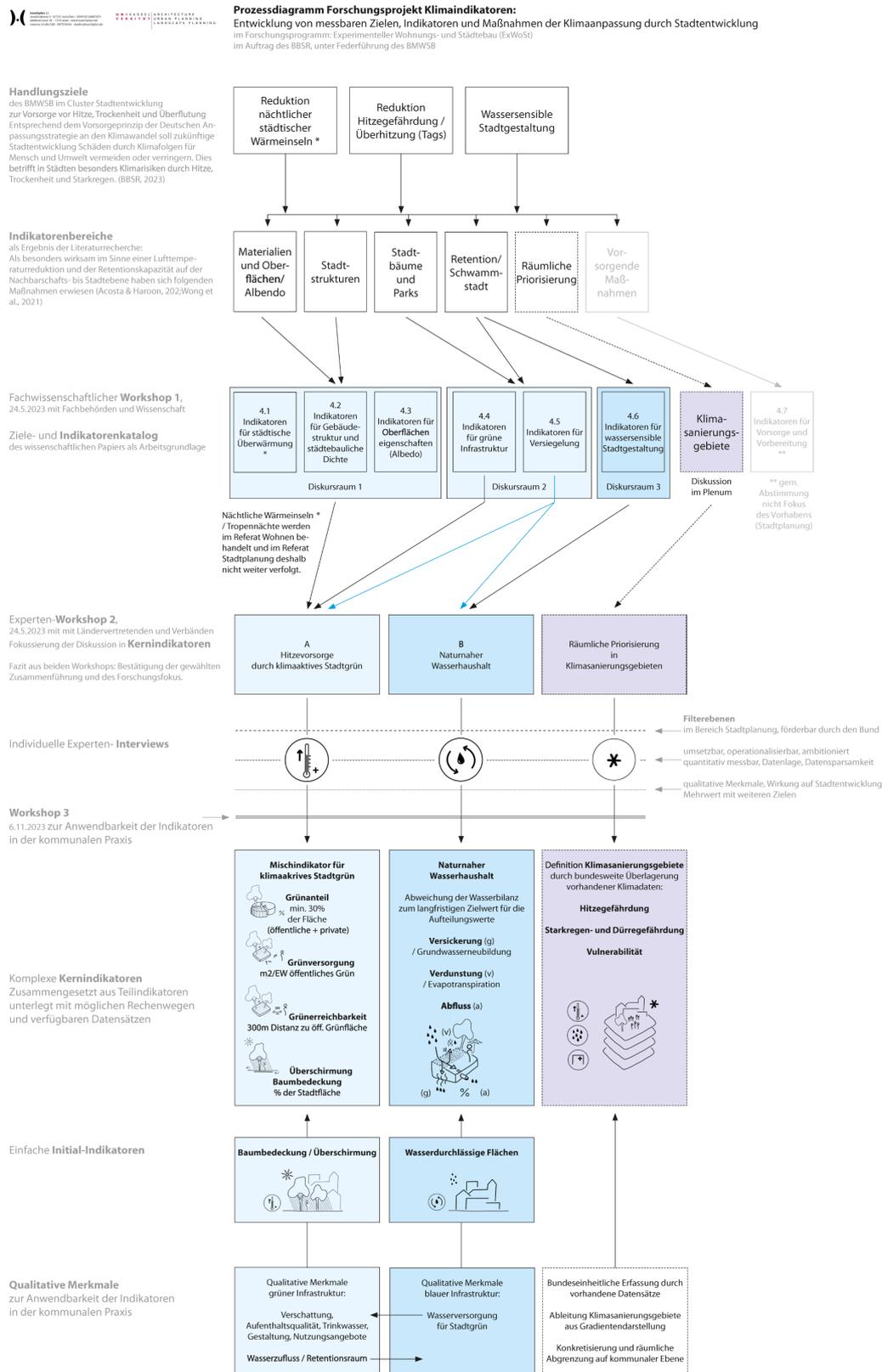
Die Diskussionen aus den drei Gruppen wurden im Plenum aller Teilnehmenden zusammengefasst und in einen übergeordneten Diskurs gestellt:

Die Gruppe A befasste sich mit städtischer Überhitzung, Albedo, Gebäudestruktur und Durchlüftung. Die Diskussion konzentrierte sich auf die Schwierigkeiten bei der Festlegung von bundesweiten Indikatoren, da verschiedene Städte unterschiedliche Bedürfnisse haben. Die Verantwortung für die Umsetzung und das Monitoring der Klimaanpassungsmaßnahmen wurde ebenfalls diskutiert. Die Verwendung von biometeorologischen Indizes wie UTCI und PET wurde als praktikabel erachtet, aber die Datenverfügbarkeit und -validität wurden infrage gestellt. Die Notwendigkeit von Interventionsschwellen und standardisierten Daten wurde betont.

Die Gruppe B befasste sich mit grüner Infrastruktur und diskutierte die Ziele der Risikoreduktion bei Extremhitze, Starkregen und Dürre sowie der Förderung der physischen und psychischen Gesundheit. Die Bedeutung von Kaltluftentstehungsgebieten, Frischluftschneisen und Biodiversität wurde hervorgehoben. Die Diskussion konzentrierte sich auf die Erreichbarkeit und Klimagerechtigkeit von Anpassungsmaßnahmen sowie auf die Kosten-Nutzen-Analyse von grüner Infrastruktur im Vergleich zu den Folgekosten des Klimawandels. Die Vielschichtigkeit der Aspekte möglicher Indikatoren im Bereich grüne Infrastruktur wurde hervorgehoben. Hier kommen mit Grünausstattung, Grünversorgung, Grünerreichbarkeit, Grünvolumenzahl, Baumbedeckung und Verteilung im Stadtgebiet unterschiedliche Gewichtungen zum Tragen. Insbesondere die Grünerreichbarkeit in ihrer sozialen Dimension zur Erreichung einer Klimagerechtigkeit und der Baumbedeckungsgrad wurden betont.

Die Gruppe C betraf das Handlungsziel der wassersensiblen Stadtgestaltung und Versiegelung. Da eine naturnahe urbane Wasserbilanz, also das Verhältnis von Verdunstung, Versickerung und Abfluss, in engem Bezug zur Versiegelung steht und das Thema Wasser gestärkt werden soll, wurde angeregt, das Ziel als naturnahen Wasserhaushalt zu beschreiben. Die flächige Bilanzierung von Niederschlägen ist herausfordernd. Eine Ermittlung wäre vereinfacht gegebenenfalls über den Grundwasserpegel oder den Abkopplungsanteil städtischer Niederschläge vom Kanalnetz denkbar.

Abbildung 5
Ablaufdiagramm des Indikatoren-Auswahl-Prozesses



Im Anschluss wurde die Idee eines Klimaanpassungsgebiets als Instrument für die räumlich priorisierte Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen diskutiert. Die räumliche Abgrenzung solcher Gebiete sollte sowohl die klimatische Belastung als auch die Vulnerabilität berücksichtigen. Es wurde festgestellt, dass Gefährdungskarten teilweise vorhanden, aber noch nicht flächendeckend verfügbar sind. Um Umweltgerechtigkeit zu gewährleisten, sollten klimatische Faktoren mit soziologischen, ökonomischen und städtebaulichen Faktoren überlagert werden. Es wurde betont, dass ausreichend Daten vorhanden sind, jedoch sensiblere Gesundheitsdaten noch fehlen. Eine sinnvolle Umsetzung erfordert eine Kombination aus Förderung, Finanzierbarkeit und Steuerung auf kommunaler Ebene, wobei Informationsdefizite und Beratungsbedarf bestehen. Maßnahmen in den Bereichen Gebäude, Freiräume und Untergrund/Boden sollten berücksichtigt werden, grundsätzlich sollte zunächst ein Verschlechterungsverbot und in Klimaanpassungsgebieten ein Verbesserungsgebot gelten.

Ergebnis des ersten Workshops

Aus den Beiträgen im Fachgespräch wurde deutlich, dass die Komplexität und Querschnittsorientierung der Stadtentwicklung einen mehrdimensionalen Ansatz erforderlich machen. Die in den Diskurs gestellten Ansätze wurden bestätigt, ergänzt und fokussiert. So lassen sich im Nachgang Kernbereiche herauslesen, die einer weiterführenden Betrachtung unterzogen werden:

1. Die Verminderung städtischer Wärmeinseln/Hitzebelastungen (Tag/Nacht) ist möglicherweise als Impact-Indikator abbildbar, der jedoch mit den Maßnahmen und ergänzenden Outcome-Indikatoren zu verbinden ist.
2. Die mehrdimensionale Anpassungswirkung von Stadtgrün, möglicherweise abbildbar durch einen Indikatoren-Mix für grüne Infrastruktur, dabei die Grünausstattung und -erreichbarkeit mit Bäumen zu verbinden, was über das Grünvolumen noch schwer messbar ist, aber näherungsweise auch über den Kronenüberschirmungsgrad zu messen wäre.
3. Die wassersensible Stadtentwicklung, möglicherweise abbildbar über einen Indikator zum naturnahen Wasserhaushalt.
4. Die Verringerung der Versiegelung als „relativ“ einfach zu messender stadtoökologischer Schlüsselindikator.
5. Die räumliche Priorisierung auf Klimaanpassungsgebiete zur gezielteren Förderung.

In der weiteren Abstimmung des Forschungsprojekts wurden die Kernbereiche 1 bis 4 zu zwei Kernzielen verdichtet, die als

- Hitzevorsorge durch klimaaktives Stadtgrün und
- naturnahe Wasserbilanz

in den Diskurs des zweiten Workshops mit Vertreterinnen und Vertretern aus Ländern und Verbänden gestellt wurden.

Workshop 2

Nach dem ersten fachwissenschaftlichen Workshop für das Forschungsprojekt fand am 7. Juni 2023 ein zweiter Workshop mit Vertreterinnen und Vertretern von Ländern und Verbänden in einem Onlinetermin (WebEx) statt. Entsprechend der Verdichtung im Vorfeld (siehe Workshop 1) erfolgte die Diskussion zunächst in zwei Teilgruppen für:

1. Themengruppe A: Hitzevorsorge durch klimaaktives Stadtgrün

2. Themengruppe B: Naturnahe Wasserbilanz

Die Ergebnisse aus den Teilgruppen wurden erneut im Plenum kurz vorgestellt, diskutiert und ergänzt.

Die Teilnehmenden der Themengruppe A bestätigten den vorgestellten Mischindikator für eine Hitzevorsorge durch **klimaaktives Stadtgrün** und, dass dieser die Ziele angemessen abdeckt. Es wurden jedoch einige ergänzende Aspekte diskutiert. Bezüglich des Grünanteils wurde vorgeschlagen, nicht nur öffentliche, sondern auch private Grünflächen einzubeziehen, einschließlich Dach und Fassadenbegrünungen. Der Zusammenhang zwischen privatem und öffentlichem Raum sollte differenziert betrachtet werden, wobei der öffentliche Raum in seiner sozialen Bedeutung hervorgehoben werden sollte. Ein integrierter Ansatz und die Betrachtung des öffentlichen Freiraums als eigenständiger Cluster wurden diskutiert. Es wurden Fragen aufgeworfen, wie man die Gesundheit der Menschen in Bezug auf Flächen darstellen kann, und wie viel Grünfläche erforderlich ist, um die Gesundheit einer Person zu gewährleisten. Die Grünerreichbarkeit sollte insbesondere in dicht besiedelten Gebieten mit wenig Grün und unter Berücksichtigung der Siedlungsdichte und Sozialstruktur verstärkt hervorgehoben werden.

Es wurde auf die Notwendigkeit hingewiesen, realistische Schwellenwerte festzulegen und zu entscheiden, welche Mindestgröße (zum Beispiel Pocket Parks) je nach Siedlungsform als maßgeblich betrachtet werden soll. Die Qualität und Nutzbarkeit der Grünflächen und des Grünvolumens sollten ebenfalls berücksichtigt werden. In Bezug auf die räumliche Verteilung von Grün wurde der Umgang mit Bestandsentwicklungen diskutiert, wobei der private Grünflächenanteil als einflussreicher Hebel betrachtet wird. Die Spannung zwischen quantitativen und qualitativen Aspekten und der Frage, wie Qualität messbar wird, wurde diskutiert. Im Zusammenhang mit der Versiegelung wurden die Verfügbarkeit von Flächen in Bestandsquartieren und die Bedeutung von Straßenräumen betont. Die Grünvolumenzahl und die Baumbedeckung spielen hier eine wichtige Rolle.

Auch das Ziel einer stärkeren Annäherung an einen **naturnahen Wasserhaushalt** in Themengruppe B erfuhr eine hohe Zustimmung, da das Zielbild Synergien zwischen den verschiedenen Handlungsfeldern der Klimaanpassung wie Überflutungsvorsorge, Starkregen und Überhitzung aufweist. Die Wasserbilanz könnte dabei den Kern darstellen, über den die Indikatoren abgeleitet werden könnten. Dabei wurden Fragen der Praktikabilität und der zielführenden räumlichen Betrachtungsebenen besprochen. Prinzipiell wäre eine räumliche Eingrenzung zielführend. Teilräume zu betrachten wäre wichtig, um sowohl positive als auch negative Entwicklungen zu erfassen und umsetzbare Maßnahmen herbeiführen zu können. Diese Teilräume müssen definiert und ein entsprechendes Raster gewählt werden. Ein Plädoyer für die Handhabung in Quartiersräumen wurde ausgesprochen, da eine Umsetzbarkeit auf Quartiersebene viel einfacher als auf gesamtstädtischer Ebene sei. Als Referenzwert für den Zielzustand stünde der natürliche Ausfluss.

Für die Umsetzung müsste idealerweise ein Austausch stattfinden, etwa mit DWA 102 Wasserhaushaltsbilanz, um entsprechende Erfahrungswerte nutzen zu können. Wasserwirtschaftsverbände verfügen über Starkregenkarten beziehungsweise über Messungen der Eintragsmengen in das Kanalsystem. Die Wasserversorgung verfügt über Informationen, welche Flächen am Kanalnetz angeschlossen sind und welche Flächen abgekoppelt werden müssten. Veränderungen wären einfach festzustellen. Der Grundwasserspiegel als Kontrollwert ist grundsätzlich gut messbar, wobei zwar die Verdunstung ausgeklammert würde, jedoch wären Grundwasserneubildung sowie Oberflächenabfluss indirekt messbar.

Aus den Teilgruppen wurden die Diskussionen zusammengefasst und vorgetragen. Die Teilnehmenden betonten, dass die zwei Ziele, Hitzeminderung durch klimaaktives Stadtgrün einerseits und naturnahe Wasserbilanz andererseits, grundsätzlich zielführend gewählt sind. **Sie betonen, dass für eine Umsetzbarkeit bei den Kommunen keine zusätzliche Belastung durch die Erhebung zusätzlicher Daten entstehen darf.** Insofern wird vorgeschlagen, einfache und in der Politik und Bürgerschaft gut kommunizierbare Indikatoren zu wählen, für die eventuell bereits Daten vorliegen. Als Beispiel für einen einfachen Indikator im Bereich Wasserhaushalt mit vorhandener Datenlage wird der Grad an Abkopplung der Niederschlagswässer vom Kanalnetz bei der

Emscher Genossenschaft angeführt. Auch wurde darauf verwiesen, dass gegebenenfalls Partizipationsprozesse erforderlich sein könnten, um die Transformationen zu vermitteln.

Seitens des BBSR wird erläutert, dass eine bundeseinheitliche Methodik erforderlich ist, die gleichzeitig die Qualität von Datenlagen, Klassifikationsunschärfen, Änderungssignalen und Trendaussagen innerhalb der (fünfjährigen) Messintervalle beachten muss.

Ergebnisse des zweiten Workshops

Der Ansatz des Forschungsprojekts, Klimaanpassungsmaßnahmen in der Stadtentwicklung allein durch quantifizierbare Indikatoren zu bemessen, wurde intensiv kontrovers diskutiert. Zahlreiche Anwesende betonten die komplexen Wechselwirkungen von Stadtentwicklungsprozessen und die zu erwartende große Dynamik im Anpassungsprozess an die Herausforderungen des Klimawandels. Insofern wurde eine ergänzende Betrachtung qualitativer Merkmale und die Beachtung von Aspekten außerhalb des gesteckten Untersuchungsfokus (zum Beispiel Abgrenzung zu Region und Gebäudeebene, Gesundheit) angeregt.

Die Identifikation von Klimaanpassungsgebieten für eine priorisierte Intervention wurde begrüßt. Dabei erfolgte der Hinweis auf die oftmalige Überlagerung von Problemstellungen, die als städtebauliche Missstände bereits die Grundlage für städtebauliche Sanierungsgebiete bilden. Es wurde auf die Notwendigkeit von integrierten Ansätzen unter Berücksichtigung vorhandener städtebaulicher Planungsebenen hingewiesen.

Gleichzeitig kann die Formulierung von Klimaanpassungsgebieten und entsprechenden Grenzwerten für einzelne Indikatoren kommunalen Verwaltungen auch dabei helfen, eigene Ziele zu formulieren, die der Orientierung und Selbstbindung dienen können. Insofern sollten Grenzwerte auch ambitioniert definiert werden. In der Frage, ob Klimaanpassungsgebiete in Bezug zur dort lebenden Bevölkerung gesetzt werden sollten, wird eine Ausweisung anhand der individuellen und tatsächlichen Notwendigkeit sowie dem konkreten Bedarf gefordert, der auch den Bevölkerungsschutz des DAS unterstützt.

Der Ansatz von grundsätzlichen **Verschlechterungsverboten** und **Verbesserungsgeboten** mit Zieldefinition in fokussierten Betrachtungsräumen scheint den Anwesenden zielführend. Dafür müsste allerdings konkret definiert werden, was als Verschlechterung zu bezeichnen ist, und festgelegt werden, ob und in welchem Bereich sich Kommunen verbessern müssen, um ein Monitoring der Kommunen zu ermöglichen. Da das Verschlechterungsgebot im Bundes-Klimaanpassungsgesetz thematisiert wird, bräuchte es eine enge Abstimmung mit den Klimaindikatoren.

Unter Umständen genügt die Identifikation grober Bereiche mit priorisiertem Handlungsbedarf in den Städten, um in einem **zweistufigen Verfahren** genauere Untersuchungen zur konkreten Abgrenzung mit ortsspezifischen Handlungsansätzen und -zielen zu unterlegen.

Workshop 3

Zum Abschluss des Forschungsvorhabens wurde der Einsatz verschiedener Indikatoren mit Vertretenden aus der kommunalen Praxis diskutiert. Dabei wurde der Blick über die Anforderung zur Entwicklung messbarer Ziele, Indikatoren und Maßnahmen der Klimaanpassung durch die Stadtentwicklung für die nationale Klimaanpassungsstrategie hinaus geweitet. Auch in mehreren anderen Prozessen, beispielsweise zur Umsetzung der Nationalen Wasserstrategie und im Rahmen der EU-VO zur Wiederherstellung der Natur, sollen Indikatoren zur Erfolgskontrolle eingesetzt werden. Kommunen sollten berichten, welche Indikatoren Sie bereits nutzen und inwieweit die diskutierten Indikatoren die kommunale Planungspraxis bei der Klimaanpassung unterstützen könnten. Dieser dritte Workshop fand am 6. November 2023 als Onlinediskussion von 9:30 bis 13 Uhr statt.

Es wurden bewusst Kommunen eingeladen, die über ganz Deutschland verteilt liegen, die eine unterschiedliche Größe und Einwohnerzahl aufweisen und die in ihrer Anpassung an die Folgen des Klimawandels unterschiedlich stark aktiv sind. Es wurden die Städte Bremen, Freiburg, Heidelberg, Karlsruhe, Leipzig, Oberhausen, Braunschweig, Kassel, München, Ulm, Augsburg, Cottbus, Halle (Saale), Guben, Reinsberg, Gütersloh, Hamburg, Stuttgart, Potsdam, Duisburg, Würzburg, Essen, Dresden, Hameln und Wörth eingeladen.

Für einen gemeinsamen Wissensstand erfolgte – nach einer Vorstellungsrunde aller Teilnehmenden – eine Einordnung in die derzeit laufende Planung und Gesetzgebungsprozesse durch das BBSR und das BMWSB sowie eine Darstellung der vorgeschlagenen Indikatoren mit ihren jeweiligen Charakteristika, ergänzt um ein Anwendungsbeispiel.

Handlungsziel – Hitzevorsorge durch klimaaktives Grün und in Bezug stehende Indikatoren:

1. Grünanteil (öffentliches und privates Grün in % je Fläche)
2. Grünversorgung (öffentliches Grün in m² je Einwohner)
3. Grünerreichbarkeit (m)
4. Baumbedeckung (und Grünvolumen)

Handlungsziel – stärkere Annäherung an einen naturnahen Wasserhaushalt:

1. naturnahe Wasserbilanz
2. versickerungsfähige Fläche

Die Diskussion der vorgeschlagenen Teilindikatoren erfolgte nacheinander in der Runde aller teilnehmenden Städte, um vergleichende Betrachtungen zu ermöglichen und eine Diskussion zwischen den Kommunen zu befördern. Der Diskurs wurde im Bereich jedes Indikators anhand von Leitfragen geführt, welche den Einsatz auf der kommunalen Ebene untersuchten:

- Ist der Teilindikator verständlich oder wird bereits vor Ort eingesetzt? Welche Erfahrungen bestehen gegebenenfalls?
- Wie beurteilen Sie den Teilindikator hinsichtlich seiner Umsetzbarkeit?
- Welche Vor- beziehungsweise Nachteile bringt der Teilindikator für Ihre Arbeit in der Kommune?
- Welche Hürden/Einschränkungen bestehen bei der Datenerhebung für den Indikator?
- Welche Unterstützung von Bund und Ländern ist erforderlich, um den Teilindikator auf kommunaler Ebene umsetzbar zu machen?
- Gibt es bessere Alternativen, um die vorgeschlagenen Indikatoren in der kommunalen Praxis zu ersetzen?

Ergebnisse des dritten Workshops

Als Ergebnis des Workshops kann festgehalten werden, dass alle diskutierten Indikatoren grundsätzlich zum Einsatz in der kommunalen Praxis geeignet sind. In zahlreichen Kommunen werden einige der vorgeschlagenen Indikatoren bereits eingesetzt, um Defizite und Handlungsbedarfe zu ermitteln. Die Einführung von verbindlichen Zielwerten auf Bundesebene für Indikatoren, die die Klimaanpassung messbar machen, wird für sehr wertvoll erachtet, um argumentative Unterstützung in kommunalen Abwägungs- und Entscheidungsprozessen zu erhalten. Offen bleibt die Frage, was geschieht, wenn Zielwerte nicht erreicht werden. Hier werden ambitionierte, aber auch realistisch zu erreichende Zielwerte gefordert oder deren flexiblere Anwendungen diskutiert, welche aber im Widerspruch zur Verbindlichkeit der Werte stehen.

Es herrscht Einigkeit, dass ein generelles Verschlechterungsverbot und ein Verbesserungsgebot für kritische Stadtbereiche sinnvoll wären, um Stadtentwicklungen klimaangepasst zu steuern. Eine Differenzierung der Zielwerte der Indikatoren nach baulichen Typologien wird angeregt.

Die kommunale Realität stellt sich für Städte unterschiedlicher Größe sehr unterschiedlich dar. In kleineren Kommunen ist oft schon der Einsatz einfacher GIS-Anwendungen nicht möglich. Hier müsste neben der Datenerfassung und Bereitstellung auch personelle Unterstützung geleistet werden. Die Vielgestaltigkeit der Kommunen lässt es zudem sinnvoll erscheinen, mit unterschiedlichen Indikatoren oder einer Kombination der vorgeschlagenen Indikatoren zu agieren, um die Anforderungen auf der Praxisebene abzubilden.

Um der Komplexität und Kleinräumigkeit der realen Gegebenheiten Rechnung zu tragen, werden vielfach auch die qualitativen Aspekte als Ergänzung für die quantitativ erfassten Indikatoren angesprochen. Dies betrifft Ausstattung und Gestaltung von Grünflächen ebenso wie die Vitalität und Größe von Stadtbäumen, die Überdeckungshöhe von unterbauten Grünflächen beziehungsweise Dachbegrünungen und die bedarfsge- rechte Verwendung anfallender Niederschläge zur Versorgung von Grünflächen.

Auswahl und Konkretisierung der Kern- und Initialindikatoren

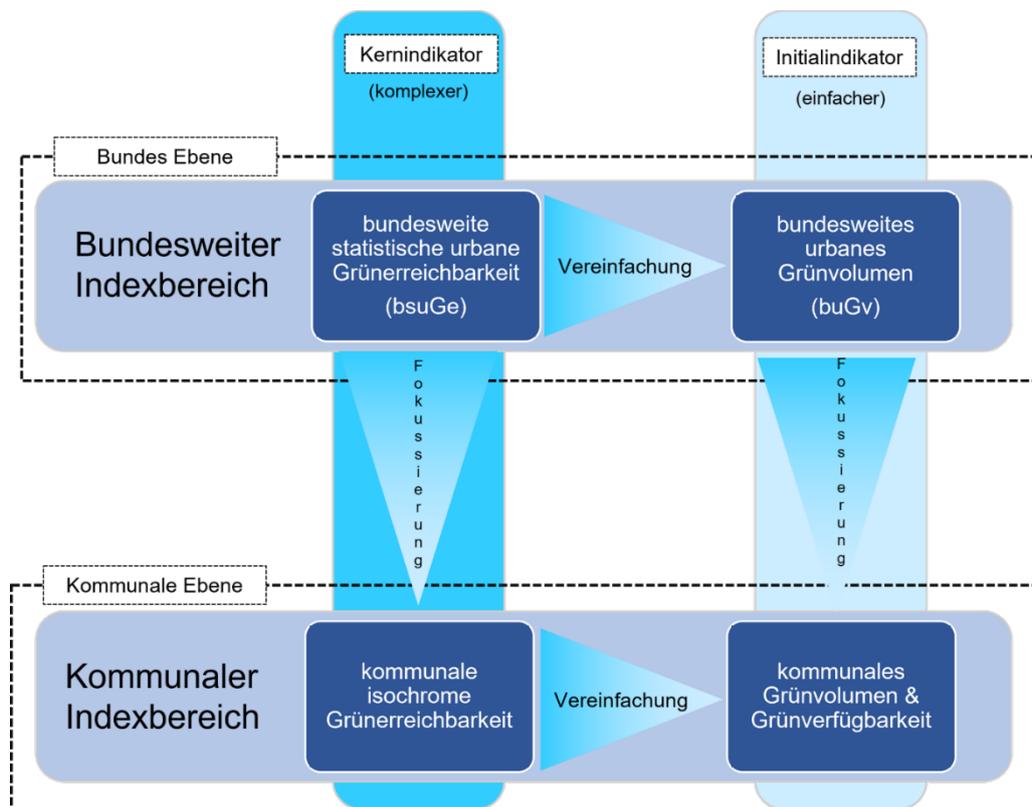
Die im Prozess bestätigten Ziele **Hitzevorsorge durch klimaaktives Stadtgrün** (abgebildet als Mischindikator), welcher insbesondere die Qualität von Bäumen in der Stadt und die Grünerreichbarkeit in ihrer sozialen Dimension hervorhebt, sowie eine **stärkere Annäherung an einen naturnahen Wasserhaushalt** werden vom Projektteam weiterverfolgt und bearbeitet. Zur Klärung offener Fragestellungen werden einzelne Expertinnen und Experten erneut in Interviews befragt. Die Idee eines möglichen Klimaanpassungsgebiets zur räumlichen Priorisierung wird ebenso als Aspekt vertieft betrachtet.

Im Folgenden werden die beiden identifizierten Themenbereiche dargestellt und mögliche Zieldefinitionen sowie zugehörige Berechnungsverfahren zusammengestellt.

Bei der Ableitung der Indikatoren im Themenbereich „Klimaaktives Stadtgrün“ wird eine 2x2-Matrix (siehe Abbildung 4) zugrunde gelegt. Zum einen wird für jeden Indikatorbereich ein komplexer Kernindikator sowie ein vereinfachter Initialindikator vorgeschlagen. Des Weiteren werden Kern- und Initialindikator dann auf Bundesebene sowie auf kommunaler Ebene übertragen, wodurch den unterschiedlichen Planungs-/Maßstabsebenen Rechnung getragen wird. Entsprechend stellt der Übergang von der Bundesebene auf die kommunale Ebene einen Prozess der Fokussierung in Bezug auf Detailschärfe und Aussagekraft dar. Daraus ergibt sich die Möglichkeit einer gestuften Ableitung entsprechend der räumlichen Planungsebene sowie der datenabhängigen Detailschärfe, wodurch ein ubiquitär einsetzbarer Indikatorbereich geschaffen werden sollte.

Für den Themenbereich „Naturnaher Wasserhaushalt“ wurde von einer nach Bundes- und kommunaler Ebene gestuften Ableitung der Kern- und Initialindikatoren aufgrund der Komplexität sowie unklaren Datenverfügbarkeit zum jetzigen Zeitpunkt abgesehen. Jedoch lässt der Aufbau des Kern- und Initialindikators in diesem Indikatorbereich auch eine spätere räumlich gestufte Entwicklung zu.

Abbildung 6
Systematischer Aufbau und logische Verknüpfung zwischen Kern-Initial-Index auf Bundesebene und kommunaler Ebene am Beispiel des Indikatorenbereichs „Klimaaktives Grün“



Quelle: Eigene Darstellung

„Klimaaktives Grün“ und „Naturnahe Wasserbilanz“

Kern- & Initialindikator „Klimaaktives Grün“

Stadtplanerische Einschätzung

Für das Ziel „Hitzevorsorge durch klimaaktives Stadtgrün“ kristallisieren sich Teilindikatoren heraus, die den Stand der Zielerreichung mehrdimensional messen könnten. Die Teilindikatoren Grünanteil, Grünversorgung, Grünerreichbarkeit und Baumbedeckung bilden unterschiedliche Aspekte des Stadtgrüns ab. Zunächst steht bei allen Teilindikatoren die klimatische Funktion im Mittelpunkt. Diese ergibt sich zum einen aus der direkten Kühlleistung von Stadtgrün durch Evapotranspiration, aber insbesondere durch die Verschattung durch höhere Vegetation und Bäume. Daraus erfolgt eine Minderung der Tagestemperaturmaxima im Stadtraum. Diese direkte klimatische Wirkung beschränkt sich auf das direkte Umfeld des Stadtgrüns und entfaltet dort nur eine kleinräumige Wirkung. Für größere Grünflächen kann eine direkte klimatische Wirkung auf die direkt angrenzenden Stadtstrukturen erwartet werden. Dies ist jedoch stark abhängig von topografischen Gegebenheiten, Windbewegungen und der Permeabilität der angrenzenden Stadtstruktur. Deshalb steht die zweite klimatische Wirkungsebene des Stadtgrüns ebenso im Fokus, die sich aus der aufsuchenden Erreichbarkeit von Grünflächen für die Entlastung der betroffenen Bevölkerung bei Hitzeereignissen ergibt. Hier lassen bereits sehr kleinräumige Maßnahmen wie „kühlende Oasen“ eine lokale Entlastung von der thermischen Belastung durch städtische Wärmeinseln erwarten. Diese klimatischen Gunsträume können bei einer bundesweiten Betrachtungsebene unterhalb der digitalen Erfassungsschwelle liegen und sollten dennoch für den Schutz der Wohn- und Arbeitsbevölkerung in kurzer fußläufiger Erreichbarkeit im Stadtraum geschaffen werden.

Der Teilindikator **Grünanteil** bemisst den Flächenanteil an privatem und öffentlichem Stadtgrün in einem urbanen Bezugsraum. Für einen Flächenanteil ab 30 bis 40 % ist eine positive klimatische Wirkung und die Minderung von Temperaturmaxima erwartbar (vgl. Rahman et al. 2022; Rötzer et al. 2019). Diese mögliche Zieldefinition erfordert eine geringe städtebauliche Dichte, wie sie typischerweise in Vorstädten oder Wohngebieten erreichbar ist. Er wird für viele innerstädtische Quartiere kaum oder nicht erreichbar sein und ist aufgrund der Zielkonflikte zur Flächeninanspruchnahme auch nicht anzustreben. Entsprechend sollte in diesen dichteren Stadtstrukturen der Fokus auf den weiteren Teilindikatoren bezüglich Stadtgrün liegen. Alternativ kann in innerstädtischen Situationen in Erwägung gezogen werden, dreidimensionale (Fassaden- oder Dachbegrünungen) und das Wasserregime verbessernde Maßnahmen einzubeziehen.

Ein weiterer Teilindikator, die **Grünversorgung**, bemisst den Anteil öffentlicher und für die Bevölkerung nutzbarer Flächen in Bezug auf Wohn- oder Arbeitsbevölkerung. Richtwerte oder Bezugsgrößen können aus den Gestaltungsvorgaben zahlreicher Kommunen im Bereich Neubau gewonnen werden. Für die wohnungsnaher Versorgung wird in verschiedenen Städten Deutschlands und der Schweiz ein Wert von 6 bis 10 m²/EW allgemein und für Arbeitsplätze beispielsweise 2 bis 5 m²/Arbeitsplatz benannt (vgl. BfN 2023). Insbesondere in Stadtquartieren mit geringem privatem Grünanteil, typischerweise in sozial schwächeren Stadtteilen, ist die Versorgung mit öffentlichen Grünflächen entscheidend für die Entlastung der Bevölkerung bei Hitze. Der Teilindikator hängt eng mit dem nachfolgenden Teilindikator Grünerreichbarkeit zusammen.

Der Teilindikator **Grünerreichbarkeit** ist dann gegeben, wenn eine relevante öffentliche Grünfläche in einer fußläufig bewältigbaren Distanz vorhanden ist. Der Indikator beschreibt den Anteil von Wohn- oder Arbeitsquartieren, welche in einer Entfernung von **300 m Luftlinie** oder **alternativ 500 m Laufdistanz** von klimarelevanten öffentlichen Grünflächen liegen, sodass diese Grünflächen bei Hitzeereignissen als kühlende Aufenthaltsorte zur Entlastung zur Verfügung stehen.

Der Teilindikator **Grünversorgung** beschreibt grundsätzlich neben der direkten klimatischen Wirkung auch die soziale Dimension des Stadtgrüns, da hier die Menge des Stadtgrüns pro Einwohnenden gemessen wird. Deren Qualität, Zugänglichkeit und Erreichbarkeit wird hierüber jedoch nicht abgebildet. Der Indikator setzt

Grün in Relation zu einer Bezugsfläche, administrativ, naturräumlich, ob als Polygon oder gerastert. Der Mehrwert besteht darin, dass ein Flächenanteil vorliegt. Er wird aber noch nicht in Bezug zu einer anderen Größe gesetzt. Dafür ist er einfach und in der Regel bereits einigermaßen verlässlich aus ALKIS oder ATKIS beziehbar und zeitreihenfähig. Der Teilindikator berührt, sofern er auf Quartiersebene erfasst wird, auch die Ebene der Umweltgerechtigkeit in Städten. Eine klimatische Wirkung von verfügbarem Stadtgrün als Schutzbereiche oder klimatische Gunsträume im Fall einer starken Hitzebelastung kann grundsätzlich unterstellt werden. Die Grünversorgung sagt jedoch zunächst nichts über die konkrete klimatische Wirkung durch das Grünvolumen oder über eine einschränkende Belastung zum Beispiel durch Verkehrslärm oder Ähnliches aus, und beschreibt auch nicht die Aufenthaltsqualität und damit die für den Menschen entlastende Wirkung des Stadtgrüns. Letztere lassen sich nur durch qualitative Merkmale von öffentlichen Grünflächen beschreiben. Entsprechende qualitative Vorgaben sind generell bei Planerschaft und Verwaltung bekannt, sollten zusätzlich flankierend benannt werden und umfassen neben attraktiven Angeboten für den Aufenthalt zum Sitzen und Liegen im Schatten auch die Anlage von (Trink-)Brunnen und Spielmöglichkeiten sowie eine ausreichende Pflege der Grünflächen.

Der Teilindikator **Grünvolumen** ist deutlich aufwendiger zu ermitteln und die Datenverfügbarkeit stellt hier eine technische Herausforderung dar. Der Überschirmungsgrad beschreibt das Grünvolumen jedoch in guter Näherung und ist aus Luftbildauswertungen gut ermittelbar.

Der Teilindikator **Baumbedeckung** oder Überschirmung durch Grün beschreibt den Flächenanteil, welcher in der Horizontalprojektion von höheren Vegetationsstrukturen bedeckt wird, und stellt mit seiner Verschattungswirkung ein essenzielles Maß für den Schutz vor Hitze dar. Der Indikator wird als **Tree Canopy Cover (TCC)** ebenfalls von der EU im Rahmen des Restoration Law herangezogen. Die direkte klimatische Wirkung im Bereich Evapotranspiration steht in direktem Verhältnis zum Grünvolumen, also einem Maß, welches die Belaubungsdichte abbildet und damit in Abhängigkeit von der Baumart auch ein Maß für die Verschattungswirkung darstellt. Hier bestehen deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der Baumart und der Vitalität des überschirmenden Stadtgrüns. Dem Indikator kommt insbesondere in hoch verdichteten und innerstädtischen Quartieren eine wichtige Bedeutung zu, da in diesen Stadtbereichen eine großflächige Begrünung oftmals aufgrund der gering verfügbaren Flächen nicht realistisch ist und in starker Konkurrenz zu anderen Nutzungen steht. Hier kann der Fokus auf Maßnahmen liegen, die durch diesen Indikator gemessen beziehungsweise abgebildet werden können, wie zum Beispiel die Anlage von auch kleineren „oasenartigen“ Orten, welche unter ihrem Kronenraum die Aufenthaltsqualität für den Menschen maßgeblich verbessern können. Wichtig ist der Indikator Baumbedeckung auch für den Erhalt des Baumbestands. Im Besonderen befördert der Teilindikator auch die Aufwertung grauer Infrastrukturen im Bereich von Stadtstraßen durch die Anlage von Baumreihen, Alleen und Einzelpflanzungen im Straßenbereich. Städtische Straßenräume befinden sich grundsätzlich im Besitz und damit auch in der Verfügbarkeit der Kommunen und stellen eine erhebliche Flächenressource zur Klimaanpassung dar. Für diesen Ansatz sind im unterirdischen Straßenraum entsprechend große wasserversorgte und spartenfreie Wurzelbereiche zu schaffen, um eine dauerhafte und klimaaktive grüne Infrastruktur zu ermöglichen. Dies berührt den Bereich der Neuaufteilung von Verkehrsräumen im Zuge der Mobilitätswende.

Als wesentliches qualitatives Merkmal für alle Indikatoren im Bereich Stadtgrün gilt es, die Wasserversorgung der Grünflächen und Baumpflanzungen zu berücksichtigen. Eine entsprechende stadtklimatische Wirkung, wie sie in Klimafunktionskarten und Modellierungen unterstellt wird, ist nur durch eine gute Wasserversorgung gegeben. Die Wasserversorgung von Stadtgrün ist abhängig von Bodenverhältnissen, kleinräumigen topografischen Gegebenheiten und der entsprechenden geplanten Wasserführung im gebauten Stadtraum. Die direkte Wasserversorgung ist mithilfe einer einheitlichen fernerkundlichen Messung derzeit nicht möglich. Gleichwohl lässt sich jedoch die Vitalität des Stadtgrüns mithilfe von (Nah-)Infrarot-Luftbildern auswerten, wodurch auch teilweise Rückschlüsse auf die Wasserverfügbarkeit gezogen werden können. Da jedoch auch Krankheiten, Parasiten oder Schadstoffbelastungen die Vitalität von Stadtgrün negativ beeinflussen können, ist eine direkte 1:1-Übertragung Vitalität auf Wasserverfügbarkeit nicht möglich.

Bevor auf mögliche Messverfahren eingegangen und ein gestufter Ansatz zur Durchführung eines Monitorings vorgeschlagen wird, folgt zunächst der Wissensstand zur Wirkung und den Zielkonflikten von klimaaktivem Grün. Daraus resultierend mögliche Zieldefinitionen, die zusammengetragen und diskutiert werden.

Wirkung und Zielkonflikte von grüner Infrastruktur

Naturbasierten Lösungen (NB) wird gegenüber künstlichen Lösungen ein höheres Potenzial für kosteneffiziente Klimaanpassungsmaßnahmen (Naturbasierte Lösungen in Europa) beigemessen (vgl. EEA, 2020). Parallel zur Klimaanpassung ist hier auch auf das Aktionsprogramm „Natürlicher Klimaschutz“ des BMUV (vgl. BMUV 2023) zu verweisen. Eine Zielsetzung zur Erhöhung der Grünversorgung kann zudem auch dazu beitragen, soziale Ungleichheit zu verringern: Insgesamt profitieren Menschen mit niedrigerem sozioökonomischem Status stärker von städtischen Grünflächen als privilegiere Gruppen, insbesondere hinsichtlich der Stressreduktion und der Verbesserung der psychischen Gesundheit (vgl. Marselle 2020; Ward Thompson 2016). In deutschen Städten haben Stadtviertel mit niedrigem Durchschnittseinkommen, geringer Bildungsbeteiligung und hoher Arbeitslosigkeit tendenziell weniger Zugang zu Grünflächen im Vergleich zu Stadtvierteln mit höherem Einkommen, Bildungsniveau und höheren Beschäftigungsquoten (vgl. Wüstemann/Kalisch 2016; Schüle et al. 2017).

Für die Wirkung von grüner Infrastruktur auf den thermischen Komfort spielen vielfältige Eigenschaften und Qualitäten einer Grünfläche eine wichtige Rolle, wie zum Beispiel die Wasserversorgung, der Anteil an baumbestandenen Flächen, die Form des Parks, vorhandene Wasserflächen, die Vernetzung mit weiteren Grünräumen (vgl. Jaganmohan et al. 2017; Wong et al. 2021). Ein relevanter Aspekt ist auch, dass eine dichte Baumbepflanzung in der Nacht weniger stark abkühlt als eine offene Wiesenfläche. Zudem besteht das Risiko, dass bei schlecht durchlüfteten Straßenräumen (zum Beispiel bei Anströmung orthogonal und nicht parallel zur Straßenachse) eine Baumallee mit Kronenschluss die Luftschadstoffbelastung im bodennahen Bereich aufgrund der fehlenden vertikalen Durchmischung der Luft fördern kann. Dies muss jedoch im Kontext der voranschreitenden Mobilitätswende (Verdrängung von Verbrennern) differenziert betrachtet, und darf nicht pauschalisiert werden. Je nach Zielsetzung ist daher unter Umständen eine lockere Baumbepflanzung oder Arten mit einem höheren Kronenansatz beziehungsweise schmaleren Kronendurchmesser günstiger (was als „Savannentypologie“ in BfN 2023 umschrieben wurde). Es gilt somit nicht immer, „je mehr Vegetation, desto besser“. Auch die Verteilung und Vernetzung spielt eine wesentliche Rolle, sodass viele kleinere Grünflächen in der Regel eine größere Wirkung zur Reduktion der städtischen Wärmeinsel haben als wenige große (vgl. Scherer 2007). Damit können viele kleinere Grünflächen zu einer punktuellen klimatischen Entlastung im Stadtgebiet beitragen. Vor dem Hintergrund der nächtlichen Kaltluftentstehung, die im Regelfall außerhalb der Städte auf großen unversiegelten Freiflächen geschieht, können viele kleinere gut vernetzte Grünflächen auch einen positiven Beitrag im Kontext des Kaltlufttransportes in die Stadt leisten.

Dies macht es wiederum schwierig einen einfachen geeigneten Kennwert zu finden. Der Indikator Grünversorgung macht keine Aussagen über die Qualität der Grünfläche. Eine gängige Annahme ist, dass mit einem höheren Grünanteil die Zugänglichkeit zu städtischen Grünflächen steigt. Jedoch kann diese Beziehung zwischen Grünanteil und Zugänglichkeit durch die Größe der Stadt und die geografische Verteilung ihrer Bewohnerinnen und Bewohner sowie durch das Klima und die städtische Struktur/städtische Morphologie beeinflusst werden, wie De La Barrera et al. (2023) zusammenfassen. Auch die Ausstattung mit Straßenbegleitgrün wird nicht für besonders geeignet angesehen, sofern hier nicht weiter differenziert wird nach der Art der Begrünung. Der Indikator Grünvolumen hingegen wird als relevant erachtet (trotz der möglichen Zielkonflikte „Savannentypologie“), da dieser der einzig diskutierte Kennwert ist, der zumindest teilweise die Qualität der Grünflächen (zum Beispiel Rasenplatz mit versiegelten Flächen und kleinen Beeten vs. Park mit Baum- und Sträuchern und geringer Versiegelung) charakterisiert. Auch die Kennwerte Erreichbarkeit und Konnektivität erscheinen sehr relevant, da hier die räumliche Nähe zu den Einwohnenden und räumliche Abdeckung im Stadtgebiet abgebildet wird. Allerdings gibt es bisher keine standardisierte Methode, die Konnektivität von Grünräumen adäquat

abzubilden. Mögliche Ansätze stellen typische Cost-Distance-Analysen (zurückzuführen auf Ausbreitungsrechnung von Tieren), Netzwerkanalysen (auf Grundlage routingfähiger Netze, abgeleitet aus Mobilitätsanalysen) oder einfache euklidischen Distanzberechnungen mit und ohne Barrieren dar.

Viele Studien haben festgestellt, dass trockenere Bedingungen zu höheren Lufttemperaturen führen und die Hitzebelastung erhöhen können. Es wurde zudem beobachtet, dass bewässerte Flächen die Lufttemperatur senken können (vgl. Simpson et al. 2023). Andererseits argumentieren andere Studien, dass eine geringe Luftfeuchtigkeit im Allgemeinen den Hitzestress verringert, da aufgrund der reduzierten Luftfeuchtigkeit das Transpirationspotenzial des Menschen, aufgrund der verbesserten Feuchtigkeitsabgabe an die Atmosphäre, gesteigert wird. Diese Diskrepanz hat potenziell erhebliche Auswirkungen, da einige klimatische Anpassungsmaßnahmen, die darauf abzielen, Hitzestress zu reduzieren wie städtische Begrünung, auf der Umwandlung von sensibler Wärme in latente Wärme durch Wasserverdunstung basieren (vgl. Simpson et al. 2023). Hohe Luftfeuchtigkeit kann die Verdunstungskühlung von Schweiß reduzieren und somit die Menge an abgegebener Wärme verringern, was zu einer erhöhten Hitzestressbelastung des Körpers führt. Das Konzept des feuchten Hitzestresses wird daher schon lange in der Forschung zu den Auswirkungen von städtischer Hitze und Klimawandel auf die Gesundheit verwendet und mit biometeorologischen Indizes wie dem PET oder UTCI berücksichtigt (vgl. Simpson et al. 2023). Ob die blaue Infrastruktur wie Wasserflächen und andere Maßnahmen, welche die Luftfeuchtigkeit erhöhen können, den thermischen Komfort im Außenraum reduzieren und zu mehr Hitzestress führen, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Physikalisch betrachtet führt eine höhere Sättigung der Atmosphäre mit Feuchtigkeit zu einer verminderten Abgabe von Feuchtigkeit des Menschen an die Atmosphäre (da ein Ausgleich zwischen beiden Systemen schneller erreicht wird), wodurch die Effektivität des Schwitzens und damit auch der körpereigenen Abgabe von Energie/Wärme an die Atmosphäre verringert wird. Der UTCI kann dies relativ gut abschätzen (vgl. Simpson et al. 2023).

Welche Art von grüner Infrastruktur besonders wirksam ist, lässt sich somit pauschal nicht sagen, da die Wirksamkeit beziehungsweise Landoberflächentemperaturreduktion von grüner Infrastruktur auch von der jeweiligen Stadtstruktur (Local Climate Zone) abhängt (vgl. Kirschner et al. 2023). Dies zeigt sich auch darin, dass sich innerhalb europäischer Städte die Reduktion der Oberflächentemperatur durch Bäume erheblich unterscheidet und in Zentraleuropa am höchsten ist, was auch die unterschiedlichen Klimate und Evaporationsraten erklärt (vgl. Schwaab et al. 2021).

Zieldefinition

Für die jeweiligen Indikatoren soll entsprechend der relativen Veränderung über die Zeit ein langfristiger Zielwert definiert werden. Dieser Zielwert soll auf einer fachlichen Begründung fußen, aber gleichzeitig innerhalb des planungspraktisch Erreichbaren liegen. Hierbei sind auch verschiedene räumliche Einheiten von der gesamten Stadt bis zum Stadtquartier zu berücksichtigen. Kommunen stehen vor der großen Herausforderung, eine dichte und flächeneffiziente Bebauung im innerstädtischen Bereich zu fördern, während sie gleichzeitig sicherstellen müssen, dass die Bewohnerinnen und Bewohner angemessen und qualitativ hochwertig mit privaten und öffentlichen Grünflächen versorgt werden (vgl. Dosch 2021). Dies ist durch einen Indikator entsprechend abzubilden.

Neben den bereits erwähnten Zieldefinitionen vom BfN (2023) gibt es die sogenannte 3-30-300-Regel. Die 3-30-300-Regel nach Konijnendijk (2021) hat das Ziel, gesündere und grünere Städte auch vor dem Hintergrund des Klimawandels zu erreichen und besagt:

1. Mindestens 3 Bäume sollten von zu Hause aus gesehen werden. Sichtbares Grün kann die mentale Gesundheit und das Wohlbefinden verbessern.
2. Ein Baumbedeckungsgrad von mindestens 30 % soll erreicht werden zur Verbesserung des Mikroklimas, Reduktion von Lärm und Luftverschmutzung sowie aus gesundheitlichen Gründen.

3. Eine Erreichbarkeit einer öffentlichen Grünfläche (mit einer Mindestgröße ab 0,5/1 ha) soll innerhalb vom 300 m ermöglicht werden, um die Erholung und die mentale und körperliche Gesundheit zu verbessern.

Aus klimatisch-planerischer Sicht wird empfohlen die 3-30-300 Regel eher als ein gesellschaftliches Ziel als eine planerisch fixe Zielsetzung zu verstehen, zum einen da sie sich bis jetzt nicht in der praktischen Anwendung in den Städten wiederfindet und zum anderen da sie eher einen kommunikativen Charakter zur Verdeutlichung von Zielen/Bedarfen besitzt.

Für die Zielwerte der Grünerreichbarkeit herrscht generell Konsens in der Literatur und die von Konijnendijk (2021) vorgeschlagene Zieldefinition von 300 m Luftlinie wurde bereits häufig diskutiert, wobei auch 500 m als tatsächlicher Gehweg in der Diskussion sind. Viele Studien kommen zu dem Schluss, dass die Messung der Erreichbarkeit wichtig ist. Dabei werden verschiedene Standards verwendet, wie zum Beispiel die Verfügbarkeit einer Grünfläche von mindestens 2 ha innerhalb von weniger als 300 m (5 Minuten Fußweg) Luftlinie oder einer Fläche von 20 ha innerhalb von weniger als 2 km Fußweg (vgl. De La Barrera et al. 2023).

Die Stadt Berlin verwendet eine Richtlinie von 500 m, was einem Fußweg von 5 bis 10 Minuten entspricht, um zu Grünflächen von mindestens 0,5 ha zu gelangen, und 1 bis 1,5 km, um zu größeren Grünflächen von mindestens 10 ha Flächengröße zu gelangen (vgl. SenStadt 2020).

Die vorgeschlagene Mindestgröße der Grünanlage bezog sich bei Konijnendijk (2021) auf die Gesundheits- und Erholungsfunktion. Bei der Bestimmung der notwendigen Flächengröße, um eine planungsrelevante Kühlungsleistung zu erzielen, gibt es hingegen weniger Einigkeit. Grünflächen wurden vielfach untersucht, mit dem Ziel, die maximale Temperaturreduktion zu untersuchen (vgl. Kirschner et al. 2023). Die kühlende Wirkung von Grünflächen wurde insbesondere unter trockenen europäischen Bedingungen als wesentlich erkannt (vgl. Kirschner et al. 2023). Drei Eigenschaften der kühlenden Wirkung von Grünflächen werden besonders häufig als die einflussreichsten genannt: Größe, Form und Baumdichte. Beginnend mit Letzterer stimmen die meisten Studien darin überein, dass Bäume eine höhere Kühlwirkung bieten als Gras (vgl. Kirschner et al. 2023). Es wurde festgestellt, dass Grünflächen mit einer regelmäßigen und kompakten Form effektiver kühlen als solche mit unregelmäßigen und langgestreckten Formen. Größere Grünflächen kühlen effektiver als kleine, aber viele Studien legen nahe, dass es untere und obere Wirkungsgrenzen gibt (vgl. Kirschner et al. 2023). Der Wert dieser Grenzen variiert jedoch von Stadt zu Stadt. Zum Beispiel wurde in Leipzig keine messbare Wirkung von Grünflächen, die kleiner als 5,6 ha waren, festgestellt. Dagegen wurde in London eine Mindestgröße von 2 bis 3 ha und in Almada (Portugal) eine Fläche von 0,49 ha mit hoher Baumdichte ermittelt, die die Temperatur um mindestens 1 °C senken können (vgl. Kirschner et al. 2023). Insgesamt scheint die kühlende Wirkung von Grünflächen und die Rolle von Größe, Form und Baumdichte eindeutig zu sein. Dennoch wurde das Verhältnis zwischen verschiedenen Arten von Grünflächen und den umgebenden städtischen Strukturen im Kontext der fußläufigen Erreichbarkeit noch nicht ausreichend erforscht (vgl. Kirschner et al. 2023). Bei der Suche nach einer Mindestgröße für eine Grünfläche mit mikroklimatischer Kühlwirkung findet sich in der Literatur noch keine eindeutige Zieldefinition, ohne dass ergänzende Spezifizierungen der Gestaltung der Grünfläche notwendig sind. Dies ist unter anderem auf den hohen Grad der Individualität der jeweiligen Grünfläche und der sie umgebenden Stadtstrukturen zurückzuführen. In diesem Kontext wäre weiterer Forschungsbedarf gegeben, um die klimatische Wirksamkeit von Grünstrukturen im jeweiligen städtischen Kontext zu ermitteln. Als erster Näherungswert kann eine Flächengröße ab 0,5/1 ha veranschlagt werden (vgl. Rahman et al. 2022; Spanjar et al. 2022).

Auch bezogen auf den Indikator Baumbedeckung ergibt sich eine große Spannweite in der Abschätzung des Wirkgrads auf die Reduzierung des städtischen Wärmeinseleffekts. Baumbedeckung kann die Lufttemperatur am Tag deutlich reduzieren, während unversiegelte Flächen mit niedriger Vegetation eine stärkere Wirkung haben, um die nächtliche städtische Überwärmung zu reduzieren (vgl. Ziter et al. 2019). Um erste Ansätze beziehungsweise Vergleichswerte zu erhalten, muss aufgrund der fehlenden nationalen Studien auf Studien im internationalen Kontext zurückgegriffen werden.

Spanjar et al. (2022) haben in einer umfassenden Untersuchung unterschiedliche Arten von Grünstrukturen im städtischen Raum (in der mitteleuropäischen Region) analysiert. Entsprechend lassen sich nachfolgende Werte in der Veränderung der thermischen Belastung zusammenfassen:

Tabelle 1

Darstellung klimatischer Einflüsse (Wertebereiche entsprechend mehreren untersuchten Objekten) von Vegetationsstrukturen im städtischen Kontext auf die Lufttemperatur sowie den thermischen Komfort in °C PET

	Referenz		Differenz	
	Lufttemperatur (°C)	PET (°C)	Lufttemperatur (°C)	PET (°C)
Einzelbaum	26,1–29,5	42,3–46,2	0,1–0,7	9,5–13,5
Baumreihe	26,5–28,3	41,5–44,3	0,5–2,0	14,5–18,1
Baumgruppe	29,7	47,2	2,7	19,9

Referenz bezieht sich auf Messungen außerhalb des Wirkraums der Maßnahme und Differenz beschreibt die Abweichung zwischen Wirkraum der Maßnahme

Quelle: Erstellt nach Spanjar et al. (2022)

Rahman et al. (2022) untersuchten den Zusammenhang zwischen unterschiedlichen Landbedeckungsarten im Umkreis von 500 m und dem thermischen Komfort in Würzburg unter Berücksichtigung des gesamten Jahres. Sie schlussfolgerten aus ihrer Untersuchung, dass insgesamt eine Oberflächenbedeckung von 30 bis 40 % Grünflächen innerhalb der bebauten Umgebung notwendig ist, um die sommerliche Abkühlung zu steigern, ohne dass im Winter mit erhöhtem Kältestress zu rechnen ist.

Gangwisch et al. (2023) untersuchten den Zusammenhang zwischen NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), Versiegelung und der Klassen des Urban Atlas sowie der lokalen Lufttemperatur in Karlsruhe. Eine hoher Versiegelungsgrad führte zu einer höheren Lufttemperatur besonders am Tag. Schon ab einem Versiegelungsgrad von 20 % in einem Umkreis von 100 m war ein Temperaturanstieg von etwa 0,6 °C erreicht, der sich bei einem Versiegelungsgrad von 40 % auf 0,7 °C erhöhte, und bei einer Versiegelung von über 80 % 0,8 °C erreichte. Hingegen führte ein hoher Vegetationsanteil zu einer niedrigeren Lufttemperatur insbesondere während der Nacht. Ein geringer Vegetationsanteil von unter 40 bis 60 % führte zu einer Lufttemperatur, die bis zu 0,8 °C höher war.

In einer Studie in über 93 europäischen Städten wurde abgeschätzt, welche Wirkung die Erhöhung der Baumbedeckung auf 30 % auf die hitzebezogene Mortalität haben kann. Die untersuchten Städte hatten zum untersuchten Zeitpunkt eine Baumbedeckung im Schnitt von knapp 15 % (vgl. lungman et al. 2023). Es wurde berechnet, dass eine Erhöhung der Baumbedeckung auf 30 % die Städte im Durchschnitt um 0,4 °C am Tag abkühlen würde. Es wurde auch geschätzt, dass durch eine Erhöhung der Baumbedeckung in den 93 untersuchten Städten auf 30 % etwa 2644 vorzeitige Todesfälle verhindert werden könnten, was im Schnitt 1,84 % aller Sommersterbefälle dieser Städte entspricht. Das ehrgeizige Szenario mit 40 % Baumbedeckung würde zu einer durchschnittlichen Abkühlung der Städte um 0,5 °C führen und einer 41%igen Erhöhung der Anzahl der verhinderten Todesfälle im Vergleich zum Szenario mit 30 % Baumbedeckung bewirken, während das Szenario mit 25 % Baumbedeckung zu einer durchschnittlichen Abkühlung der Städte um 0,3 °C und einer 21%igen Verringerung der Anzahl der verhinderten Todesfälle führen würde. Zu beachten ist das lungman et al. (2023) sehr unterschiedliche Ergebnisse für die verschiedenen Städte beschreiben und die Untersuchungen sich auf die Oberflächentemperatur und auf den Tag beziehen. Die Autoren beschreiben daher, dass, obwohl Vegetation der dominierende Faktor ist, der die Intensität städtischer Hitzeinsel-Effekte (Urban Heat Island, UHI) während des Tages beeinflusst, die städtische Straßenschlucht (das heißt die Geometrie, die von einer Stadtstraße und ihren angrenzenden Gebäuden gebildet wird) die UHI-Effekte in der Nacht stärker bestimmt. Zusätzlich

ist die nächtliche Intensität des UHI-Effekts deutlich ausgeprägter als am Tag. Daher müssen städtische grüne Infrastrukturstrategien durch andere Maßnahmen begleitet werden, insbesondere durch solche, die die nächtlichen UHI-Effekte reduzieren, um gesundheitliche Vorteile zu erzielen. Dazu gehören die Änderung von Bodenoberflächenmaterialien und strukturelle Eingriffe, die den Sky-View-Faktor ändern (das heißt den Anteil des sichtbaren Himmels relativ zur Straßengeometrie und Gebäudedichte).

Zusammenfassend erscheint ein Zielwert von 30 bis 40 % Baumbedeckung oder Grünanteil sinnvoll und nachvollziehbar. Dabei bleibt jedoch festzuhalten, dass die ausschließliche Fokussierung auf den Baumbedeckungsgrad beziehungsweise die Grünversorgung klimatisch im Kontext des Klimawandels nicht ausreichend ist. Die Berücksichtigung von anderen Faktoren wie bspw. der Oberflächenmaterialität, Stadtstruktur, Architektur oder Gebäudeausrichtung stellen ein wichtiges Standbein der Klimaanpassung im städtischen Umfeld dar. Aufgrund der Definition des Indikators „Klimaaktives Grün“ fließen sie an dieser Stelle jedoch nicht mit in den beschriebenen Indikator ein. Es wird jedoch empfohlen, zu prüfen, inwieweit diese genannten Faktoren mithilfe eines zusätzlichen Indikators abgebildet werden können. Die Sichtbarkeit von drei Bäumen wird in diesem Projekt nicht weiter betrachtet, da dies zu kleinräumig erscheint und einzelne Gebäude abbilden müsste.

Nachfolgend sollen noch mögliche Zieldefinitionen für die Grünversorgung zusammengefasst werden.

Als einfacher Indikator wird eine Zieldefinition der Grünversorgung betrachtet, wobei das BfN einen Zielwert von 24 m²/Person vorschlägt. Auch hier ist jedoch die Heterogenität zwischen verschiedenen Städten und Studien stark ausgeprägt. Zudem gilt es zu berücksichtigen, dass die Versorgung und damit auch die Zugänglichkeit von Grünflächen stark von vorhandenen Barrieren wie der Straßeninfrastruktur abhängig sind. Entsprechend wäre es zu diskutieren, inwieweit ein Zielwert für die Grünversorgung gekoppelt mit einem (zu berechnenden) Barrierewert betrachtet werden sollte. Dennoch stellen die nachfolgenden Werte Beispiele dar, wie international mit der Thematik der Grünversorgung umgegangen wird.

- Ein Beispiel für eine „ideale“ kompakte Stadt ist die slowenische Stadt Ljubljana, die 2016 zur Grünen Hauptstadt Europas gekürt wurde. Dort stehen fast 560 m² Grünfläche pro Einwohner zur Verfügung, und fast alle Wohngebiete liegen im 300 m Radius einer öffentlichen Grünfläche (vgl. Russo/Cirella 2018).
- In den Niederlanden wurde eine Mindestgrünfläche von 60 m² pro Kopf im Umkreis von 500 m um die Haushalte festgelegt (vgl. Roo 2011), während im Vereinigten Königreich die Stadtbewohner Zugang zu 2 ha städtischem Grün im Umkreis von 300 m um ihren Wohnort haben sollten (vgl. Handley et al. 2003).
- Die Stadt Melbourne hat ein empfohlenes Verhältnis von Grünfläche pro Person von 22 m² festgelegt, doch in einigen Teilen ihrer Gemeinde liegt der Grünflächenanteil bei nur 3 m² pro Person. Und in Brisbane (Queensland, Australien) bei 115 m²/Person (vgl. Rupprecht/Byrne 2014).

Zusammenfassend lassen sich die folgenden Zielwerte verwenden:

- Indikator: langfristiger Zielwert
- Grünversorgung: 10 m²/Person
- Baumbedeckung: 30 %
- Grünanteil: 30 %
- Grünerreichbarkeit: 300 m
- Mindestgröße der Grünfläche: 0,5 bis 1 ha

Im Durchschnitt lebt eine Person in deutschen Großstädten in einer Entfernung von 183 m zur nächsten Grünfläche und hat Zugang zu 4,4 ha städtischem Grün innerhalb eines 500-m-Puffers, und die durchschnittliche

Grünversorgung (Grünflächenausstattung pro Kopf) beträgt 8,1 m². Auf Stadtebene zeigen sich starke Unterschiede in der Grünversorgung, die von 2,5 m²/Person (Stadt Schwerin) bis zu 36,3 m²/Person (Stadt Bergisch Gladbach) innerhalb eines 500-m-Puffers um den Wohnort reichen (vgl. Wüstemann et al. 2017).

Wie eingangs erwähnt, ist bei den Zieldefinitionen und der Frage der Möglichkeit der Erreichung des Zielwerts die jeweilige Raumeinheit zu betrachten. Dies gilt sowohl auf der Ebene von Stadtteilen und -quartieren als auch bei dem Vergleich verschiedener Städte untereinander. Taubenböck et al. (2021) haben den Einfluss der zugrunde liegenden Raumeinheit, der administrativen räumlichen Einheiten, mit zwei alternativen räumlichen Bezugsgrößen in einem Ranking nach Vegetationsanteil in der Stadt für 80 Städte in Deutschland untersucht. Die große Varianz der in dieser Studie erhaltenen unterschiedlichen Ranglisten macht deutlich: Die Position einer Stadt in einem vergleichenden Beziehungssystem (zu anderen Städten) hängt stark von den zum Vergleich herangezogenen Parametern (hier Grünanteil und Grünanteil pro Person) sowie der räumlichen Bezugsgrößen/Bezugsräume ab.

Bewertungsmatrix aus Kernindikatoren

Die von Konijnendijk et al. (2022) als 3-30-300-Regel vorgestellt, kann im planerisch übertragenen Sinn und in abgewandelter Form als Ziel für Grün in der Stadt angewendet werden. Sie besagt, dass von jedem Zuhause, jeder Schule und jedem Arbeitsplatz aus mindestens drei Bäume sichtbar sein sollten, in jedem Stadtviertel eine Baumbedeckung von mindestens 30 % vorhanden sein sollte und dass der nächste öffentliche Grünraum nicht weiter als 300 m von jedem Wohnort entfernt sein sollte. Hierzu wurde in einer weiteren Studie auch eine Methodik entwickelt, um die Umsetzung der Regel zu überprüfen (vgl. Browning et al. 2023). Diese erfordert allerdings unter anderem Lidar-Daten und Befragungen, sodass sie auf bundesweiter Ebene noch nicht umsetzbar erscheint.

Aus klimatisch-planerischer Sicht sollte im Kern auf eine dezidierte räumliche Abtrennung verzichtet werden. Vielmehr wird empfohlen, eine auf jede Pixelzelle (Rasterzelle) bezogene Berechnung zu erstellen. Damit wird eine fließende Verlaufsdarstellung (Gradientendarstellung) ermöglicht, die jedoch gleichzeitig die Grundlage für weitere dezidierte statistische Bezugsgrößen darstellt und somit als grundsätzliche Basis für den räumlichen Bezug gewählt werden sollte. Zur Verdeutlichung der grundlegenden Herangehensweise beziehungsweise der Arbeit mit Kern- und Initialindikatoren wird nachfolgend eine exemplarische **Bewertungsmatrix** für die grüne Infrastruktur vorgestellt, die sich unter anderem aus den finalen Kern- und Initialindikatoren des Indikatorenbereichs „Klimaaktives Grün“ zusammensetzt.

In Anlehnung daran und an BfN (2023) der vorausgegangenen Diskussion wird eine Bewertungsmatrix für grüne Infrastruktur als Erfüllungsgrad der Zieldefinition in Prozent ΔG vorgeschlagen. Für die Berechnung des ΔG einer bestimmten Stadt beziehungsweise eines Stadtgebiets werden vier Kennwerte berücksichtigt: ΔG_G -Grünanteil (%), ΔG_B -Baumbedeckung (%), Grünversorgung (m²/EW) ΔG_V sowie die Grünerreichbarkeit (m) ΔG_E .

$$\Delta G = (\Delta G_G + \Delta G_B + \Delta G_A + \Delta G_E)$$

Hierbei lassen sich die einzelnen Komponenten folgenderweise ermitteln:

$$\Delta G_G (\%) = (G_{B,T1} / G_{B,Ziel}) \times 100$$

$$\Delta G_B (\%) = (G_{B,T1} / G_{B,Ziel}) \times 100$$

$$\Delta G_V (\%) = (G_{V,T1} / G_{V,Ziel}) \times 100$$

Wenn $\Delta G_E \leq G_{E,Ziel} = 100 \%$, wenn $\Delta G_E \leq G_{E,Ziel}$, dann $(G_{E,Ziel} / G_{E,T1}) \times 100 (\%)$

Wobei ΔG_{T1} jeweils den aktuell erhobenen Mittelwert für das Gebiet (zum Beispiel im Jahr 2023) darstellt und G_{Ziel} das zu erreichende Ziel definiert. Die Werte für ΔG_B , ΔG_V und ΔG_E liegen zwischen 0 und 100 %. Eine mehr als 100 %-Erreichung der einzelnen Komponenten ist ausgeschlossen, um alle drei Aspekte gleich zu gewichten.

Im Folgenden wird eine beispielhafte Bewertungsmatrix inklusive der potenziellen Berechnung für drei Stadtgebiete gezeigt:

Tabelle 2
Übersicht von einer möglichen Anwendung der Indikatoren im Bereich „Klimaaktives Grün“, untergliedert nach „Zielwert“, „Stadtgebiet“ sowie dem jeweiligen „Erfüllungsgrads des Zielwerts“. Dabei findet die Klassifizierung in diesem Beispiel ungewertet linear statt.

Komponente	Stadtgebiet	Wert	Erfüllungsgrad des Zielwerts
Grünanteil (%) (G_G) Zielwert (G_{Ziel}) = 30 %			$\Delta G_G = (G_{G,T1} \div G_{G,Ziel}) \times 100$ (%)
	Stadt 1	10	33,33
	Stadt 2	20	66,6
	Stadt 3	30	100
Baumbedeckung (%) (G_B) Zielwert G_{Ziel} = 30 %			$\Delta G_B = (G_{B,T1} \div G_{B,Ziel}) \times 100$ (%)
	Stadt 1	10	33,33
	Stadt 2	20	66,6
	Stadt 3	30	100
Grünversorgung(m²/EW) (G_V) Zielwert G_{Ziel} = 10 m ² /EW			$\Delta G_V = (G_{V,T1} \div G_{V,Ziel}) \times 100$ (%)
	Stadt 1	5	50
	Stadt 2	15	100
	Stadt 3	10	100
Grünerreichbarkeit (m) (G_E) Zielwert G_{Ziel} = 300 m			Wenn $\Delta G_E \leq G_E$: $G_{E,Ziel} = 100$ % Wenn $\Delta G_E \geq G_E$: $(G_{E,Ziel} \div G_{E,T1}) \times 100$ (%)
	Stadt 1	2000	15
	Stadt 2	400	75
	Stadt 3	300	100
Klimaaktives Grün (% des Erfüllungsgrad vom Zielwert) (ΔG)			$\Delta G = 1/4(\Delta G_B + \Delta G_B + \Delta G_V + \Delta G_E)$ (%)
	Stadt 1		32,92
	Stadt 2		77,05
	Stadt 3		100

Quelle: Eigene Darstellung

Kern- und Initialindikator (Klimaaktives Grün) auf Bundesebene

Kernindikator „Bundesweite statistische urbane Grünerreichbarkeit (bsuGe)“

Hinweis:

Der Kernindikator „Bundesweite statistische urbane Grünerreichbarkeit“ stellt im Indikatorenbereich „Klimaaktives Grün“ auf Bundesebene ein Höchstmaß an klimatisch-planerischer Aussagekraft bei gleichzeitig dauerhaft gegebener Umsetzbarkeit dar.

Input:

- Initialindikator „Bundesweites urbanes Grünvolumen“
- Einwohnerdichte (100 x 100 m)
- Ergänzend Gebäudebestand (Unterteilung in Wohnbebauung und Gewerbe, Industrie, Dienstleistung)
- ALKIS (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem)
- „harte“ lineare Barrieren aus Verkehrsnetzen und Landnutzung (zum Beispiel Flüsse)
- nDOM (bereits im Initialindikator verwendet)

Output:

Basierend auf den Ergebnissen der Ableitung des Initialindikators wird der Kernindikator detailliert berechnet. Unter Einbeziehung der bundesweit zur Verfügung stehenden Einwohnerdichte in einer 100x100-m-Kachel (auf Grundlage der europäischen Referenzkachelung) können unter Berücksichtigung einer geeigneten räumlichen Analysefunktion (siehe nachfolgend) das potenzielle statistische Einzugsgebiet und die damit verknüpften Einwohnenden und das entsprechende Einzugsgebiet der Grünstrukturen berechnet werden. Auf Bundesebene und als flächendeckender Ansatz bietet sich eine euklidische Distanzberechnung unter Berücksichtigung harter (linearer) Barrieren als produktiver Umsetzungsansatz an, da eine isochrome Berechnung der Einzugsgebiete im Rechenaufwand nicht praktikabel erscheint. Zu den linearen „harten“ Barrieren, die die Einzugsberechnung beeinflussen, gehören bspw. Bahntrassen, Bundesautobahnen oder breitere Fließgewässer (\geq „kleinerer Fluss“ nach Wasserrahmenrichtlinie). Bei einer Ausdifferenzierung zwischen unterschiedlichen Gebäudetypen kann eine statistische Verteilung der Einwohnenden (ausgehend von der 100x100-m-Kachelung) auf jedes Gebäude geschehen.

Räumlicher Bezug/räumliche Darstellung:

- Gradientenverlauf
- statistische Übertragung auf Vektoreinheiten mit erweiterten statischen Möglichkeiten (Darstellung bspw. durch bivariate Farbklassen)

Auflösung:

- Angestrebte Auflösung von 10 x 10 m (bundesweit).
- Je nach Kosten-Nutzen-Verhältnis zwischen Auflösung (Aussage) und Rechenaufwand muss die Auflösung in der Praxiserprobung angepasst werden.

Aufwand/Kosten:

Auf Grundlage der flächendeckenden Verfügbarkeit der verwendeten Datensätze zur Ableitung des Kernindikators auf Bundesebene sollte die Entwicklung einer (teil)automatisierten Berechnungsroutine GIS-gestützt möglich sein. Die Berechnung kann von einer zentralen Stelle oder von einem einzelnen Büro durchgeführt

werden. Kosten, die durch Datenakquise anfallen könnten, sollten auf Grundlage der ausgewählten Datensätze (unter Vorbehalt von Änderungen) nicht entstehen. Entsprechend reduzieren sich die zu bilanzierenden Kosten auf Bearbeitungszeit zur Berechnung des Kernindikators.

Initialindikator „Bundesweites urbanes Grünvolumen (BuGv)“

Hinweis:

Der Initialindikator „Bundesweites urbanes Grünvolumen“ stellt im Indikatorenbereich „Klimaaktives Grün“ auf Bundesebene einen vereinfachten Ansatz beziehungsweise die Grundlage für den bereits beschriebenen Kernindikator auf Bundesebene dar.

Input:

- gegebenenfalls europäische Monitoringprogramme Tree Density Index oder Urban Atlas Street Tree Layer
- Einwohnerdichte (100 x 100 m)
- ALKIS (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem)
- nDOM (bereits im Initialindikator verwendet)

Output:

Ausgehend vom europaweit verfügbaren Tree-Cover-Density- und Urban-Atlas-Street-Tree-Monitoring ist die Berechnung des potenziellen Grünvolumens unter Verwendung eines nDOM (normalisiertes digitales Oberflächenmodell) flächendeckend für alle Städte im Bundesgebiet möglich. Alternativ ist in der Praxisanwendung zu prüfen, inwieweit auf Bundesebene eine Grunderfassung der Vegetationsstrukturen möglich beziehungsweise zielführend ist. Die Grundlage dafür können Daten der EU oder des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie in Abhängigkeit des Aktualisierungsintervalls sein. Ergänzend wird unter Zuhilfenahme der ALKIS-Daten eine Differenzierung zwischen öffentlichen und privaten Flächen durchgeführt, wodurch in der späteren Ausgabe auch eine differenzierte Betrachtung zwischen privatem und öffentlichem sowie der Gesamtheit des Grünvolumens einer Stadt/Kommune erfolgen kann.

Räumlicher Bezug/räumliche Darstellung:

- Gradientenverlauf, alternativ mit Bezug auf die 100x100-m-Kachelung
- statistische Übertragung auf Vektoreinheiten mit erweiterten statischen Möglichkeiten (Darstellung bspw. durch bivariate Farbklassen)

Auflösung:

- Angestrebte Auflösung von 10 x 10 m (bundesweit).
- Je nach Kosten-Nutzen-Verhältnis zwischen Auflösung (Aussage) und Rechenzeitaufwand muss die Auflösung in der Praxiserprobung angepasst werden.

Aufwand/Kosten:

Auf Grundlage der flächendeckenden Verfügbarkeit der verwendeten Datensätze zur Ableitung des Initialindikators auf Bundesebene sollte die Entwicklung einer (teil)automatisierten Berechnungsroutine GIS-gestützt möglich sein. Die Berechnung kann von einer zentralen Stelle oder von einem einzelnen Büro durchgeführt

werden. Kosten, die durch Datenakquise anfallen könnten, sollten auf Grundlage der ausgewählten Datensätze (unter Vorbehalt von Änderungen) nicht entstehen. Entsprechend reduzieren sich die zu bilanzierenden Kosten auf Bearbeitungszeit zur Berechnung des Kernindikators.

Kern- und Initialindikator (Klimaaktives Grün) auf kommunaler Ebene

Kernindikator „Kommunale isochrome Grünerreichbarkeit“

Hinweis:

Der Kernindikator „Kommunale isochrome Grünerreichbarkeit“ stellt im Indikatorenbereich „Klimaaktives Grün“ auf kommunaler Ebene ein Höchstmaß an klimatisch-planerischer Aussagekraft bei gleichzeitig dauerhaft gegebener Umsetzbarkeit dar.

Input:

- Initialindikator „Kommunales Grünvolumen und Grünverfügbarkeit“
- Einwohnermeldedaten punktverortet (georeferenziert)
- ALKIS (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem)
- nDOM (bereits im Initialindikator verwendet)
- Verkehrsnetze
- Luftbildbefliegung (RGBI alternativ RGB ≤ 40 cm)
- gegebenenfalls ergänzend Stadtraum-/Straßenrauminventar (Sitzgelegenheiten, Trinkbrunnen et cetera)

Output:

Als kommunaler Kernindikator im Indikatorenbereich „Klimaaktives Grün“ wird auf Grundlage des „kommunalen Grünvolumens und Grünverfügbarkeit“ die realitätsnahe „kommunale isochrome Grünerreichbarkeit“ berechnet. Hierbei werden zusätzlich die Gebäudestrukturen und die bei den kommunalen Meldeämtern vorliegenden Einwohnerdaten verwendet. Im Kontext der fußläufigen Erreichbarkeit beziehungsweise der Berechnung der fußläufigen Einzugsgebiete werden die kommunalen Verkehrsnetze berücksichtigt, die zum einen ein routingfähiges Netzwerk darstellen und zum anderen in der Berechnung als Barrieren verstanden werden. Für die flächenhafte Darstellung im administrativen Bereich kann ein Gradient (flächendeckende Verlaufsdarstellung) auf Grundlage der Rasterdaten unter Berücksichtigung der Nachbarschaft (zum Beispiel 1 ha um jede Rasterzelle) gebildet werden. Durch die Berechnung des kommunalen Kernindikators können im Indikatorenbereich „Klimaaktives Grün“ aufbauend detailliert stadtweit potenzielle Klimaanpassungsgebiete identifiziert werden und gleichzeitig, kann aufgrund der Vielschichtigkeit des Kernindikators, ein wichtiges kommunales Planungswerkzeug entstehen.

Räumlicher Bezug/räumliche Darstellung:

- Gradientenverlauf (1 x 1 m)
- statistische Übertragung auf Vektoreinheiten mit erweiterten statischen Möglichkeiten (Darstellung bspw. durch bivariate Farbklassen)

Auflösung:

- Angestrebte Auflösung von 1 x 1 m (stadtweit).
- Je nach Kosten-Nutzen-Verhältnis zwischen Auflösung (Aussage) und Rechenzeitaufwand muss die Auflösung in der Praxiserprobung angepasst werden

Aufwand/Kosten:

Auf Grundlage der flächendeckenden Verfügbarkeit der verwendeten Datensätze zur Ableitung des Kernindikators auf kommunaler Ebene sollte ebenfalls wie bereits auf Bundesebene die Entwicklung einer (teil)automatisierten Berechnungsroutine GIS-gestützt möglich sein. Jedoch ist davon auszugehen, dass der manuelle Anpassungsaufwand dem auf Bundesebene übersteigt – aufgrund der im Detail heterogeneren Datenstrukturen. Da dennoch stets die gleichen Datensätze verwendet werden, sollte eine Vergleichbarkeit gegeben bleiben.

Die Berechnung kann jedoch nicht von einer zentralen Stelle durchgeführt werden. Durch eine standardisierte Vorgehensweise ist eine kommunaleigene Erarbeitung denkbar, die jedoch für die Kommunen eine zusätzliche zeitliche Belastung der Mitarbeitenden darstellen kann. Alternativ sollte die Erstellung oder die Beschreibung des kommunalen Kernindikators in die Leistungsverzeichnisse in Auftrag zu gebende Planwerke, wie Stadtklimaanalysen, Klimaanpassungskonzepte, Grünentwicklungskonzepte integriert werden. Da es bei diesen und anderen Planwerken in der Regel bereits um GIS-basierte Projekte handelt, fallen Aufwand und Mehrkosten geringer aus.

Kosten, die durch Datenakquise anfallen könnten, sollten auf Grundlage der ausgewählten Datensätze (unter Vorbehalt von Änderungen) nicht entstehen.

Initialindikator „Kommunales Grünvolumen und Grünverfügbarkeit“**Hinweis:**

Der Initialindikator „Kommunales Grünvolumen und Grünverfügbarkeit“ stellt im Indikatorenbereich „Klimaaktives Grün“ auf kommunaler Ebene einen vereinfachten Ansatz beziehungsweise die Grundlage für den bereits beschriebenen Kernindikator dar.

Input:

- nDOM (≤ 1 m)
- Luftbildbefliegung (RGBI alternativ RGBI ≤ 40 cm)
- Einwohnermeldedaten punktvortortet/Einwohnerdichte (100 x 100 m)
- ALKIS (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem)
- Verkehrsnetze

Output:

Ausgehend, aber losgelöst, von der Bundesebene kann auf der kommunalen Ebene unter Berücksichtigung eines hochaufgelösten (≤ 1 m) nDOM, einer standardisierten Nahinfrarot-Luftbildbefliegung sowie der ALKIS/TN-Daten ein realitätsnahes Bild des kommunalen Grünvolumens sowie der Grünflächen – unter Berücksichtigung des öffentlichen oder privaten Charakters – berechnet werden. Für die flächenhafte Darstellung im administrativen Bereich kann zusätzlich ein Gradient auf Grundlage der verwendeten Rasterauflösung im Kontext der Nachbarschaft gebildet werden.

Der Initialindikator „Kommunales Grünvolumen und Grünverfügbarkeit“ liefert auf kommunaler Ebene eine wichtige Planungsgröße zur Abschätzung der räumlichen Verteilung, Ausstattung und räumlichen Verfügbarkeit von öffentlichen und/oder privaten (baumbestandenen) Grünflächen, wodurch stadtweit Gunst- und Ungunsträume im Kontext der Verteilung der Bevölkerung ermittelt werden können, die wiederum erste Hinweise für die Ableitung von Klimaanpassungsgebieten bieten können.

Räumlicher Bezug/räumliche Darstellung:

- Gradientenverlauf (1 x 1 m)
- statistische Übertragung auf Vektoreinheiten mit erweiterten statischen Möglichkeiten (Darstellung bspw. durch bivariate Farbklassen)

Auflösung:

- Angestrebte Auflösung von 1 x 1 m (stadtweit).
- Je nach Kosten-Nutzen-Verhältnis zwischen Auflösung (Aussage) und Rechenzeitaufwand muss die Auflösung in der Praxiserprobung angepasst werden.

Aufwand/Kosten:

Auf Grundlage der flächendeckenden Verfügbarkeit der verwendeten Datensätze zur Ableitung des Initialindikators auf kommunaler Ebene sollte ebenfalls wie bereits auf Bundesebene die Entwicklung einer (teil)automatisierten Berechnungsroutine GIS-gestützt möglich sein. Jedoch ist davon auszugehen, dass der manuelle Anpassungsaufwand dem auf Bundesebene übersteigt aufgrund der im Detail heterogeneren Datenstrukturen. Da dennoch stets die gleichen Datensätze verwendet werden, sollte eine Vergleichbarkeit gegeben bleiben.

Die Berechnung kann jedoch nicht von einer zentralen Stelle durchgeführt werden. Durch eine standardisierte Vorgehensweise ist eine kommunale eigene Erarbeitung denkbar beziehungsweise zu prüfen. Dabei hängt der zeitliche Mehraufwand entscheidend von der kommunalen GDI (Geodateninfrastruktur) und der Ausstattung der dazugehörigen Fachabteilung ab. Alternativ ist eine Vergabe an Dritte möglich. Belastbarere Aussagen zu diesen Kosten können erst nach einer Praxiserprobung getroffen werden. Es wird jedoch geschätzt, dass sich der finanzielle Aufwand (in Abhängigkeit der kommunalen Größe) bei einer Vergabe im mittleren vierstelligen bis unterem fünfstelligen Bereich befindet.

Umsetzungsempfehlungen Indikatorbereich „Klimaaktives Grün“

Die in Abbildung 5 dargestellte, gestufte und nach Bezugsebenen untergliederte, Entwicklung von Kern- und Initialindikatoren suggeriert auf den ersten Blick einen komplexen sowie teils aufwendigen Berechnungs- beziehungsweise Erhebungsprozess. Mit Blick auf das Detail zeigt sich jedoch, dass die Aufteilung nach Raum und Komplexität einer klar nachvollziehbaren und stringenten Logik folgt. Zum einen wird der Forderung nach der quantitativen, qualitativen und planerischen Aussagekraft im Indikatorbereich „Klimaaktives Grün“ entsprochen. Zum anderen können die Vergleichbarkeit und Wiederholbarkeit auch als langjähriger Monitoring- und Evaluationsprozess zur städtischen Klimaanpassung erreicht werden.

Trotz der theoretischen und in Stichproben kontrollierten Umsetzbarkeit bedarf es einer praxisnahen Überprüfung unter Realbedingungen. Dabei muss auch überprüft werden, inwieweit bereits existierende Datensätze als Alternative, zusätzlich zu den bereits genannten, Verwendung finden können, um zu einer Effizienzsteigerung und Redundanzreduktion beitragen zu können.

Vielversprechend sind hier Fernerkundungsdaten mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung von unter 1 m, wo sich auch kleinräumige Maßnahmen abbilden lassen. Alternativ gibt es Projekte wie bspw. den LUP-Ansatz UrbanGreenEye, in dem versucht wird, mithilfe von Luftbildern und Klassifikationstrainingssamples gröber aufgelöste Satellitendaten über Regressionsberechnungen zu analysieren. In Deutschland werden allerdings von den Ländern in der Regel sowieso Luftbilder aus Überfliegungen erhoben, die zum Beispiel in München eine Auflösung von etwa 10 cm haben. Eine Koordinierung und Standardisierung der Überfliegungen bietet also die Chance für einen sehr detaillierten Datensatz, der auch kleinräumige Änderungen und Anpassungsmaßnahmen sichtbar werden lässt.

Sollte den Empfehlungen des Forschungsprojekts gefolgt und die skizzierten Indikatoren zur Messung im Rahmen der nationalen Klimaanpassungsstrategie vorgeschlagen werden, sollten in einem Anschlussprojekt der Kern- und Initialindikator auf Bundesebene flächendeckend (für alle Siedlungsräume), sowie der Kern- und Initialindikator auf kommunaler Ebene für ausgewählte Städte (3 – Metropole, Großstadt und Kleinstadt) ermittelt und berechnet und dies mit lokalen Stakeholdern diskutiert werden. So kann sichergestellt werden, dass ein möglichst praxis-, planungs- und entscheidungstauglicher Indikatorenbereich ausgewählt wurde, welcher auf jeder Bezugsebene verwendbare Ergebnisse liefert und gleichzeitig nutzbar ist, um die (zukünftig) umgesetzten Anpassungsmaßnahmen auf städtischen und Quartiersebene zu monitoren. Falls nötig, kann hier nachgesteuert werden, durch Anpassung der Zielwerte beziehungsweise der Gewichtung an die Komponenten, zum Beispiel je nach Stadttypus oder -struktur.

Kern- & Initialindikator „Naturnaher Wasserhaushalt“

Stadtplanerische Einschätzung

Historisch gesehen wurde Niederschlag in städtischen Gebieten als Gefahr angesehen, weshalb komplexe Entwässerungssysteme implementiert wurden, um Oberflächenwasser zu entfernen und es aus dem städtischen Bereich wegzuleiten (vgl. McGrane 2016). Darüber hinaus wurden offene Kanäle verrohrt und unter der städtischen Oberfläche versiegelt, um das Risiko von Überschwemmungen zu begrenzen. Gleichzeitig wurde somit das Potenzial für die Entwicklung von Ökosystemen in städtischen Gewässern verringert (vgl. McGrane 2016).

Ein Wandel hin zu nachhaltiger städtischer Entwässerung hat dazu geführt, dass Stadtplanungspolitiken zunehmend die Berücksichtigung von Wasserumgebungen und Ökosystemlebensräumen in unterschiedlichen räumlichen Maßstäben integrieren (vgl. McGrane 2016). In zunehmendem Maße werden lokale Maßnahmen umgesetzt, um Niederschlagswasser direkt vor Ort zu versickern und zu verdunsten und die negativen Auswirkungen von städtischem Oberflächenabfluss auf die Umgebung zu verringern. Diese Verschiebung wird in verschiedenen Teilen der Welt mit unterschiedlichen Begriffen bezeichnet, zum Beispiel Low Impact Development (LID) in den USA, Water-sensitive urban Design (WSUD) in Australien oder auch Starkregenvorsorge in Deutschland. Es wird auf Maßnahmen wie Gründächer, durchlässige Befestigungen, begrünte Mulden und Regengärten verwiesen, die sich in der Nähe der Entstehungsquelle vom Oberflächenabfluss befinden. Nachhaltige Managementpraktiken werden umgesetzt, um die Auswirkungen von Starkregenereignissen in städtischen Gebieten zu reduzieren und Bereiche zu schaffen, die die Dynamik naturnaher Systeme nachahmen und die Entwicklung von Ökosystemen fördern, gleichzeitig aber auch den Bewohnerinnen und Bewohnern der Stadt einen Nutzen bieten (vgl. McGrane 2016). Solche Strategien werden häufig in neuen städtischen Entwicklungen umgesetzt, finden aber auch zunehmend Anwendung auf einzelne Gebäudeebene (vgl. McGrane 2016).

Der natürliche hydrologische Kreislauf wird durch die Einführung undurchlässiger Oberflächen und künstlicher Abflusswege verändert, was zu einer verringerten Infiltration und einer reduzierten Wasserspeicherkapazität führt (vgl. Khadka et al. 2020). Der Wasserhaushalt von Flächen, die undurchlässig befestigt sind, zeichnet sich durch einen sehr hohen Direktabfluss, eine geringe Grundwasserneubildung und eine niedrige Verdunstung aus. Im Gegensatz dazu weisen durchlässig befestigte und insbesondere nicht befestigte Flächen eine höhere Grundwasserneubildung und Verdunstung auf, während der Direktabfluss geringer ist (vgl. DWA 2022). Die Größe dieser drei Komponenten des Wasserhaushalts wird durch die örtlichen Gegebenheiten wie Bodenbeschaffenheit, Grundwasserverhältnisse, Vegetationsart und -dichte sowie die meteorologischen Bedingungen von Niederschlag und potenzieller Verdunstung bestimmt (vgl. DWA 2022).

In Deutschland gibt es eine beträchtliche Variation der klimatischen Bedingungen und des Wasserhaushalts, wie im Hydrologischen Atlas von Deutschland dargestellt (vgl. DWA 2022). Die langjährigen Durchschnittswerte für den Niederschlag reichen von etwa 450 mm/a bis über 2.000 mm/a, für die tatsächliche Verdunstung von etwa 350 mm/a bis über 850 mm/a und für den Direktabfluss von 0 mm/a bis über 2.000 mm/a. Daraus

ergeben sich abflussdominierte Gebiete, Gebiete mit hoher Infiltration und Gebiete mit geringem Niederschlag und hoher Verdunstung (vgl. DWA 2022).

Der Indikator „Naturnaher Wasserhaushalt“ bildet den Ansatz einer wassersensiblen Stadt ab und beschreibt das Verhältnis von Grundwasserneubildung (Versickerung), Evapotranspiration (Verdunstung) und Abfluss. Die drei Teilindikatoren können jeweils in Bezug auf einen Referenzwert gesetzt werden, welcher eine unbebaute Situation in gleicher geografischer, geologischer und morphologischer Situation abbildet. Die Abweichung von diesem Referenzwert lässt sich als Abweichung von einem potenziellen, naturnahen Wasserhaushalt verstehen. Für die Anwendung bestehen Rechenwege und Beiwerte, welche von der DWA im Merkblatt DWA-M 102-4/BWK-M 3-4 „Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 4“ definiert sind und welche für den Bereich Neubau von Quartieren oder Einzelvorhaben in Schleswig-Holstein praktiziert werden. Die Methodik ist sehr präzise, verlangt jedoch eine detaillierte Erhebung der Grundlagen zur Berechnung.

Für jeden der drei Teilindikatoren lassen sich spezifische Auswirkungen auf die Stadtgestalt erwarten. Eine Versickerung ist grundsätzlich oberflächlich durch eine belebte Bodenschicht in Grünflächen oder aber als technische Rigole unterirdisch zu bewerkstelligen. Die Betrachtung der Grundwasserneubildung lässt also zunächst keinen direkten Rückschluss auf positive Nebeneffekte für einen Stadtraum zu, da über die Grundwasserneubildung per se nicht auf die Wasserverfügbarkeit im Wurzelraum zu schließen ist. Gleichwohl kann erwartet werden, dass eine erhöhte Grundwasserneubildung einen positiven Effekt auf die Vitalität der Pflanzen sowie auch für die Trinkwassergewinnung haben kann.

Eine oberflächliche Verdunstung beispielsweise durch Wasserflächen kann erheblich zur lokalen Reduktion städtischer Wärmeinseln (Urban-Heat-Island[UHI]-Effekt) beitragen. Für temporäre Wasserflächen nach Starkregenereignissen ist diese Wirkung beschränkt. Die Kühlungsleistung durch Verdunstung ist grundsätzlich vorhanden, da die Energie, die im Kontext der Verdunstung gebunden wird, nicht mehr zur Erwärmung der Lufttemperatur beitragen kann. Gleichzeitig führt eine damit einhergehende höhere Luftfeuchte zu einer verminderten Transpirationsleistung beim Menschen, da weniger Feuchtigkeit an die Atmosphäre abgegeben werden kann. Dadurch steht der Effekt der Erhöhung der Luftfeuchtigkeit durch Transpiration der Pflanzen und der damit verbundenen erhöhten gebundenen (latenten) Wärme der Minderung der Hitzebelastung durch trockene städtische Luft (Dry Island Effect), die eine bessere Transpiration des Menschen ermöglicht (Abgabe von Wärme an die Umgebung), entgegen. Der oberflächliche Abfluss bildet grundsätzlich das Gegenstück zu Versickerung und Verdunstung ab. Entsprechend kann die Reduktion des Abflusses auch als Stärkung des Rückhalts von Niederschlägen zur Verdunstung oder Versickerung verstanden werden. Die Berücksichtigung der Abkopplung von Flächen vom Kanalanschluss kommt somit prinzipiell zur vereinfachten Abschätzung eines naturnahen Wasserhaushalts in Betracht.

Aus oben genannten Gründen lässt dieser Wert jedoch einen Rückschluss auf eine direkte stadtklimatische Wirkung nicht zu. Da im Kontext der bundesweiten Berechnung des Abkopplungsanteils vom Kanalnetz nur eingeschränkt flächige Daten zur Verfügung stehen, wurde dieser Ansatz im Rahmen der fachlichen Auseinandersetzung und Diskussion verworfen.

Die Begrünungen auf Dächern und an Fassaden leistet prinzipiell einen positiven Beitrag für eine naturnähere Wasserbilanz in der Stadt. Dabei bleibt festzuhalten, dass im Rahmen fernerkundlicher Datenerhebung keine dezidierte Unterscheidung zwischen extensiven (mit geringer Substratdicke) und intensiven (mit hoher Substratdicke) Gründächern getroffen werden kann. Damit ist auch eine qualitative Einschätzung zur potenziellen Retentionsleistung mithilfe fernerkundlicher Daten nicht möglich. Die klimatischen Effekte beschränken sich bei kleinräumiger Umsetzung jedoch an der Fassade auf einen sehr kleinräumigen Umgriff oder am Dach auf einen Bereich außerhalb der Wahrnehmungsebene städtischer Bevölkerung, sodass für beide Bereiche von keiner signifikanten Wirkung auf das Stadtklima ausgegangen werden kann.

Zieldefinition

Eine Annäherung an einen operationalisierbaren, naturnahen Wasserhaushalt lässt sich demnach wohl nur über den Indikator „Versiegelung und Bodenfeuchte“ erreichen oder ebenfalls über den Begrünungsanteil durch Bäume, an Fassaden oder am Dach beschreiben. Der Indikator „Baumüberdeckung“ stellt einen Querbezug zum klimaaktiven Stadtgrün her und leistet zudem durch Evapotranspiration und Interzeption ebenfalls einen signifikanten, direkten Beitrag für den Bereich Verdunstung in einem naturnahen urbanen Wasserhaushalt.

Eine einheitliche Lösung für die Bewirtschaftung von Niederschlagswasserabflüssen in ganz Deutschland kann oft im Widerspruch zum örtlich unterschiedlichen, langjährigen Wasserhaushalt stehen. Sowohl die vorrangige Ableitung als auch die überwiegende Versickerung von Niederschlagsabflüssen können nachteilige Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und das hydrologische System haben. Lösungen, die sich am Wasserhaushalt der jeweiligen Kulturlandschaft und den naturnahen Referenzwerten orientieren, minimieren oder begrenzen diese negativen Auswirkungen (vgl. DWA 2022).

Kernindikator (Naturnahe Wasserbilanz)

Die Wasserbilanz räumlich hochaufgelöst abzubilden, sodass die Wirkung von Anpassungsmaßnahmen wie Dachbegrünung, Retentionsmulden, Entsiegelung und Teilentsiegelung auf den Oberflächenabfluss und die Wasserspeicherung sichtbar wird, ist prinzipiell mithilfe von Modellen wie SWIMM (vgl. Khadka et al. 2020) oder verschiedenen Berechnungsmethoden (vgl. DWA 2022) möglich. Mithilfe von hochaufgelösten Daten lassen sich so kleinräumige Anpassungsmaßnahmen für einzelne Gebiete darstellen. Die vom DWA und vom Land Schleswig-Holstein erarbeiteten Empfehlungen für die Ermittlung der naturnahen Wasserbilanz beziehungsweise der Anforderung zur Regenwasserbewirtschaftung zielen auf Neubaugebiete ab und somit auf die Bewertung von kleineren Flächen und nicht auf eine stadtweite beziehungsweise bundesweite Betrachtungsebene und betrachten jeweils die langjährigen Mittel (also keine Extremereignisse).

Merkblatt DWA-M 102-4/BWK-M 3-4: Wasserhaushaltsbilanz für die Bewirtschaftung des Niederschlagswassers

In dem Merkblatt ist die Basis die Wasserhaushaltsbilanz, welche sich vereinfacht mit folgender Formel beschreiben lässt: $P_{korr} = RD + GWN + Eta$.

Wobei P_{korr} korrigierter Niederschlag, RD -Direktabfluss, GWN –Grundwasserneubildung und Eta aktuelle Evapotranspiration (bestehend aus Evaporation, Transpiration und Interzeptionsverdunstung) ist. Für ein Gebiet lässt sich die Wasserhaushaltsbilanz in den folgenden Schritten ermitteln:

- Ermittlung der Wasserbilanz für den unbebauten Zustand: Zunächst werden Bilanzgrößen einer gebietscharakteristischen Kulturlandnutzung ohne Siedlungs- und Verkehrsflächen als Referenzgrößen festgelegt. Hierfür werden verschiedene komplexe Verfahren beschrieben. Eine einfache Variante basiert auf dem Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD), welcher eine Abschätzung liefert (siehe DWA-M 102-4).
- Wasserbilanz für den bebauten Zustand: Das Bilanzgebiet erstreckt sich typischerweise auf Neuerschließung von Siedlungsflächen oder auf städtebauliche oder entwässerungstechnische Überplanung von Siedlungsflächen im Bestand. Hier wird zwischen der Wasserbilanz für Flächen und Bewirtschaftungsanlagen unterschieden. Bei Flächen, die vegetationsbestanden sind, kann der Aufteilungswert auf den Referenzzustand für unbebaute Flächen vereinfacht gesetzt werden. Für bebaute Flächen gilt:

$$P_{korr} = aF \times P_{korr} + gF \times P_{korr} + vF \times P_{korr} \text{ in mm/a}$$

- aF flächenspezifischer Aufteilungswert für den Direktabfluss, gF flächenspezifischer Aufteilungswert für die Grundwasserneubildung, vF flächenspezifischer Aufteilungswert für die Verdunstung.

- Die flächenspezifischen Aufteilungswerte werden in der Richtlinie für eine Vielzahl unterschiedlicher Flächentypen definiert und mit verschiedenen Werten und Berechnungen hinterlegt. Auch für die Berechnung von Wasserbewirtschaftungsanlagen sind die entsprechenden Berechnungen angegeben.
- Die Berechnungsvorgaben lassen sich allerdings mit vorhandenen Daten nicht flächendeckend für eine Stadt oder das Bundesgebiet umsetzen, da sehr detaillierte Informationen notwendig sind, die sich gerade für die Bewirtschaftungsanlagen auch nicht näherungsweise aus den vorhandenen Datensätzen aus Luft- und Satellitenbildern ableiten lassen.
- Im nächsten Schritt wird die Wasserbilanz zwischen unbebauten und bebauten Zuständen verglichen. Die Ergebnisse der Bilanz können im hydrologischen Dreieck (siehe Abbildung 6) gemeinsam dargestellt werden. Die Analyse von Praxisbeispielen und Beispielrechnungen zeigt, dass durch die Nutzung verschiedener Möglichkeiten der Niederschlagswasserbewirtschaftung Abweichungen in den Aufteilungswerten a , g und v im Vergleich zum unbebauten Referenzzustand von 5 bis 10 Prozentpunkten erzielt werden können. Diese Abweichungen sollten unter ökologischen, technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet werden. Größere Abweichungen, die auf unvermeidbare Randbedingungen oder Zwänge zurückzuführen sind, müssen ausführlich fachlich begründet werden, und ihre Berücksichtigung sollte im Rahmen von Ersatz- und Ausgleichsregelungen geprüft werden.

Beispiel der Umsetzung für Neubaugebiete in Schleswig-Holstein

In Schleswig-Holstein wurden „Wasserrechtliche Anforderungen zum Umgang mit Regenwasser in Neubaugebieten – Teil 1 Mengenbewirtschaftung“ eingeführt und angewendet, um die Auswirkungen von neuen Baugebieten auf den Wasserhaushalt abzuschätzen. Diese Empfehlung ist sehr nah an DWA 2022, Merkblatt DWA-M 102-4/BWK-M 3-4 angelehnt und etwas vereinfacht.

Ziel ist, die abzuleitenden Wassermengen zu reduzieren. Hierzu wird auch ein Berechnungsprogramm kostenlos zur Verfügung gestellt). Die Berechnung erfolgt in vier Schritten, die im Folgenden skizziert werden. Die Berechnungsformeln sind Schleswig-Holstein Landesamt für Umwelt (2023) zu entnehmen:

Zuerst wird der potenziell naturnahe Referenzzustand ermittelt und in jeweils einen abflusswirksamen (a), einen versickerungswirksamen (g , Grundwasserneubildung) und einen verdunstungswirksamen (v) Anteil (a - g - v -Werte) unter Berücksichtigung der örtlichen Niederschlags-, Boden- und Nutzungsverhältnisse aufgeteilt (vgl. Schleswig-Holstein-Landesamt für Umwelt 2023). Dieser Schritt ließe sich relativ einfach für Deutschland durchführen, basierend auf den Bodentypenkartierungen.

Für das Planungsgebiet wird der verbleibende Anteil natürlicher Teilfläche und befestigter Teilfläche ermittelt. Dies ließe sich großflächig zum Beispiel über Versiegelungsdaten und deren Veränderung abdecken. Nachfolgend werden ein abflusswirksamer (a), ein versickerungswirksamer (g , Grundwasserneubildung) und ein verdunstungswirksamer (v) Anteil (a - g - v -Werte) bestimmt. Hierfür werden Faktoren für die Flächentypen – Steildach, Flachdach, extensives Gründach, intensives Gründach, Asphalt/Beton, Pflaster mit dichten Fugen, Pflaster mit offenen Fugen, durchlässiges Pflaster, wassergebundene Deckschicht, Straße mit Baumüberdeckung von 80 % – definiert.

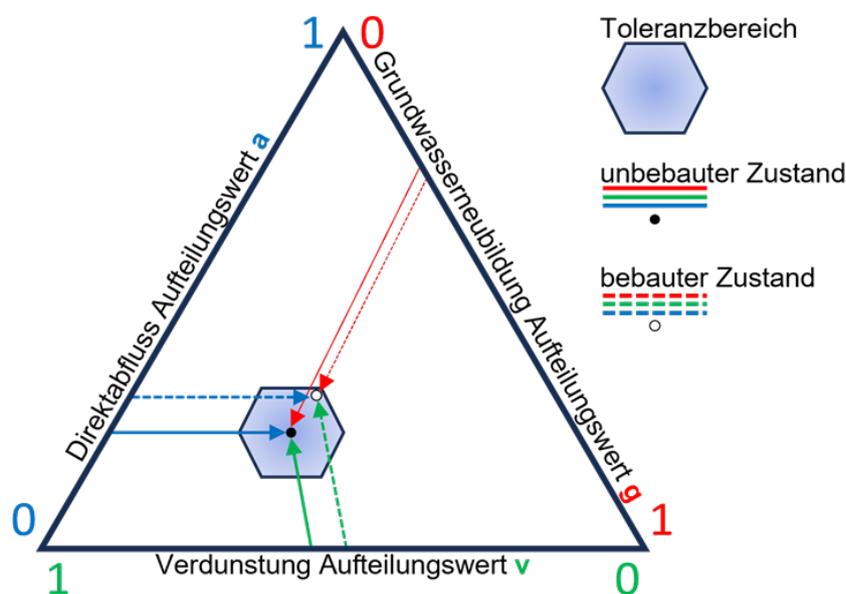
Diese Daten sind für ein konkretes Baugebiet einfach zu ermitteln. Eine flächendeckende Erhebung für das Bundesgebiet ist anhand von Satellitendaten und Überfliegungsdaten in grober Näherung denkbar, zum Beispiel über die Versiegelungsgrade und über eine separate Bestimmung von Gründächern und Landbedeckungstypen.

Um den abflusswirksamen Anteil der befestigten Fläche weiter zu reduzieren, sind nun Maßnahmen zu definieren. Für typische Maßnahmen wie Abteilung in die Kanalisation, Regenrückhaltebecken, Versickerungsmulden, Mulden-Rigolen-Elemente, Tiefbeete, Schachtversickerung werden reduzierende Werte angegeben.

Dieser Schritt lässt sich nur mit lokalen Kenntnissen zu umgesetzten Maßnahmen durchführen, da viele dieser Maßnahmen, insbesondere jene, die unter der Erde stattfinden, nicht durch verfügbare Datensätze wie Befliegung- und Satellitendaten abbildbar sind. Hier wären die Kommunen gefragt, solche Informationen in eine zu bereitstellende Datenbank einzupflegen, was sich gerade für den Bestand als äußerst schwierig erweisen könnte.

Im letzten Schritt findet ein Vergleich des Wasserhaushalts im neuen Planungsgebiet mit dem Referenzzustand statt. Hierbei wird der Anteil der Zu-/Abnahme (Δ in %) der abflusswirksamen, versickerungswirksamen und verdunstungswirksamen Teilflächen, jeweils bezogen auf die Gesamtfläche des Planungsgebiets/Bebauungsgebiets ermittelt. Bei Abweichungen von unter 5 % der einzelnen Werte wird von einem weiterhin naturnahen Wasserhaushalt ausgegangen und es ist keine weitere Überprüfung notwendig. Bei Abweichungen von 5 bis 15 % ist eine lokale Überprüfung durch einen Nachweis der Einhaltung des bordvollen Abflusses (die Abflussmenge im Gewässerbett, die gerade noch ohne Ausuferungen abfließen kann), einen Nachweis der Vermeidung von Erosion sowie einen Nachweis der Vermeidung der Grundwasser-Aufhöhung notwendig. Abweichungen der Anteile von mehr als 15 % sind grundsätzlich zu vermeiden und erfordern ansonsten zusätzlich regionale Überprüfung.

Abbildung 7
Hydrologisches Dreieck zur (schematischen) Darstellung der Bilanzgrößen im unbebauten und bebauten Zustand



Quelle: Eigene Darstellung nach DWA 2022, DWA-M 102-4

Diese beiden Ansätze lassen sich aktuell jedoch kaum auf große Bereiche beziehungsweise flächendeckend für deutsche Städte übertragen. Dies liegt weniger an den Berechnungsmethoden, sondern viel mehr an den zugrunde liegenden Datensätzen. Bisher sind räumliche Daten zu den Maßnahmen beziehungsweise Bewirtschaftungsanlagen nach Kenntnis der Experten und Datenrecherchen nicht verfügbar. Die notwendigen kleinräumigen Informationen zu Teilentriegelungen, unterirdischen Wasserspeichern und Rigolen sind von außen nicht erkennbar, sondern erfordern das aktive Eingeben und Zusammenführen. Der Aufwand, solche Daten hierfür vor allem rückwirkend zu erheben, ist für die Kommunen als zu hoch einzuschätzen, da dies in vielen Fällen nur aus einzelnen Dokumenten wie Bebauungs- und Entwässerungsplanungen – sicherlich teilweise noch analog – zu erfolgen hätte. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, solche Daten für anstehende Bauvorhaben zentral, zum Beispiel landesweit, zu erheben und in einer Datenbank einzupflegen und ergänzend auf einen vereinfachten und per Satellitendaten verfügbaren Ansatz zurückzugreifen.

Beide genannte Verfahren scheitern in der flächendeckenden Umsetzung auf Bundesebene daran, dass detaillierte Informationen zu den Maßnahmen beziehungsweise Bewirtschaftungsanlagen fehlen. In dem vereinfachten Ansatz für eine naturnahe Wasserbilanz bleiben daher zunächst viele sinnvolle ingenieurstechnische Maßnahmen unberücksichtigt und es werden zunächst nur Maßnahmen an der Oberfläche wie Flächeninanspruchnahme, Landbedeckungsänderung wie Dachbegrünung und Entsiegelung betrachtet. Hierzu werden folgende Schritte vorgeschlagen:

- Berechnung der bundesweit flächendeckenden potenziellen naturnahen Wasserbilanz (AE) mit Aufteilung der abflusswirksamen (a), versickerungswirksamen (g) und verdunstungs- beziehungsweise evapotranspirationswirksamen (v) Flächen (a-g-v-Werte) als Referenz- und langfristiger Zielwert. Hier kann dem genannten Verfahren anhand des Hydrologischen Atlas Deutschland (HAD) nach DWA (2022) sowie nach Schleswig-Holstein (2022) gefolgt werden. Zu beachten ist allerdings, dass der langfristige Zielwert aufgrund der vereinfachten Methode in Siedlungsgebieten praktisch nicht erreicht wird, da Maßnahmen wie Bewirtschaftungsanlagen nicht berücksichtigt werden können.
- Berechnung von vereinfachten Aufteilungswerten der Wasserbilanz für Stadtgebiete zum Referenzzeitpunkt (T₀, zum Beispiel 2000) und zum aktuellen Zeitpunkt (T₁, 2023). Die Stadtgebietsflächen werden zunächst analog zu Schleswig-Holstein (2022) in unbebaute natürliche Teilflächen (AE, #) sowie in die befestigten Teilflächen (AE, b) aufgeteilt. Für AE, # gilt die Aufteilung der potenziellen naturnahen Wasserbilanz des Gebiets. Für andere Siedlungsflächen wird die Aufteilung anhand der Landbedeckung abgeschätzt.

Neben dem Copernicus-Datensatz gibt es noch verschiedene weitere Ansätze zur Bestimmung beziehungsweise Erfassung der versickerungsfähigen Flächen. García & Pérez (2016) haben verschiedene Methoden und Indikatoren für Bodenversiegelung verglichen. Gleichzeitig gab es auf europäischer Ebene mehrere Projekte, die sich mit dem Thema der Erfassung der Bodenversiegelung auseinandersetzen. Mit einer räumlichen 10-m-Auflösung stehen für den Zeitraum von 2006 bis 2018 der Imperviousness-Datensatz der EEA zur Verfügung. Für den deutschen Raum gibt es seitens der statistischen Ämter des Bundes und der Länder für das Bezugsjahr 2016 die Berichtslegung zur bundesweiten Bodenversiegelung. Ebenfalls bundesweit und bis auf administrative Größen der Gemeindegrenzen hinunter bildet das Incora-Dashboard den Grad der Flächenversiegelung ab. Für das Bundesland Bayern wurde für das Jahr 2015 mithilfe einer satelliten-gestützten Erfassung flächendeckend die Versiegelung erfasst.

Die Kartierung von Bodenversiegelung mithilfe von Luftbildern ist schwierig, in bebauten Gebieten, die oft mit natürlichen Räumen durchsetzt sind, sowie aufgrund der Vielfalt an Gebäuden wie Häuser, Wohnblocks, Industrieanlagen, Verkehrswege, Freizeitbereiche. In der Literatur werden verschiedene Analysemethoden vorgeschlagen, um das Problem zu lösen; die Ergebnisse variieren jedoch erheblich je nach benötigter Genauigkeit, Maßstab und den Bedingungen im Untersuchungsgebiet (vgl. García/Pérez 2016). Für Spanien ist der Soil-adjusted Vegetation Index (SAVI) basierend auf Satellitendaten des NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) am besten geeignet (vgl. García/Pérez 2016). NDVI lässt sich auch als Ausgangspunkt für Bodenversiegelung nutzen, sodass der Anteil der versiegelten Flächen in Prozent abgeschätzt werden kann, anhand von Orthofotos in 10 m Auflösung in Kombination mit Lidar-Daten (vgl. Codemo et al. 2022). Mit so einem Ansatz ließe sich die Veränderung des Versiegelungsgrads und des Vegetationsanteils einschließlich Dachbegrünung ermitteln.

Zusätzlich können weitere Datensätze wie Luftbilder herangezogen werden, um detaillierte Informationen zur Umsetzung von Maßnahmen wie Dachbegrünung zu erhalten. Dachbegrünungen können, sofern sie entsprechend qualitativ ausgestaltet sind (unter anderem durch eine hohe Substratdicke) zwischen 40 und bis zu 80 % des Regenwassers aufnehmen und teilweise über Evapotranspiration abgeben, sodass sie sehr effektiv die Kanalisation entlasten und sich positiv auf die Überflutungssituationen bei Starkregenereignissen auswirken können (vgl. Palla et al. 2010; Raimondi et al. 2023). Sie können somit einen Beitrag leisten, die natürliche Funktion des Wasserhaushalts herzustellen (vgl. Palla et al. 2010). Der Anteil und die Fläche an Dachbegrünung lässt

sich über Satellitendaten und IR-Bänder und Digitale Oberflächenmodelle (DSM) abschätzen (vgl. Mutani/Todeschi 2020). Auch der Bundesverband Gebäudegrün e. V. (BUGG) hat in dem Projekt „Fernerkundliche Identifizierung von Vegetationsflächen auf Dächern“ zur Entwicklung des für die Bereiche des Stadtklimas, der Stadtentwässerung und des Artenschutzes aktivierbaren Flächenpotenzials in verschiedenen Städten eine Methodik entwickelt und erprobt (vgl. BUGG 2020). Ein bundesweiter Datensatz ist allerdings noch nicht vorhanden.

In Näherung lässt sich auch das Potenzial für Dachbegrünung anhand Satellitendaten abschätzen, wie zum Beispiel in Joshi et al. 2020 (vgl. Mutani/Todeschi 2020) beschrieben wird. Hier ist allerdings zu berücksichtigen, dass viel Potenzial auch auf privaten Gebäuden besteht und sich die Umsetzung dort seitens Bund, Länder und Kommunen nur bedingt beeinflussen lässt.

In den vorhandenen Versiegelungsdatensätzen von Copernicus sind Dachbegrünungen nicht als versiegelte Flächen berücksichtigt, aber aufgrund der geringen räumlichen Auflösung der Satellitendaten nicht einzeln und flächenscharf zu identifizieren.

Schließlich wird eine Bewertung anhand von einem langfristigen und einem kurzfristigen Zielwert durchgeführt:

Der langfristige Kernindikator zur naturnahen Wasserbilanz (ΔW_{ZIEL}) beschreibt die Abweichung der Wasserbilanz zum langfristigen Zielwert für die Aufteilungswerte Abfluss (a), Versickerung (g) und Evapotranspiration (v) (ΔW_{ZIEL}). Der Zielwert dabei ist, eine mittlere Abweichung von unter $\pm 15\%$ gegenüber der naturnahen Wasserbilanz zu erreichen (gemäß Land Schleswig-Holstein 2023). Wie oben beschrieben, ist dies aufgrund der Methodik aktuell kaum möglich, aber der aktuelle Umgang mit Wasser in der Stadt ist noch deutlich abweichend von diesem Ziel, sodass der langfristige Zielwert in entsprechende Unterteile untergliedert werden kann, was aber eine wichtige Maßgabe für die regionalspezifisch unterschiedliche Zielrichtung ist. Als Kernindikator für eine kurzfristige Zielsetzung wird ΔW_{ZEIT} als zeitliche Veränderungen der Wasserbilanz für die Aufteilungswerte Abfluss (a), Versickerung (g) und Evapotranspiration/Verdunstung (v) definiert. Für diesen Indikator kann zunächst ein Verschlechterungsverbot definiert werden, das sich vom aktuellen Zeitpunkt (T1) gegenüber dem Referenzzeitpunkt (T0) keine Erhöhung des Abflussanteils, keine Abnahme des Versickerungsanteils sowie keine Abnahme des Verdunstungsanteils ergeben soll.

Im Folgenden wird ein Beispiel für eine mögliche Berechnung und Verwendung des Indikators ΔW gegeben:

Tabelle 3

Übersicht für eine beispielhafte Berechnung des Indikators ΔW unter Berücksichtigung des Abflussanteils, des Versickerungsanteils sowie des Verdunstungsanteils, welche in das Verhältnis zu den Flächenanteilen der „naturnahen unbebauten Flächen“, der „befestigten Flächen“ sowie dem daraus und „anteilig gewichtetem Mittel“ gesetzt werden. Das berechnete Verhältnis wird jeweils für einen Referenzzeitpunkt (in der Vergangenheit) sowie für einen „aktuellen“ Zeitpunkt ermittelt.

	Anteil (%)	Abflussanteil % (a) Abflusswirksame Fläche des potenziellen naturnahen Referenzgebiets $A_{E,a}$	Versickerungsanteil % (g) Versickerungswirksame Fläche des potenziellen naturnahen Referenzgebiets $A_{E,g}$	Verdunstungsanteil % (v) Verdunstungswirksame Fläche des potenziellen naturnahen Referenzgebiets $A_{E,v}$
Naturnahe Referenzfläche (A_E)	1	4	31	65
Flächenanteile zum Referenzzeitpunkt (zum Beispiel 2000) (T0)				
Naturnahe unbebaute Fläche ($A_E, \#$)	0,2	4	31	65

	Anteil (%)	Abflussanteil % (a) Abflusswirksame Fläche des potenziellen naturnahen Referenzgebiets $A_{E,a}$	Versickerungsanteil % (g) Versickerungswirksame Fläche des potenziellen naturnahen Referenzgebiets $A_{E,g}$	Verdunstungsanteil % (v) Verdunstungswirksame Fläche des potenziellen naturnahen Referenzgebiets $A_{E,v}$
Befestigte Fläche (AE)	0,8	69	8	23
Anteilig gewichtetes Mittel (A_{T0})	1	56	12,6	31,4
Flächenanteile zum aktuellen Zeitpunkt zum Beispiel 2022 (T1)				
Naturnahe unbebaute Fläche (AE, #)	0,3	4	31	65
Befestigte Fläche (AE)	0,7	69	8	23
Anteilig gewichtetes Mittel (A_{T1})	1	49,5	14,9	35,6
Kernindikator (Bewertung)				
		$\Delta W_{ZIEL,a} = A_{E,a} - A_{T1,a}$	$\Delta W_{ZIEL,g} = A_{E,g} - A_{T1,g}$	$\Delta W_{ZIEL,v} = A_{E,v} - A_{T1,v}$
Abweichung der Wasserbilanz zum langfristigen Zielwert für die Aufteilungswerte Abfluss (a), Versickerung (g) und Evapotranspiration (v) ΔW_{ZIEL}		-45,5	16,1	29,4
Langfristiger Zielwert		Abweichung von unter $\pm 15\%$ (gemäß Land Schleswig-Holstein 2023)		
		$\Delta W_{ZEIT} = A_{T1,a} - A_{T0,a}$	$\Delta W_{ZEIT} = A_{T1,g} - A_{T0,g}$	$\Delta W_{ZEIT} = A_{T1,v} - A_{T0,v}$
Zeitliche Veränderungen der Wasserbilanz für die Aufteilungswerte Abfluss (a), Versickerung (g) und Evapotranspiration/Verdunstung (v) ΔW_{ZEIT}		-6,5	2,3	4,2
Kurzfristiger Zielwert: Verschlechterungsgebot		keine Erhöhung des Abflussanteils	keine Abnahme des Versickerungsanteils	keine Abnahme des Verdunstungsanteils

Quelle: Eigene Darstellung

Initialindikator versickerungsfähige Flächen

Wenngleich der Anteil der wasserdurchlässigen Flächen beziehungsweise der Anteil der versiegelten Flächen nur einen Teilaspekt des Wasserhaushalts darstellt, sind diese wichtige Größen, die den Oberflächenabfluss

eines Gebiets beschreiben (vgl. Sohn et al. 2020; Wang et al. 2020). Darüber hinaus verringern wasserdurchlässige Flächen nicht nur den Oberflächenabfluss, sondern erhöhen auch die Fähigkeit Wasser zu speichern und zu verdunsten. Eine typischerweise geringere Wärmespeicherkapazität gegenüber vollversiegelten Flächen leistet einen Beitrag, um die städtische Überwärmung zu verringern (vgl. Kirchner et al. 2021; Gangwisch et al. 2023).

Anzumerken ist, dass es verschiedene Oberflächenbeläge gibt, die eine gewisse Wasserdurchlässigkeit aufweisen, aber dennoch je nach Detailschärfe und Grenze entweder als unversiegelt, wasserdurchlässig oder versiegelt bewertet werden. Dies betrifft zum Beispiel teilversiegelte Flächen wie Schotterrasen, Kiesbelag, Holzpflaster oder Porenpflaster. Den verschiedenen Materialien wird ein unterschiedlicher Abflussbeiwert zugeschrieben. Der Abflussbeiwert gibt das Verhältnis von oberflächlich ablaufendem Regenwasser zur Gesamtmenge an. Ein höherer Abflussbeiwert bedeutet, dass weniger Regenwasser versickert. Wenn der Beiwert 1 beträgt, erfolgt keine Versickerung des Regenwassers, während bei einem Beiwert von 0 kein oberflächlicher Abfluss auftritt und das gesamte Regenwasser versickert.

Wenn als Datengrundlage verfügbare Fernerkundungsdaten mit einer räumlichen Gitterweite von 10 m verwendet werden, dann sind solche teilversiegelten Flächen sowie kleinere Maßnahmen der Entsiegelung, zum Beispiel Straßenbegleitgrün oder Entsiegelung von Hinterhöfen, nicht abbildbar. Dies gilt auch für die benannten Datensätze wie das Copernicus Impervious Surface. Hier wäre ebenfalls eine deutlich höhere räumliche Auflösung von 0,01 bis 1 m anzustreben, wie sie aus Orthofotos für viele Städte und Länder erhoben wurden.

Grundsätzlich ist auch hier die Anwendung des Prinzips des Verschlechterungsverbots beziehungsweise des Verbesserungsgebots denkbar. Dennoch ist es schwierig, eine geeignete langfristige Zieldefinition zu finden. Dies liegt auch darin begründet, dass unterschiedliche Stadtstrukturen ganz unterschiedliche Potenziale haben, um eine Entsiegelung durchzuführen (vgl. Malinowski et al. 2018). Dies zeigt auch eine Studie aus Bayern, wo der Versiegelungsgrad der Siedlungs- und Verkehrsflächen und der versiegelten Siedlungs- und Verkehrsflächen pro Einwohnerin/Einwohner stark schwankt und für den Versiegelungsgrad zwischen 41 und 52 % liegt und gleichzeitig beim Flächenverbrauch pro Einwohner zwischen 557 m² in Westmittelfranken und 141 m² in München lag (vgl. Esch et al. 2007). Bundesweit wird weiterhin von einer Zunahme der Versiegelung ausgegangen und ein Zielwert von unter 30 ha pro Tag an Flächenverbrauch und damit Neuversiegelung bis 2030 angestrebt. Dies zeigt ebenfalls die Schwierigkeit, eine tatsächliche Verringerung der Versiegelung und eine Zunahme der entsiegelten beziehungsweise wasserdurchlässigen Flächen zu erreichen. Hier scheint daher zunächst ein Verschlechterungsverbot, zum Beispiel als Netto-Null-Versiegelung pro Stadtgebiet, als angemessen.

Für die Erprobungsphase ist zu beachten, dass die Indikatoren zur Hitzevorsorge und zum Wasserhaushalt nicht getrennt voneinander zu betrachten sind. So zeigen zum Beispiel Frick et al. (2020) den bekannten Zusammenhang, dass mit zunehmender Grünvolumenzahl der Versiegelungsgrad abnimmt und die Oberflächentemperatur sich reduziert. Es ist daher zu prüfen, ob und welchen Mehrwert die Verwendung beider Indikatoren mit sich bringt.

Umsetzungsempfehlungen Indikatorbereich „Naturnaher Wasserhaushalt“

Es wird empfohlen, den vorgeschlagenen Kernindikator ΔW sowie den einfachen Initialindikator für wasserdurchlässige Fläche gegebenenfalls pro Person für ausgewählte Testkommunen unter Einbeziehung von lokaler Sachexpertise zu erproben, um sicherzustellen, dass kleinteilige Veränderungen durch Anpassung hinreichend und in angemessenen Maßen Berücksichtigung finden. In diesem Zuge sollte ebenfalls erprobt werden, ob und inwieweit einfache erhebliche Anpassungsmaßnahmen wie Dachbegrünung und Teilentsiegelung über die vorhandenen Landnutzungs- und Versiegelungsdatensätze abbildbar und inwieweit separate Analysen, zum Beispiel aus IR-Luftbildern, abzuleiten sind.

Darüber hinaus sollte erörtert werden, ob landes- beziehungsweise bundesweite Datensätze zur Erfassung

von Regenwasserbewirtschaftungsanlagen und -maßnahmen auf einer Lokalskala aufgebaut werden können und sollten, um später auch die detaillierten Aussagen zum „Naturnahen Wasserhaushalt“ als Indikator umsetzen zu können.

Mögliche Priorisierung und Umsetzung

Im Folgenden werden erste Überlegungen zu einer praktikablen Umsetzung genannt, die während der Literaturanalyse, der Diskussionen in den Workshops und den Hintergrundgesprächen aufgekommen sind.

Räumliche Priorisierung durch Klimaanpassungsgebiete

Aufgrund begrenzter Ressourcen ist in der Regel eine Priorisierung notwendig, um besonders gefährdete und vulnerable Orte zu identifizieren. Hierfür kann die Definition von Klimaanpassungsgebieten hilfreich sein, die das Risiko – also die Gefährdung durch die Klimafolgen und die Vulnerabilität der Bevölkerung – betrachtet. Die Klimaanpassungsgebiete können sowohl für die Priorisierung von Handlungsbereichen in den Kommunen genutzt werden als auch für die Struktur einer Förderkulisse des Bundes.

Der Begriff „Klimaanpassungsgebiet“ ist nicht klar definiert. In der vorangegangenen Diskussion und in den Workshops wurde meist der Begriff „Klimasanierungsgebiet“ verwendet, der sich sowohl auf Klimaschutz als auch auf Klimawandelanpassung beziehen kann. Der DSTGB fordert im Juni 2022 an die Städtebaugesetzgebung: „Die städtebauliche Sanierung im Bestand muss die Erfordernisse von Klimaschutz und Klimaanpassung noch stärker in den Fokus nehmen.“ Ein expliziter **Gebietstyp „Klimasanierung“** in Ergänzung oder Weiterentwicklung von § 136 BauGB kann dazu beitragen, Maßnahmen des Klimaschutzes und der Klimaanpassung als Anlass und vorrangiges Ziel im Rahmen integrierter städtebaulicher Gesamtmaßnahmen umzusetzen. Dies wird auch im Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen diskutiert. Im Projektverlauf hat sich der Terminus aber zu Klimaanpassungsgebieten verschoben, da Klimasanierungsgebiet begrifflich zu nah an städtebaulichen Sanierungsgebieten ist.

Stadtklima und Planungshinweiskarte

Der Begriff Klimaanpassungsgebiet scheint hierbei eng mit der Stadtklimaanalyse- und Planungshinweiskarte verknüpft zu sein. Stadtklimaanalysekarten sind in der deutschen Raumplanung seit den 1990er-Jahren weit verbreitet und aktuell verfügen insbesondere die meisten Großstädte über eine solche Datengrundlage. Ziel ist es, das Schutzgut Klima und Luft in den Planungsprozessen auf verschiedenen stadtplanerischen Ebenen zu berücksichtigen. Der VDI gibt hierzu regelmäßig aktualisierte Empfehlungen ab (vgl. VDI 2015), an denen sich die Kommunen orientieren können. Heutige moderne Stadtklimamodellierungen können zum einen auf rechenintensiven, hochauflösenden Klimamodellen oder auf Berechnungshybriden (aus numerischen Simulationen und GIS-gestützten Modellierungen/Berechnungen) beruhen, die typischerweise für einen Sommertag gerechnet werden und so die räumliche Variabilität in dem Gebiet abbilden sollen. Aufgrund unterschiedlicher und sich weiterentwickelnder Modellansätze und Methoden ist ein direkter Vergleich zwischen verschiedenen Kommunen sowie auch innerhalb einer Kommune kaum möglich.

Beispiele der Städte Leipzig und Freiburg

Die Stadt Leipzig hat bereits Klimaanpassungsgebiete anhand der Stadtklimaanalysekarte und der ungünstigen stadtklimatischen Situation identifiziert, in denen prioritär mit der Maßnahmenumsetzung begonnen werden soll (vgl. Stadt Leipzig 2023). Auch einige andere Städte wie zum Beispiel Stuttgart haben in ihren FNPs bereits Klimaanpassungsgebiete ausgewiesen. Die Stadt Freiburg hat sogenannte Hotspots innerhalb der Stadtklimaanalyse identifiziert, in der auch die Empfindlichkeit verschiedener Siedlungsbereiche gegenüber extremen Hitzebeeinträchtigungen im Sommer berücksichtigt wurden. Die Vulnerabilität wurde definiert als Gebiete mit hoher Bevölkerungsdichte, einem hohen Anteil an älteren und jungen Menschen, zahlreichen sensiblen Einrichtungen wie Kindergärten, Schulen, Seniorenwohnheime und Krankenhäuser sowie einem Mangel an

Freiräumen, die als Erholungsflächen an heißen Tagen genutzt werden können (Entlastungsräume) (vgl. Stadt Freiburg 2023).

Die Planungshinweiskarten übersetzen dabei die detaillierten Stadtklimaanalysen, die unter anderem das Windfeld, die Luftleitbahnen, die thermische Belastung und die möglichst konkreten planerischen Handlungsempfehlungen, und nehmen eine Bewertung vor. Typischerweise werden solche Bereiche der Stadt (auf Ebene von einzelnen Straßenzügen, Quartieren oder Innenstadtbereichen) mit einer (sehr) ungünstigen bioklimatischen Situation identifiziert. Für diese Flächen gilt beispielsweise in Bonn, dass es sich um Siedlungsflächen handelt, die durch eine hochverdichtete Bebauung, einen sehr hohen Versiegelungsgrad und einen sehr geringen oder keinen Grünanteil charakterisiert sind. Diese weisen eine sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung auf. 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 (insbesondere zu Lasten von umgebenden Grün-/Freiflächen) erfolgen. Stattdessen soll der Erhalt der Freiflächen und eine Verbesserung der Durchlüftung sowie möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils beziehungsweise Entsiegelungsmaßnahmen angestrebt werden“ (vgl. Stadt Bonn 2019).

Die Methodik der Stadtklima- und Planungshinweiskarten ist daher prinzipiell gut geeignet, um lokale Klimaanpassungsgebiete zu identifizieren. Die zeitliche und die bundesweite Vergleichbarkeit sind allerdings nur bedingt gegeben und viele – gerade kleinere – Kommunen haben solche Datengrundlagen nicht. Für eine Vergleichbarkeit, sowohl zeitlich als auch zwischen verschiedenen Kommunen, kommen bei bundesweiter Abdeckung eher Abschätzungen der thermischen Belastungen, zum Beispiel durch Kombination von Landoberflächentemperaturen von Satellitendaten und Klassifizierung wie Klimatope beziehungsweise Local Climate Zones, infrage.

Ein bundesweiter Ansatz, der nicht nur auf das Ziel Hitzevorsorge, sondern auch auf wassersensible Stadtentwicklung abzielt, wäre denkbar, um lokale und regionale Risikogebiete zu identifizieren. Hierfür könnte auf folgende Daten zurückgegriffen werden:

Hitzegefährdung (entweder absolut oder die relative Veränderung)

Lokal:

- Stadtklimaanalysen: Viele Großstädte verfügen über eigene Stadtklimaanalysen. Auch von den 16 Bundesländern haben neben Berlin, Hamburg und Bremen auch Nordrhein-Westfalen (vgl. LANUV 2018) und Bayern für das gesamte Land Stadtklimaanalyse- und Planungshinweiskarten bereits erstellt, die eine räumliche Priorisierung erkennen lassen, auch wenn in geringer Detailschärfe.
- Landoberflächentemperatur: Verwendung von satellitengestützten Datengrundlagen der Oberflächentemperatur (Land Surface Temperature, LST). Die Oberflächentemperatur ist nicht mit der Lufttemperatur gleichzusetzen und beschreibt insbesondere die thermische Belastung in einem geringeren Maße als die Lufttemperatur. Die Oberflächentemperatur kann aber dennoch geeignet sein, und hierfür stehen verschiedene Produkte bereit. Außerdem ist es auch prinzipiell möglich, die Lufttemperatur aus Oberflächentemperatur abzuleiten (vgl. Goldblatt et al. 2021). Die ESA hat aktuell, basierend auf Sentinel-2-Bildern, eine räumliche Auflösung von 20 m, die über statische Ansätze noch erhöht werden kann. Das Projekt UrbanGreenEye bietet auch bereits eine interaktive Karte für Leipzig der Landoberflächentemperatur an, mithilfe derer zum Beispiel Zeitreihen von 1980 bis heute erstellt werden können. Landsat-Satelliten zeigen Mittelwerte mehrerer tausend Einzelaufnahmen der thermischen Infrarotsensoren.

Regional:

- Der Deutsche Wetterdienst verwendet schon seit Langem zur Beschreibung der Witterung des Klimas sogenannte klimatologische Kenntage wie für den Sommer zum Beispiel Sommertage (Maximum der Luft-

temperatur ≥ 25 °C), heiße Tage (Tageshöchsttemperatur ≥ 30 °C) oder Tropennächte (Tagesminimumtemperatur ≥ 20 °C). Der DWD gibt Rasterdaten der Lufttemperatur sowie vieler Kenntage in 1 km Auflösung über einen langen Zeitraum von 1951 bis jeweils Ende letzten Jahres heraus.

- Auch die Verwendung von Klimaprojektionen, zum Beispiel vom PIK oder EURO-CORDEX, wäre denkbar, sodass auch die zukünftige Klimagefährdung abgebildet werden kann.

Starkregen- und Dürrefährdung

Lokal:

- Das Bundesamt für Kartografie und Geodäsie (BKG) arbeitet gemeinsam mit Fachbehörden aus Bund und Ländern an einer deutschlandweiten Hinweiskarte zu Starkregengefahren. Es ist geplant, dies bis Ende 2025 abzuschließen.
- KlamEx – Dashboard zum Ereigniskatalog CatRaRE Starkregen.

Regional:

- Auf regionaler Ebene gibt es verschiedene Ansätze, welche die Trockenheit und Dürren deutschlandweit abbilden. Dies ist zum Beispiel der Dürre-Monitor des UFZ mit einer Rasterweite von 4 km beziehungsweise 1,2 km oder der Dürreatlas des BKG.

Regionale bis lokale Vulnerabilität der Bevölkerung:

- Hier kann auf verschiedene Datensätze wie Altersstruktur, Einkommen und Verdienste, Armutsgefährdung, Arbeitslosigkeit, Anteil am Migrationshintergrund zurückgegriffen werden. Solche Daten werden nur auf Landkreisebene frei verfügbar. Sie sind aber auch über das genormte Europäische Referenzraster in einer Kachelung von 100 x 100 m in höherer Auflösung vorhanden.
- Bevölkerungsdichte kann hier ebenfalls ein einfacher, aber relevanter Indikator sein.

Lokale Vulnerabilität der Infrastruktur beziehungsweise der kritischen Infrastruktur:

- Hier können Einrichtungen für besonders sensible Bevölkerungsgruppen wie Krankenhäuser, Pflegeheime, Kitas betrachtet werden, aber auch kritische und versorgungsrelevante Infrastrukturen wie Umspannwerke, Feuerwehr.

Mögliche Verwendung

1. Festlegung der Definition von Klimasanierungs- beziehungsweise Risikogebieten, zum Beispiel nach:
 - Bewertung anhand der verschiedenen Layer: höchstes Risiko/höchster Handlungsbedarf mit schneller Maßnahmenumsetzung bei Gebieten, die sowohl bei Hitze, Wasser und Vulnerabilität die höchsten Werte erhalten haben und so weiter
 - Definition von regionalen Schwerpunkten
 - zum Beispiel Gießkannenprinzip: ein Klimaanpassungsgebiet pro 50.000 Einwohnenden (sodass zum Beispiel Großstädte wie Kassel 4 bis 5 Gebiete haben, es in Berlin aber deutlich mehr sind)
2. Bereitstellung der bundesweiten Daten durch eine Servicestelle des Bundes.
3. Möglichkeit der Verwendung eigener kommunaler Datenquellen, insbesondere durch Stadtklimaanalysekarten.
4. Etablierung einer gezielten Förderkulisse für die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen.

5. Mögliche Zielsetzung: Verbesserungsgebot: In 25 % / 50 % der Klimaanpassungsgebiete ist innerhalb von fünf Jahren eine signifikante Reduzierung der thermischen Belastung zu erzielen. Inwieweit ein pauschalisierter Wert zur Reduktion fachlich zu vertreten ist oder sich die zu erreichende Reduktion entsprechend der Standortsituation individuell ableiten muss, kann in diesem Rahmen nicht beantwortet werden.

Forschungs- und Erprobungsbedarf

Innerhalb der vorgegebenen Projektlaufzeit wurden erste Ergebnisse erzielt und Überlegungen für Kern- und Initialindikatoren getroffen. Die beiden komplexeren Kernindikatoren „Klimaaktives Grün“ und „Naturnaher Wasserhaushalt“ sind theoretisch mit den aktuell vorhandenen Daten bundesweit abbildbar, was in einem praxisnahen Test zu überprüfen ist.

Eine effizientere Lösung bietet sich zukünftig und langfristig durch die Verwendung von Fernerkundungsdaten aus Luftbildern an. Diese stehen flächendeckend und vergleichbar für alle Städte zur Verfügung. In diesem Fall könnte eine zentrale oder landesweite Einheit die Datenverarbeitung übernehmen, ohne dass die Kommunen zusätzliche Zeit investieren müssen, und entsprechend nicht zusätzlich belastet werden.

Es ist wichtig, dass dies keine zusätzliche finanzielle, zeitliche oder personelle Belastung für die Kommunen darstellt und, dass der Aufwand für die Datenerhebung und Aktualisierung für die umsetzenden Instanzen gering gehalten wird. Daher ist es das Ziel, dass die erforderlichen Datengrundlagen auf Landes- oder Bundesebene zentral erfasst und bereitgestellt werden, beispielsweise in Kompetenzzentren. Die Kommunen können diese Datengrundlage bei Bedarf ergänzen (kommunale Ebene), insbesondere, wenn präzisere und detailliertere Daten zur Verfügung stehen. Durch die zentrale Datenbereitstellung unter Einbindung der Kommunen können belastbare und vergleichbare Informationen zur Verfügung gestellt werden, die als Grundlage für die Planung und die Überprüfung der Umsetzung von Maßnahmen dienen können.

Die Indikatoren selbst sind wertneutral. Sie bieten jedoch die Möglichkeit auf Bundesebene die Rahmenbedingungen zur Planung und zur Umsetzung von Klimawandelanpassungsmaßnahmen zu beeinflussen, indem beispielsweise der rechtliche Rahmen für Strategien angepasst wird und Förderprogramme geschaffen sowie spezifische Berechnungsvorschriften, zum Beispiel für Neubaugebiete, empfohlen werden. Es ist wichtig, dass die kommunale Planungshoheit gewahrt bleibt. Dennoch ist es wünschenswert, dass die Kernindikatoren auch ein Signal an die Kommunen senden und diese die Indikatoren im Kontext ihrer Planungsprozesse berücksichtigen beziehungsweise in ihre Planungsprozesse einfließen lassen, beispielsweise bei der Erstellung von kommunalen Planungen wie Flächennutzungspläne oder Bauleitplanungen.

Des Weiteren sollten die Ziele regelmäßig überprüft und aktualisiert werden, um sicherzustellen, dass sie den aktuellen Anforderungen und Entwicklungen gerecht werden. Dabei ist es ratsam, auf wissenschaftliche Erkenntnisse und Fachexpertise zurückzugreifen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen, um die Wirksamkeit der Ziele und deren Messung kontinuierlich zu verbessern.

Bevor die Indikatoren bundesweit eingesetzt werden, sollten sie zunächst anhand kleinerer Projektgebiete getestet und evaluiert werden. Dies beinhaltet die Überprüfung, welcher der verfügbaren Datensätze besonders geeignet ist und weniger Fehler im Vergleich zu den tatsächlichen Daten aufweist. Eine Möglichkeit hierfür besteht darin, lokale Kenntnisse einzubeziehen und die Überprüfung an konkreten Beispielen durchzuführen.

Darüber hinaus sollte auch getestet werden, ob im zeitlichen Verlauf und anhand vorhandener historischer Daten ein Trend festgestellt werden kann, beispielsweise in Bezug auf die Zu- oder Abnahme der Messwerte. Dieser Trend sollte mit den durchgeführten Anpassungsmaßnahmen vor Ort abgeglichen werden, um zu überprüfen, ob die Kernindikatoren tatsächlich den Implementierungsstand ausreichend beschreiben oder ob möglicherweise andere Prozesse wie Veränderungen im Zuzug oder in der Bevölkerungszahl Einfluss auf die Messwerte nehmen.

Es wäre sinnvoll, drei bis fünf Projektstädte unterschiedlicher Größe und unterschiedlicher Wachstumstrends auszuwählen und im Rahmen eines Projekts die verfügbaren Daten unter Einbindung der jeweiligen Kommunen zu überprüfen. Auf diese Weise kann das Anschlussprojekt darauf aufbauen und weitere Erkenntnisse gewinnen.

Des Weiteren ist es wichtig, dass bei der Testphase auch mögliche Herausforderungen und Hindernisse identifiziert werden. Hierbei kann es sich um technische Schwierigkeiten bei der Datenerhebung, um rechtliche oder finanzielle Aspekte oder um Kommunikations- und Koordinationsprobleme handeln. Diese Erkenntnisse sollten genutzt werden, um entsprechende Lösungsansätze zu entwickeln und die Anwendung der Kernindikatoren zukünftig zu erleichtern.

Die Einbindung der Kommunen und weiterer relevanter Stakeholder ist von großer Bedeutung. Durch den Dialog und den Austausch von Erfahrungen und Expertise können die Kernindikatoren weiter verbessert und an die spezifischen Bedürfnisse und Gegebenheiten vor Ort angepasst werden. Zudem können die Kommunen wertvolle Einblicke aus ihrer Praxis liefern und sich in ihre Planungs- und Entscheidungsprozesse auf die Ziele und Indikatoren beziehen.

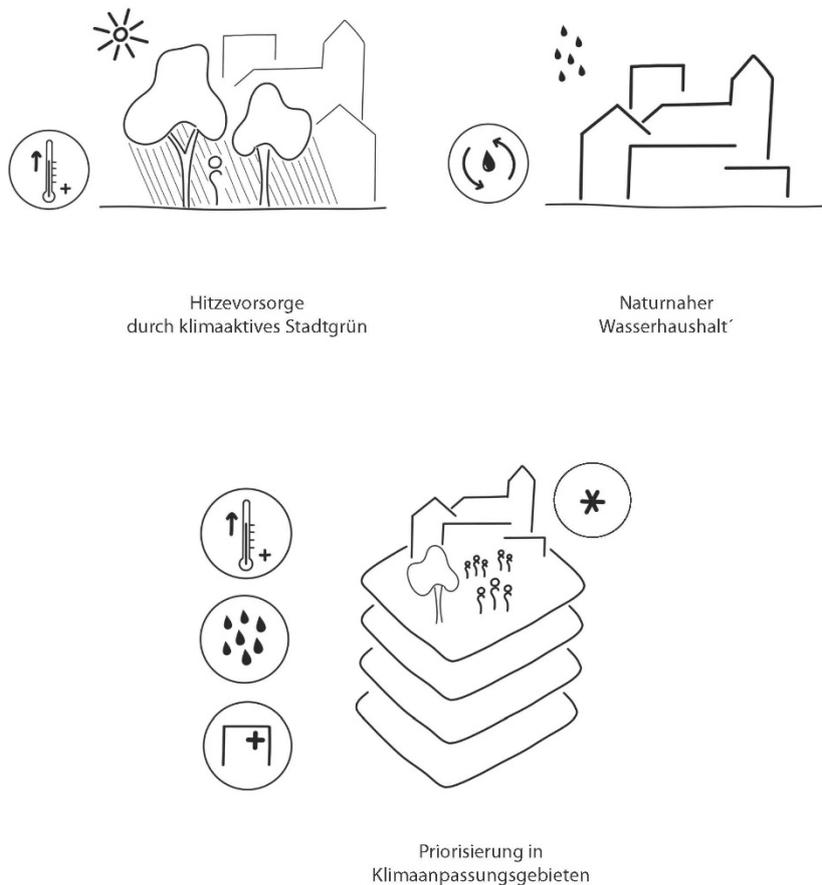
Insgesamt sollte die Testphase dazu dienen, die praktische Anwendbarkeit der Kern- und Initialindikatoren zu überprüfen, ihre Wirksamkeit zu bewerten und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen. Dabei ist es wichtig, dass alle Beteiligten eng zusammenarbeiten und ihre Erfahrungen und Erkenntnisse teilen, um eine erfolgreiche Zielsetzung und Messung der Themenbereiche „Klimaaktives Grün“ und „Naturnaher Wasserhaushalt“ zu ermöglichen.

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In der vorliegenden Arbeit wurden messbare Ziele, Indikatoren und Maßnahmen als potenzielle Instrumente der Klimaanpassung in der Stadtentwicklung untersucht und vorgeschlagen. Dabei wurden im Rahmen einer mehrphasigen Bearbeitung zwei Themenbereiche entwickelt. Dabei handelt es sich um die Themenbereiche „Klimaaktives Grün“ und „Naturnaher Wasserhaushalt“. Für den Themenbereich „Klimaaktives Grün“ wurde auf Grundlage einer 2x2-Matrix auf Bundes- wie auch kommunaler Ebene ein Kern- und ein vereinfachter Initialindikator entwickelt (siehe Abbildung 8). Für den Themenbereich „Naturnaher Wasserhaushalt“ wurde dagegen ein einzelner Kern- und Initialindikator definiert.

Kritische Wertung zur Anwendung der messbaren Ziele durch die Stadtentwicklung

Abbildung 8
Übersicht der Kernergebnisse für Klimaanpassung durch Stadtentwicklung mit den Indikatoren "Hitzevorsorge durch klimaaktives Grün" und "Naturnaher Wasserhaushalt" sowie dem Vorschlag der räumlichen Priorisierung



Quelle: Eigene Darstellung

Eine quantifizierende Messung der Zielerreichung von Klimaanpassungsmaßnahmen durch Indikatoren im Bereich Stadtentwicklung steht im Spannungsfeld mit der eigenständigen und integrierten Logik von Stadt- und Raumplanung. Die Beurteilung guter Lebensverhältnisse in der Stadt berührt neben klimatischen immer auch weitere funktionale, soziale und räumlich-ästhetische Aspekte und kommt daher nicht ohne eine qualitative

Betrachtungsebene aus. Für eine Messung des Ziels „Hitzevorsorge durch klimaaktives Stadtgrün“ kristallisieren sich aus Literatur und dem wissenschaftlichen Diskurs im Forschungsprojekt Kern- und Initialindikatoren heraus, die in unterschiedlicher Weise Veränderungen der Stadtgestalt abbilden können und möglicherweise unterschiedliche räumliche Ausprägungen haben sollten (für Kernstadt, Stadtrand, Umland oder vergleichbare stadregionale Teilräume) Die Wirksamkeit der Erfolgskontrolle setzt zudem ein längerfristig zeitlich und methodisch vergleichbares Monitoring voraus. Die spezifische Umsetzbarkeit und die Auswirkung der Indikatoren auf künftige Stadtentwicklung sollen im Folgenden anschaulich dargestellt werden.

Der Forschungsprozess zur Entwicklung von messbaren Zielen, Indikatoren und Maßnahmen der Klimaanpassung durch Stadtentwicklung ergab in mehreren Fachworkshops und Experteninterviews eine klare Fokussierung auf die beiden Zielbereiche „Hitzevorsorge durch klimaaktives Stadtgrün“ und „Stärkere Annäherung an einen naturnahen Wasserhaushalt“.

Der vorgeschlagene Kernindikator „Hitzevorsorge durch klimaaktives Grün“, setzt sich aus Grünanteil (öffentliches und privates Grün in % je Fläche), Grünversorgung (öffentliches Grün in m² je Einwohner), Grünerreichbarkeit öffentlich nutzbarer Grünflächen und der Baumbedeckung zusammen.

Die Teilindikatoren bilden unterschiedliche Aspekte des Stadtgrüns in seiner klimatischen Funktion und Bedeutung für die Bevölkerung ab. Für den allgemeineren Grünanteil eines Stadtbereichs, der sowohl private wie öffentliche begrünte Flächen erfasst, kann ein Zielwert von 30 bis 40 % benannt werden, ab dem eine signifikante klimatische Wirkung in der Fläche gegeben ist. Zwei weitere Teilindikatoren können unter der Bezeichnung Grünversorgung zusammengefasst werden. Sie bilden zum einen das Verhältnis von öffentlichen Grünflächen je Einwohner ab, und zum anderen bezeichnet sie die Grünerreichbarkeit, die dann gegeben ist, wenn eine relevante und qualitätsvolle öffentliche Grünfläche in einer fußläufig bewältigbaren Distanz gegeben ist. Schließlich stellt der Teilindikator „Baumbedeckung oder Überschildung durch Grün“, als Annäherung an die Bemessung eines Grünvolumens, eine aussagekräftige Größe dar, nicht zuletzt dank der Kühlungswirkung durch Evapotranspiration und insbesondere aufgrund der Verschattung. Als wesentliches qualitatives Merkmal für alle Indikatoren im Bereich Stadtgrün gilt es, seine Wasserversorgung zu berücksichtigen, da eine entsprechende klimatische Wirkung nur durch eben diese gegeben ist.

Für jeden der oben benannten Teilindikatoren liegen Datensätze in unterschiedlicher Qualität und Aussagekraft zur Verfügung, um zu bundeseinheitlichen quantitativen Aussagen zur Klimaanpassung in den jeweiligen Themenbereichen zu gelangen.

Der Kernindikator „Naturnaher Wasserhaushalt“ bildet den Ansatz einer wassersensiblen Stadt ab und beschreibt das Verhältnis von Grundwasserneubildung (Versickerung), Evapotranspiration (Verdunstung) und Abfluss. In Deutschland gibt es eine beträchtliche Varianz der klimatischen Bedingungen und des natürlichen Wasserhaushalts. Eine einheitliche Lösung für die Bewirtschaftung von Niederschlagswasserabflüssen in ganz Deutschland kann oft im Widerspruch zum örtlich unterschiedlichen, langjährigen Wasserhaushalt stehen. Ein möglicher Zielwert beschreibt deshalb eine mittlere Abweichung gegenüber der naturnahen Wasserbilanz. Die Wasserbilanz räumlich hochaufgelöst abzubilden, ist prinzipiell mit verschiedenen Berechnungsmethoden (vgl. DWA 2022) sehr präzise möglich. Diese Ermittlung erfordert eine sehr genaue Datenerhebung, wie sie typischerweise bei Neubauvorhaben auf der Objektebene, nicht aber flächendeckend und bundeseinheitlich, sowie für den städtischen Bestand vorliegt.

Eine Annäherung an einen operationalisierbaren, naturnahen Wasserhaushalt lässt sich demnach nur über den Indikator „Versickerungsfähige Fläche“ erreichen. Wenngleich der Anteil der wasserdurchlässigen Flächen beziehungsweise der Anteil der (teil)versiegelten Flächen nur einen Teilaspekt des Wasserhaushalts darstellt, sind diese wichtige Größen, die den Oberflächenabfluss eines Gebiets beschreiben. Es wird daher empfohlen, den vorgeschlagenen Kernindikator zur Wasserbilanz ΔW und einen Initialindikator für wasserdurchlässige Flächen vorzusehen, welcher sich bundesweit erheben lässt.

Abgeschichtete Anwendung der Indikatoren

Eine quantifizierende Messung der Zielerreichung von Klimaanpassungsmaßnahmen durch Indikatoren im Bereich Stadtentwicklung steht im Kontext der eigenständigen und integrierten Logik von Stadt- und Raumplanung. Dazu gehört das grundsätzliche Spannungsfeld einer einheitlichen Erfassung auf der Bundesebene und die Umsetzung der Ziele auf der lokalen Ebene unter Wahrung der kommunalen Planungshoheit.

Alle diskutierten Teilindikatoren sind nach einer Einschätzung von in der Stadtplanung und Stadtverwaltung tätigen Praktikerinnen und Praktikern grundsätzlich zum Einsatz in der kommunalen Anwendung geeignet. In zahlreichen Kommunen werden einige der vorgeschlagenen Indikatoren bereits eingesetzt, um Defizite und Handlungsbedarfe oder Anpassungserfolge zu ermitteln. Die Einführung von Zielwerten auf Bundesebene für diese Indikatoren, die die Klimaanpassung messbar machen, wird von der kommunalen Praxis für sehr wertvoll erachtet, um eigene Anpassungsbemühungen zu bewerten und um argumentative Unterstützung in kommunalen Abwägungs- und Entscheidungsprozessen zu erhalten.

Die Beurteilung guter Lebensverhältnisse in der Stadt berührt neben klimatischen immer auch weitere funktionale, soziale und räumlich-ästhetische Aspekte und kommt daher nicht ohne eine qualitative Betrachtungsebene aus. Es wird deshalb eine abgeschichtete Anwendung vorgeschlagen bei der zunächst vereinfachte Initialindikatoren verwendet werden, zu deren Messung bereits Daten verfügbar sind. In der Folge sollen diese dann zu Kernindikatoren weiterentwickelt werden, die die Erfolge der Klimaanpassungsmaßnahmen besser abbilden. Für diese müssen aber teilweise erst die Voraussetzungen für zeitreihenfähige Daten bundesweit geschaffen werden.

1. Bundeseinheitliche Erfassung durch vorhandene Datensätze in niedriger Auflösung

Durch die flächendeckende Verfügbarkeit der notwendigen Datengrundlagen sollte eine Abbildung der beschriebenen Kern- und Initialindikatoren in einer Auflösung von 10 x 10 m möglich sein.

2. Identifikation von Klimaanpassungsgebieten auf Basis einer Gradientendarstellung zur Erfassung von räumlichen Priorisierungsbereichen

Durch die Verwendung einer Gradientendarstellung als Definitionsgrundlage für die Ableitung von Klimaanpassungsgebieten wird dem Aspekt des klimatischen beziehungsweise realen Wirkraums einer (Ausgleichs-)Fläche entsprochen als ein Bezug bspw. auf eine starre administrative Grenze. Gleichzeitig besteht auf Grundlage einer pixelbezogenen Gradientendarstellung weiterhin die Möglichkeit der statistischen Übertragung/ Auswertung der Ergebnisse auf eine beliebige vektorgebundene (flächengebundene) Einheit.

3. Prüfung, Korrektur und Konkretisierung der bundeseinheitlichen Erfassung der Indikatoren und der räumlichen Abgrenzung von Klimaanpassungsgebieten in höherer Auflösung auf kommunaler Ebene:

- a. durch die kommunale Verwaltung, sofern diese dazu operativ in der Lage ist, und dies keine Mehrbelastung für die Kommune darstellt. Dabei sollte soweit möglich auf bundes- oder landesweit zur Verfügung gestellte Daten zurückgegriffen werden können;
- b. durch eine Bundes-Förderkulisse, welche die Umsetzung auf der lokalen Ebene durch externe privatwirtschaftliche Büros ermöglicht (einheitliche Vorgaben zu erarbeiten);
- c. durch eine zentrale Konkretisierung auf Landesebene für die jeweilige Gemeinde.

4. Umsetzung und Evaluierung der Klimaanpassungsmaßnahmen unter Einbezug der auch kleinräumigen lokalen Verhältnisse und qualitativen Aspekte von Stadtplanung.

Überprüfung der Messwerte auf der lokalen Anwendungsebene

Eine letztgültige Überprüfung der durch die Indikatoren quantitativ erfassten Situation kann nur durch eine Kontrollinstanz vor Ort erfolgen. Dieses Vorgehen achtet zudem auf die kommunale Planungshoheit und bildet die Schnittstelle zur Umsetzung von konkreten Maßnahmen, welche auf örtliche Gegebenheiten und spezifische Einschränkungen oder Möglichkeiten reagieren können.

Für eine Überprüfung der Erfolge von Klimaanpassungsmaßnahmen ist ein prinzipielles Verschlechterungsverbot der klimatisch (thermischen) Belastungssituation für alle Stadtbereiche zu fordern, um den Erfordernissen einer Vorsorge gegen die Folgen eines sich verändernden Klimas in den Städten Rechnung zu tragen. Für die Klimaanpassungsgebiete als Fokusräume einer zügigen und prioritären Anpassung ist ein Verbesserungsgebot anzustreben.

Die Vielgestaltigkeit der deutschen Stadträume lässt eine bundeseinheitlich letztgültige Bewertung der stadtklimatischen Situation nicht zu. So muss die Aussage der quantitativ gemessenen Indikatoren immer vor Ort überprüft werden und kleinräumige Verhältnisse, welche sich einer Erfassung durch Fernerkundung entziehen, in der Bewertung ergänzt werden. Dies betrifft insbesondere kleine Grünstrukturen wie Pocket-Parks, urbane Nischen und lokale Klimaoasen, welche in den Datensätzen nicht erfasst werden, aber vor Ort einen bedeutsamen Beitrag zur Bewältigung klimatischer Stresssituationen leisten können. Können die Zielwerte einzelner Teilindikatoren nicht erreicht werden, so ist eine Kompensation in anderen Teilindikatoren durch besonders hochwertige Qualitäten oder Übererfüllung von Zielwerten denkbar.

Klimatisch besonders betroffene Stadtbereiche wie verdichtete Wohnquartiere, Gewerbegebiete oder Innenstadtlagen zeichnen sich durch eine hohe räumliche Dichte und geringe Flächenverfügbarkeit aus. Es ist erwartbar, dass in diesen bestehenden Stadtquartieren eine klimatische Verbesserung auf Grundlage der flächenhaft erfassten Indikatoren nur im geringen Maße erreichbar ist. In diesem Kontext kommt dem Teilindikator „Baumbedeckung“ eine besondere Bedeutung zu. Durch die Nutzung von städtischen Restflächen oder durch die Aufwertung von Bewegungsräumen können Flächenkonkurrenzen mit anderen städtischen Nutzungen verringert werden. Auch kleine und/oder verstreute einzelne Maßnahmen lassen sich durch den Teilindikator abbilden. Die Anlage von kleinen, oasenartigen Strukturen im Stadtraum, welche eine erhöhte Aufenthaltsqualitäten besitzen, lässt sich durch diesen Indikator befördern, insofern (ergänzende) qualitative Merkmale beachtet werden. Im Besonderen kann mithilfe des Teilindikators auch die Aufwertung grauer Infrastrukturen im Straßenbereich bspw. durch die Anlage von Baumreihen, Alleen und Einzelpflanzungen unterstützt werden. Städtische Straßenräume befinden sich zudem in der grundsätzlichen Verfügbarkeit der Kommunen und stellen eine erhebliche Flächenressource im Kontext der Klimaanpassung dar. Für diesen Ansatz sind im unterirdischen Straßenraum entsprechend große wasserversorgte und spartenfreie Wurzelbereiche zu schaffen, um eine dauerhafte und klimaaktive grüne Infrastruktur zu ermöglichen. Dies berührt auch den Bereich der Neuaufteilung von Verkehrsräumen im Zuge der Mobilitätswende.

Für alle Indikatoren, welche auf die Nutzung von öffentlich zugänglichen Grünflächen abzielen, ist zudem die Betrachtung qualitativer Aspekte unerlässlich. Zu den minimalen Anforderungen, welche an die Qualität von Grünflächen zu richten sind, zählen vorrangig die Verschattung durch Bäume beziehungsweise ein ausgewogenes Verhältnis von beschatteten und offenen Bereichen innerhalb der Grünfläche. Für die Nutzbarkeit der Grünfläche durch den Menschen muss ein hohes Maß an Aufenthaltsqualität gegeben sein. Dazu zählen auch unterschiedliche Angebote zum Sitzen, Liegen und Rasten, die den längeren Aufenthalt ermöglichen. Neben der klimatischen (thermischen) Qualität innerhalb der Grünfläche ist eine nur geringe Belastung durch Lärm, Strahlung (zum Beispiel Reflexionen von Fassaden) oder Verschmutzung (Staub, Gerüche, chemische Einträge) sicherzustellen.

Für eine qualitativ hochwertige Grünfläche ist eine hohe ästhetische und atmosphärische Gestaltung des Freiraums erforderlich. Neben grundsätzlichen Aufenthaltsmöglichkeiten stellen Spiel- und Sportangebote sowie ergänzende Funktionen, welche den Besuch der Grünfläche attraktiv machen, zusätzliche Qualitätsmerkmale

dar. Diese sind in Abhängigkeit von der Größe der Anlage so angeordnet, dass Ruhebereiche davon nicht beeinträchtigt werden. Die Nutzungsangebote richten sich an unterschiedliche Alters- und Bevölkerungsgruppen und integrieren auf selbstverständliche Weise Menschen mit Einschränkungen. Zur Anpassung an klimatische Belastungszeiten sind Trinkbrunnen und Wasserspiele vorhanden, die eine direkte Abkühlung ermöglichen. Ergänzend stehen nach Möglichkeit öffentliche Toiletten zur Verfügung.

Als wesentliches qualitatives Merkmal für alle Teilindikatoren im Bereich Stadtgrün gilt es, die Wasserversorgung der Grünflächen und der Baumpflanzungen zu berücksichtigen. Die Klimawirksamkeit von Stadtgrün ist abhängig von einer ausreichenden Wasserversorgung. Mehr Stadtgrün erfordert mehr Wasser. Der Wasserbedarf erhöht sich zunehmend bei der Verwendung von nicht trockenresistenten Arten. Eine entsprechende klimatische Wirkung, wie sie in Klimafunktionskarten und Modellierungen unterstellt wird, ist jedenfalls nur bei einer guten Wasserversorgung gegeben. Stadtklimatisch kritische Hitzeereignisse gehen im Sommer oftmals mit ausgeprägten Trockenheitsphasen einher. Als essenzieller Faktor einer klimaresilienten Gestaltung von Grünflächen muss daher der Aspekt der Wasserverfügbarkeit für Pflanzen im Kontext beider Kernindikatoren „Hitzevorsorge durch klimaaktives Stadtgrün“ und „Naturnaher Wasserhaushalt“ gelten. Die Wasserversorgung von Stadtgrün ist abhängig von Bodenverhältnissen, kleinräumigen topografischen Gegebenheiten und der entsprechenden geplanten Wasserführung im gebauten Stadtraum. Sie lässt sich nicht als Größe messen und sollte als Hinweis den Indikatoren als quantitatives Kriterium beigelegt werden. In der Umsetzung geht es somit darum, Grünflächen beziehungsweise Stadtgrün zu erhalten und zu schaffen und für dieses langfristig eine natürliche Versorgung mit anfallendem Niederschlagswasser sicherzustellen. Der Aspekt verlangt eine Anwendung auf der Objektebene, um Regenwasser lokal, kleinräumig zu lenken, Vegetationsbereichen zuzuführen, zu speichern und für den Vegetationsbestand verfügbar zu machen. Nach Möglichkeit sind hierfür naturbasierte und kostenextensive Lösungen anzustreben, welche eine langfristige Funktionalität bei minimalem Unterhaltsaufwand gewährleisten.

Der natürliche lokale hydrologische Kreislauf wird in der Stadt durch undurchlässige Oberflächen und künstliche Abflusswege verändert. Städte weisen einen hohen Direktabfluss, gepaart mit einem geringen Retentionsvermögen, einer geringen Grundwasserneubildung und einer niedrigen Verdunstungsrate, auf. Für eine gesteigerte Klimaresilienz in Städten ist eine besondere Sensibilität in Bezug auf Wasser notwendig, die eine bewusste Verschiebung des städtischen Wasserhaushalts unterstützt, hin zu einem stärkeren Rückhalt aller Niederschläge im Stadtraum und einer verstärkten direkten Verdunstung.

Maßnahmen

Wesentliche Anpassungsmaßnahmen für die Anpassung an Hitze (vgl. Rufenacht/Acero 2017) sowie prinzipielle Maßnahmen zur Starkregenvorsorge (vgl. BBSR 2018a; Kotzee/Reyers 2016; Metropolregion Bremen-Oldenburg & im Nordwesten e. V 2016) wurden bereits in Abbildung 2 dargestellt. Konkrete Maßnahmen zur Zielerreichung sind in hohem Maß abhängig von lokalen Gegebenheiten und deshalb lokal differenziert zu betrachten.

Der Fokus bei der Umsetzung von Maßnahmen sollte nach Möglichkeit auf naturbasierten Lösungen und robusten (Lowtech-)Ansätzen liegen, die einen geringen Aufwand bei Pflege und Unterhalt erwarten lassen und eine Anpassung an künftige Veränderungen und Anforderungen ermöglichen. Eine der wichtigsten stadtklimatischen Leistungen geht von Stadtbäumen und deren Verschattungswirkung aus. Deshalb sind erdgebundene grüne Infrastrukturen, welche einen geringeren technischen Aufwand erfordern, grundsätzlich vorzuziehen. Dach- und Fassadenbegrünungen erzielen zwar eine prinzipielle Kühlleistung, sind jedoch oftmals abhängig von technischen Systemen, erfordern einen intensiveren Unterhalt und befinden sich außerhalb einer öffentlichen Erreichbarkeit. Für eine optimale Klimawirkung sollten Maßnahmen kombiniert werden, das heißt insbesondere grüne mit blauen Infrastrukturen.

Zudem gilt es die Maßnahmen so zu wählen, dass insbesondere in den bestehenden Stadtstrukturen Verbesserungen erfolgen, um der thermischen Belastung im Bestand entgegenzuwirken. Im Bestand lassen sich zahlreiche in der Stadtentwicklung typische spezifische Widerstände und Schwierigkeiten (zum Beispiel Denkmalschutz bei historischen Altstädten oder Raumkonkurrenz zwischen Leitungsnetzen und Wurzelraum im Untergrund) bei der Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen erwarten. Diese ergeben sich insbesondere aus der kommunalen Planungshoheit, aus Eigentumsverhältnissen und der Flächenkonkurrenz mit zahlreichen anderen urbanen Funktionen und Ansprüchen. Welche Art von grüner Infrastruktur besonders wirksam ist, lässt sich schon aus klimatischer Sicht nicht pauschal beantworten, da die Wirksamkeit von Stadtgrün auch von der jeweiligen urbanen Struktur abhängt.

In unterschiedlichen städtischen Bereichen wie Innenstadtlagen, verdichtete Wohnbereiche oder Gewerbegebiete bestehen unterschiedliche Potenziale und Einschränkungen für die Verbesserung des Stadtgrüns. Es sollte daher ein Ansatz aus unterschiedlichen Teilindikatoren gewählt werden, der ein Bündel möglicher Maßnahmen erfasst und eine individuelle Ausgestaltung der Klimaanpassung in den kommunalen Realitäten zulässt.

Da die „klimaaktive“ Wirkung (primär die Verschattungsleistung) von Bäumen maßgeblich von ihrem Alter und ihrem Habitus abhängt, müssen diese verstärkt mit architektonischen Maßnahmen wie Arkaden, Sonnensegel, Gebäudeform und -orientierung oder Schaffung von kleinräumigen Durchlüftungspotenzialen ergänzt werden. Eine dauerhaft wirksame Anpassung an den Klimawandel kann im städtischen Kontext nicht auf die Nutzung eines Planungsaspektes (wie Stadtgrün) begrenzt werden, sondern bedarf der dauerhaften Einbindung aller gesamtstädtischen Potenziale.

Kurzbiografie

bauchplan).(

Das Kollektiv **bauchplan).(** betreibt Niederlassungen in München, Wien und Köln. Im Fokus stehen multicodierte urbane Räume sowie städtebauliche Zukunftsvisionen. Zentrale Themen sind Klimakrise und sanfte Mobilität. Neben zahlreichen internationalen Auszeichnungen wurde **bauchplan).(** mit dem Deutschen Nachhaltigkeitspreis 2018 und dem Deutschen Landschaftsarchitekturpreis 2017 in der Kategorie „Partizipation und Planung“ ausgezeichnet.



© **bauchplan).(**

Prof. Florian Otto

Florian Otto studierte Landschaftsarchitektur an der Technischen Universität München und an der KVL Kopenhagen. Seit 2003 ist er Partner im transdisziplinären Netzwerk **bauchplan).(**. In diesem entwickelt er seit 20 Jahren räumliche Identitäten an der Schnittstelle von Raum und Gesellschaft. 2023 wurde er als Professor für Landschaftsarchitektur und Technik an die Universität Kassel berufen.



© **bauchplan).(**

Pia Schwarz, B. A.

Pia Schwarz zog nach dem Schulabschluss in Österreich nach Hamburg wo sie Raumkonzept & Design studierte. Nach dem Studium begann sie ein Praktikum bei **bauchplan).(** in München wo sie bis heute im Bereich Stadtplanung und Landschaftsarchitektur zuerst im Münchner Standort und heute in Wien arbeitet.



© **bauchplan).(**

Felix Heinze, B. Sc.

Felix Heinze studierte Stadt- und Regionalplanung (B.Sc.) an der Universität Kassel und aktuell Raumplanung (Dipl. Ing.) an der Technischen Hochschule Wien. Seit 2018 arbeitet er als Projektmitarbeiter im Büro **bauchplan).(**. Sein Tätigkeitsfeld liegt zwischen klassischer Projektarbeit, administrativen Tätigkeiten im Bereich der Vergabe und im technischen Support.



© bauchplan).(

Kay Strasser, Dipl.-Ing.

Kay Strasser lebt und arbeitet zwischen Wien und München. Seit seinem Diplom an der Ecole Centrale des Arts et Manufactures in Paris, France und seinem Master Abschluss am Politecnico di Milano in Italien, arbeitete Kay Strasser mit zahlreichen internationalen Planungsbüros. Seit 2012 ist er Teil des Kollektivs bauchplan).(und entwickelt als Teamleiter und Leiter des bauch-Labs sowohl atmosphärische Leitbilder und großflächige Zukunftsvisionen, als auch technische Lösungen in allen Maßstäben.



© Universität Kassel

Prof. Dr. Britta Jänicke

Britta Jänicke studierte Landschaftsarchitektur und Landschaftsplanung (B. Sc.) und Stadtökologie (M. Sc.) an der TU Berlin. Ihre Promotion erfolgte mit dem Schwerpunkt auf Stadtklima und Hitzestress. Als Postdoc war sie beim National Institute of Meteorological Science, Südkorea und als Leiterin der Abteilung Klimaschutz und strategische Umweltplanung bei der Stadt Braunschweig tätig. Seit März 2022 leitet sie das Fachgebiet Umweltmeteorologie am Institut für Landschaftsarchitektur und Landschaftsplanung der Universität Kassel.



© Sonja Rohde

Nisha Patel, M. Sc.

Nisha Patel studierte Meteorologie (M. Sc.) an der Leibniz Universität Hannover und Physik (B. Sc. und M. Sc.) in Gujarat, Indien. Praktische Erfahrungen mit Atmosphärenmodellen, Fernerkundungstechniken und Bodenstationen sammelte sie als Projektmitarbeiterin am Indian Institute of Technology, Chennai und Physical Research Laboratory, Ahmedabad. Seit 2022 arbeitet sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Fachgebiet Umweltmeteorologie der Universität Kassel.



© Markus Leibenath

V.-Prof. René Burghardt

René Burghardt ist Landschaftsplaner und arbeitet seit 2009 im Bereich der Stadtklimatologie. In 2015 promovierte er im Fachgebiet Umweltmeteorologie und dort in der Schnittstelle zwischen Stadtklima, Mikroklima und Geoinformation. Neben internationaler Lehrtätigkeit zwischen 2012 bis 2016, ist er teilhabender Geschäftsführer des Ingenieurbüros Burghardt Partner (BPI Kassel). Seit Mai 2021 vertritt er die GIS-Lehre an der Universität Kassel. Von 2023 bis 2024 war er Vertretungsprofessor für Umweltmeteorologie an der Universität Kassel

Literaturverzeichnis

Ampatzidis, P.; Kershaw, T., 2020: A review of the impact of blue space on the urban microclimate. *Science of The Total Environment* 730: 139068.

Akbari, H.; Matthews, H. D., 2012: Global cooling updates: Reflective roofs and pavements. *Energy and Buildings* 55: 2–6.

Araos, M.; Berrang-Ford, L.; Ford, J. D.; Austin, S. E.; Biesbroek, R.; Lesnikowski, A., 2016: Climate-change-Adaptation-Planning in large cities: A systematic global assessment. *Environmental Science & Policy* 66: 375–382.

Arnott, J. C.; Moser, S. C.; Goodrich, K. A., 2016: Evaluation that counts: A review of climate-change-adaptation-indicators & metrics using lessons from effective evaluation and science-practice-interaction. *Environmental Science & Policy* 66: 383–392.

Balázs, B.; Bíró, T.; Dyke, G.; Singh, S. K.; Szabó, S., 2018: Extracting water-related features using reflectance data and principal component analysis of Landsat images. *Hydrological Sciences Journal*, 63. Jg. (2): 269–284.

BfN – Bundesamt für Naturschutz, 2023: Stadtnatur erfassen, schützen, entwickeln: Orientierungswerte und Kenngrößen für das öffentliche Grün. Naturschutzfachliche Begleitung der Umsetzung des Masterplans Stadtnatur. BfN-Schriften 653/2023. Zugriff: <https://bf.n.bsz-bw.de/frontdoor/index/index/docId/1288> [abgerufen am 28.07.2023].

BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2018a: Leitfaden Starkregen – Objektschutz und bauliche Vorsorge. Bonn. Zugriff: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2018/leitfaden-starkregen.html> [abgerufen am 28.07.2023].

BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2018b: Handlungsziele für Stadtgrün und deren empirische Evidenz. Bonn. Zugriff: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/sonderveroeffentlichungen/2018/handlungsziele-stadtgruen.html> [abgerufen am 25.07.2023].

BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2021: Wie grün sind deutsche Städte? BBSR-Onlinepublikation 03/2022. Bonn. Zugriff: <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2022/bbsr-online-03-2022.html> [abgerufen am 28.07.2023].

BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2023: Aktionsprogramm „Natürlicher Klimaschutz“ Zugriff: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Naturschutz/aktionsprogramm_natuerlicher_klimaschutz_2023_bf.pdf [abgerufen am 02.09.2023].

BMUV – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2023: Information zum Klimaanpassungsgesetz (KAnG). Zugriff: <https://www.bmuv.de/themen/klimaanpassung/das-klimaanpassungsgesetz-kang> [abgerufen am 20.09.2023].

Blazejczyk, K.; Epstein, Y.; Jendritzky, G.; Staiger, H.; Tinz, B., 2012: Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, 56. Jg. (3): 515–535.

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2017: Zweiter Fortschrittsbericht zur Energiewende – Die Energie der Zukunft – Berichtsjahr 2017. Zugriff: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/fortschrittsbericht-monitoring-energiewende.html> [abgerufen am 20.09.2023].

Bouzouidja, R.; Cannavo, P.; Bodénan, P.; Gulyás, Á.; Kiss, M.; Kovács, A.; Béchet, B.; Chancibault, K.; Chantoiseau, E.; Bournet, P.-E.; Bouzidi, R.; Guénon, R.; Lebeau, T.; Musy, M.; Rodriguez, F., 2021: How to evaluate nature-based solutions performance for microclimate, water and soil management issues – Available tools and methods from Nature4Cities European-Projekt-Ergebnisse. *Ecological Indicators* 125: 107556.

Browning, M.; Locke, DAS HEIßT; Konijnendijk, C.; Labib, S. M.; Rigolon, A.; Yeager, R.; Bardhan, M.; Berland, A.; Dadvand, P.; Helbich, M.; Li, F.; Li, H.; James, P.; Klompaker, J.; Reuben, A.; Roman, L.; Tsai, W.-L.; Patwary, M. M.; O'Neil-Dunne, J.; Nieuwenhuijsen, M., 2023: Measuring the 3-30-300 Rule to help Cities meet Nature Access Thresholds. *Science of The Total Environment* 907: 167739.

Bugg – Bundesverband GebäudeGrün e. V., 2020: Inventarisierung und Potenzialanalyse von Dachbegrünungen. Zugriff: https://www.gebaeudegruen.info/fileadmin/website/Kontakt/Prospektanforderung/Potentialanalyse_4Seiter_20200407DE.pdf [abgerufen am 17.06.2023].

Charoenkit, S.; Piyathamrongchai, K., 2019: A review of urban green spaces multifunctionality assessment: A way forward for standardized assessment and comparability. *Ecological Indicators* 107: 105592.

Chen, M.; Chen, L.; Li, Y.; Xian, Y., 2022: Developing computable sustainable urbanization science: An interdisciplinary perspective. *Computational Urban Science*, 2. Jg. (1): 17.

Codemo, A.; Pianegonda, A.; Ciolli, M.; Favargiotti, S.; Albatici, R., 2022: Mapping Pervious Surfaces and Canopy Covers Using High-Resolution Airborne Imagery and Digital Elevation Models to Support Urban Planning. *Sustainability*, 14. Jg. (10): Article 10. <https://doi.org/10.3390/su14106149>.

Coutts, A. M.; Harris, R. J.; Phan, T.; Livesley, S. J.; Williams, N. S. G.; Tapper, N. J., 2016: Thermal-infrared remote sensing of urban heat: Hotspots, vegetation, and an assessment of techniques for use in urban planning. *Remote Sensing of Environment* 186: 637–651.

Darand, M.; Pazhoh, F., 2022: Spatiotemporal changes in precipitation concentration in Iran during 1962–2019. *Climatic Change*, 173. Jg. (3–4): 25.

De Luis, M.; Brunetti, M.; Gonzalez-Hidalgo, J. C.; Longares, L. A.; Martin-Vide, J., 2010: Changes in seasonal precipitation in the Iberian Peninsula during 1946–2005. *Global and Planetary Change*, 74. Jg. (1): 27–33.

De La Barrera, F.; Reyes-Paecke, S.; Truffello, R.; De La Fuente, H.; Salinas, V.; Villegas, R.; Steiniger, S., 2023: Comparing green-spaces-Provision and accessibility indicators over a latitudinal gradient and multiple climate-zones. *Urban Forestry & Urban Greening* 79: 127791.

Demuzere, M.; Kittner, J.; Bechtel, B., 2021: LCZ Generator: A Web-Application to Create Local Climate-Zone-Maps *Frontiers in Environmental Science* 9: 637455.

Difu – Deutsches Institut für Urbanistik, 2021: Klimaschutz, erneuerbare Energien und Klimaanpassung in Kommunen: Maßnahmen, Erfolge, Hemmnisse und Entwicklungen – Ergebnisse der Umfrage 2020: Difu-Papers 2021. Zugriff: <https://repository.difu.de/handle/difu/580019> [abgerufen am 25.09.2023].

Dütemeyer, D.; Kuttler, W.; AXT-KITTNER, U., 2013: Stadtklimatisches Flächenmanagement in der kommunalen Umweltplanung. *UVP-Report*, 27. Jg. (3).

Dosch, F., 2021: Satellitengestützte Erfassung des Stadtgrüns. *Stadtforschung und Statistik: Zeitschrift des Verbandes Deutscher Städtestatistiker*, 34. Jg. (2): 8–16.

DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., 2022: Merkblatt DWA-M 102-4/BWK-M 3-4. Grundsätze zur Bewirtschaftung und Behandlung von Regenwetterabflüssen zur Einleitung in Oberflächengewässer – Teil 4: Wasserhaushaltsbilanz für die Bewirtschaftung des Niederschlagswassers, 56 S. Zugriff: [https://www.baufachinformation.de/search?fq\[leafletSeriesId\]=43&sort=seriesCount%3Adesc](https://www.baufachinformation.de/search?fq[leafletSeriesId]=43&sort=seriesCount%3Adesc) [abgerufen am 25.09.2023].

Esch, T.; Schorcht, G.; Thiel, M.; Dech, S., 2007: Satellitengestützte Erfassung der Bodenversiegelung in Bayern Broschüre des Bayerischen Landesamts für Umwelt. Herausgeber: LfU – Bayerisches Landesamt für Umwelt. Augsburg.

EEA – European Environment Agency, 2019: Global and European temperature (CSI 012/CLIM 001). Zugriff: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/global-and-european-temperatures> [abgerufen am 25.09.2023].

EEA – European Environment Agency, 2020: Urban Adaptation in Europe: How cities and towns respond to climate change. LU: Publications Office Zugriff: <https://www.eea.europa.eu/publications/urban-adaptation-in-europe> [abgerufen am 25.09.2023].

Fenner, D.; Bechtel, B.; Demuzere, M.; Kittner, J.; Meier, F., 2021: Crowd QC+-A Quality-Control for Crowd-sourced Air-Temperature Observations, Enabling World-Wide-Urban-Climate-Applications. *Frontiers in Environmental Science* 9: 720747.

Ford, J. D.; King, D., 2015: A framework for examining adaptation readiness. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 20. Jg. (4): 505–526.

Ford, J.; Berrang-Ford, L.; Lesnikowski, A.; Barrera, M.; Heymann, S., 2013: How to Track Adaptation to Climate Change: A Typology of Approaches for National-Level-Applications *Ecology and Society*, 18. Jg. (3).

Frick, A.; Tervooren, S., 2019: A Framework for the Long-term Monitoring of Urban Green Volumes, based on multi-temporal and multi-sensoral Remote-Sensing Data. *Journal of Geovisualization and Spatial Analysis*, 3. Jg. (1): 6.

Frick, A.; Wagner, K.; Kiefer, T.; Tervooren, T., 2020: Wo fehlt Grün? – Defizitanalyse von Grünvolumen in Städten. In: Meinel, G.; Schumacher, U.; Behnisch, M.; Krüger, T. (Hrsg.): *Flächennutzungsmonitoring XII mit Beiträgen zum Monitoring von Ökosystemleistungen und SDGs*. Berlin: 223–238.

Gál, T.; Lindberg, F.; Unger, J., 2009: Computing continuous-sky-view-factors using 3-D urban raster- and vector-databases: Comparison and application to urban climate. *Theoretical and Applied Climatology*, 95. Jg. (1–2): 111–123.

Gangwisch, M.; Saha, S.; Matzarakis, A., 2023: Spatial neighborhood analysis linking urban morphology and green infrastructure to atmospheric conditions in Karlsruhe, Germany. *Urban Climate* 51: 101624.

García, P.; Pérez, E., 2016: Mapping of soil sealing by vegetation indexes and built-up index: A case study in Madrid (Spain). *Geoderma* 268: 100–107.

Giannico, V.; Stafoggia, M.; Spano, G.; Elia, M.; Dadvand, P.; Sanesi, G., 2022: Characterizing Green- and Gray-Space-Exposure for epidemiological Studies: Moving from 2D- to 3-D-Indicators. *Urban Forestry & Urban Greening* 72: 127567.

Goldblatt, R.; Addas, A.; Crull, D.; Maghrabi, A.; Levin, G. G.; Rubinyi, S., 2021: Remotely Sensed Derived Land Surface Temperature (LST) as a Proxy for Air Temperature and Thermal Comfort at a Small Geographical Scale. *Land*, 10. Jg. (4): Article 4.

Handley, J.; Pauleit, S.; Slinn, P.; Barber, A.; Baker, M.; Jones, C.; Lindley, S., 2003: Accessible natural green space standards in towns and cities: a review and toolkit for their Implementation. English Nature Research Reports 526: 98.

Huang, C.; Yang, J.; Lu, H.; Huang, H.; Yu, L., 2017: Green Spaces as an Indicator of Urban Health: Evaluating Its Changes in 28 Mega-Cities. *Remote Sensing*, 9. Jg. (12): Article 12.

lungman, T.; Cirach, M.; Marando, F.; Pereira Barboza, E.; Khomenko, S.; Masselot, P.; Quijal-Zamorano, M.; Mueller, N.; Gasparrini, A.; Urquiza, J.; Heris, M.; Thondoo, M.; Nieuwenhuijsen, M., 2023: Cooling Cities through urban green infrastructure: A health-impact-assessment of European cities. *The Lancet* 401(10376): 577–589.

Jaganmohan, M.; Knapp, S.; Buchmann, C. M.; Schwarz, N., 2016: The Bigger, the Better? The Influence of Urban Green Space Design on Cooling Effects for Residential Areas. *Journal of Environmental Quality*, 45. Jg. (1): 134–145.

Joshi, M.; Selmi, W.; Binard, M.; Nys, G.-A.; Teller, J., 2020: Potential for urban Greening with Green Roofs: A way towards smart Cities. 5th International Conference on Smart Data and Smart Cities.

Kahlenborn, W.; Porst, L.; Voß, M.; Fritsch, U.; Renner, K.; Zebisch, M.; Wolf, M.; Schönthaler, K.; Schausser, I., 2022: Dreifache Innenentwicklung. Herausgeber: UBA – Umweltbundesamt. Zugriff: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/dreifache-innenentwicklung> [abgerufen am 22.06.2023].

Kaiser, T.; Kind, C., 2018: Handreichung zur Entwicklung von Methoden für die Evaluation von Anpassungsstrategien. Umweltforschungsplan. Forschungskennzahl 3715 41 106.

Kalbarczyk, E.; Kalbarczyk, R., 2020: Typology of Climate-Change-Adaptation-Measures in Polish Cities up to 2030. *Land*, 9. Jg. (10): Article 10.

Khadka, A.; Kokkonen, T.; Niemi, T. J.; Lähde, E.; Sillanpää, N.; Koivusalo, H., 2020: Towards natural water cycle in urban areas: Modelling stormwater management designs. *Urban Water Journal*, 17. Jg. (7): 587–597.

Kirchner, A.; Schmitt, M.; Pollinger, F.; Thiel, M.; Paeth, H., 2021: Relationship between soil sealing and local to regional climate in Germany. *Meteorologische Zeitschrift* 30. Jg. (5): 381–390.

Kirschner, V.; Macků, K.; Moravec, D.; Mañas, J., 2023: Measuring the relationships between various urban green spaces and local climate zones. *Scientific Reports*, 13. Jg. (1): Article 1.

Kotzee, I.; Reyers, B., 2016: Piloting a social-ecological index for measuring flood resilience: A composite index approach. *Ecological Indicators* 60: 45–53.

Koch, F.; Bilke, L.; Helbig, C.; Schlink, U., 2018: Compact or cool? The impact of Brownfield redevelopment on inner-city microclimate. *Sustainable Cities and Society*, 38: 31–41.

Konijnendijk, C., 2023: Evidence-based Guidelines for greener, healthier, more resilient neighbourhoods: Introducing the 3–30–300 Rule. *Journal of Forestry Research*, 34. Jg. (3): 821–830.

Kolokotsa, D.; Diakaki, C.; Papantoniou, S.; Vliissidis, A., 2012: Numerical and experimental analysis of cool roofs application on a laboratory building in Iraklion, Crete, Greece. *Energy and Buildings* 55: 85–93.

LANUV – Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, 2018: Klimaanalyse Nordrhein-Westfalen LANUV-Fachbericht 86. Zugriff: https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte/Fachbericht_86_gesichert.pdf [abgerufen am 25.09.2023].

Leichtle, T.; Zehner, M.; Kühnl, M.; Martin, K.; Taubenböck, H., 2021: Urban trees–detection, delineation, quantification, and characterisation based on vhr remote sensing. REAL CORP 2021: 1029–1039.

Lee, H.; Mayer, H., 2018: Thermal Comfort of Pedestrians in an urban Street Canyon is affected by increasing Albedo of Building Walls. *International Journal of Biometeorology*, 62. Jg. (7): 1199–1209.

Leiter, T., 2021: Do governments track the implementation of national climate-change-adaptation-plans? An evidence-based global stocktake of monitoring and evaluation systems. *Environmental Science & Policy* 125: 179–188.

Li, Y.; Schubert, S.; Kropp, J. P.; Rybski, D., 2020: On the influence of density and morphology on the Urban Heat Island Intensity. *Nature Communications*, 11. Jg. (1): Article 1.

Lin, X.; Wu, S.; Chen, B.; Lin, Z.; Yan, Z.; Chen, X.; Laforteza, R., 2022: Estimating 10-m-land-surface-Albedo from Sentinel-2-Satellite-Observations using a direct estimation approach with Google Earth Engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 194: 1–20.

Liu, B.; Guo, X.; Jiang, J., 2023: How Urban Morphology Relates to the Urban Heat-Island-Effect: A Multi-Indicator Study. *Sustainability*, 15. Jg. (14): 10787.

Liu, W.; Chen, W.; Feng, Q., 2018: Field Simulation of urban surfaces Runoff and Estimation of Runoff with experimental curve numbers. *Urban Water Journal*, 15. Jg. (5): 418–426.

Matzarakis, A.; Rutz, F.; Mayer, H., 2010: Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan-model. *International Journal of Biometeorology* 54: 131–139.

Malinowski, P. A.; Wu, J. S.; Pulugurtha, S.; Stillwell, A. S., 2018: Green infrastructure retrofits with impervious area reduction by property type: Potential improvements to urban stream quality. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, 4. Jg. (4): 04018012.

Martinkova, M.; Kysely, J., 2020: Overview of Observed Clausius-Clapeyron Scaling of Extreme Precipitation in Midlatitudes. *Atmosphere*, 11. Jg. (8): 786.

McGrane, Scott J., 2016: Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics and urban water management: a review, *Hydrological Sciences Journal*, 61. Jg. (13): 2295–2311. DOI: 10.1080/02626667.2015.1128084

Meier, F.; Fenner, D.; Grassmann, T.; Otto, M.; Scherer, D., 2017: Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. *Urban Climate*, 19: 170–191.

Metropolregion Bremen-Oldenburg & im Nordwesten e. V., 2016: Leitfaden zur Starkregenvorsorge. Ein Nachschlagewerk für Kommunen der Metropolregion Nordwest. Zugriff: <https://www.metropolregion-nordwest.de/portal/seiten/leitfaeden-zur-starkregenvorsorge-900000107-10018.html> [abgerufen am 25.09.2023].

Marselle, M. R.; Bowler, D. E.; Watzema, J.; Eichenberg, D.; Kirsten, T., & Bonn, A., 2020: Urban Street Tree Biodiversity and antidepressant Prescriptions. *Scientific Reports*, 10. Jg. (1): Article 1.

Mutani, G.; Todeschi, V., 2020: The Effects of Green Roofs on Outdoor Thermal Comfort, Urban Heat Island Mitigation and Energy Savings. *Atmosphere*, 11. Jg. (2): Article 2.

Neder, E. A.; de Araújo Moreira, F.; Dalla Fontana, M.; Torres, R. R.; Lapola, D. M.; Vasconcellos, M. da P. C.; Bedran-Martins, A. M. B.; Philippi Junior, A.; Lemos, M. C.; Di Giulio, G. M., 2021: Urban Adaptation Index: Assessing cities' readiness to deal with climate change. *Climatic Change*, 166 Jg. (1): 16.

- Olazabal, M.; Ruiz De Gopegui, M., 2021: Adaptation Planning in large Cities is unlikely to be effective. *Landscape and Urban Planning* 206: 103974.
- Olazabal, M.; Galarraga, I.; Ford, J.; Sainz De Murieta, E.; Lesnikowski, A., 2019: Are local climate-adaptation-Policies credible? A conceptual and operational assessment framework. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 11. Jg. (3): 277–296.
- Otto, A., Göpfert, C., & Thieken, A. H., 2021: Are Cities prepared for Climate Change? An Analysis of Adaptation Readiness in 104 German Cities. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 26. Jg. (8): 35.
- Pan, T. C.; Kao, J. J., 2021: Comparison of Indices for evaluating building-green-values based on Greenhouse-Gas-Emissions-Reduction. *Ecological indicators* 122: 107228.
- Palla, A.; Gnecco, I.; Lanza, L. G., 2010: Hydrologic Restoration in the Urban Environment Using Green Roofs. *Water*, 2. Jg. (2): Article 2.
- Qian, Y. F.; Zheng, Y. Q.; Zhang, Y.; Miao, M. Q., 2003: Responses of China's summer-monsoon-climate to snow anomaly over the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 23. Jg. (6): 593–613.
- Rahman, M. A.; Franceschi, E.; Pattnaik, N.; Moser-Reischl, A.; Hartmann, C.; Paeth, H.; Pauleit, S., 2022: Spatial and temporal changes of outdoor thermal stress: Influence of urban land cover types. *Scientific Reports*, 12. Jg. (1): 671.
- Raimondi, A.; Sanfilippo, U.; Marchioni, M.; Di Chiano, M. G.; Becciu, G., 2023: Influence of climatic parameters on the probabilistic design of green roofs. *Science of The Total Environment* 865: 161291.
- Reckien, D.; Buzasi, A.; Olazabal, M.; Spyridaki, N.-A.; Eckersley, P.; Simoes, S. G.; Salvia, M.; Pietrapertosa, F.; Fokaides, P.; Goonesekera, S. M.; Tardieu, L.; Balzan, M. V.; De Boer, C. L.; De Gregorio Hurtado, S.; Feliu, E.; Famos, A.; Foley, A.; Geneletti, D.; Grafakos, S.; Wejs, A., 2023: Quality of urban climate adaptation plans over time. *Npj Urban Sustainability*, 3. Jg. (1): Article 1.
- Reid, C. E.; O'Neill, M. S.; Gronlund, C. J.; Brines, S. J.; Brown, D. G.; Diez-Roux, A. V.; Schwartz, J., 2009: Mapping Community Determinants of Heat Vulnerability. *Environmental Health Perspectives*, 117. Jg. (11): 1730–1736.
- Roo, M. d.; V. Kuypers; Lenzholzer, S., 2011: The green city guidelines: techniques for a healthy liveable city. Zwaan Printmedia, Wormerveer.
- Rossi, F.; Pisello, A. L.; Nicolini, A.; Filippini, M.; Palombo, M., 2014: Analysis of retro-reflective surfaces for urban heat-island mitigation: A new analytical model. *Applied Energy* 114: 621–631.
- Rötzer, T.; Rahman, M.A.; Moser-Reischl, A.; Pauleit, S.; Pretzsch, H., 2019: Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions. *Science of The Total Environment* 676: 651–664.
- Ruefenacht, L.; Acero, J. A., 2017: Strategies for Cooling Singapore: A Catalogue of 80+ measures to mitigate urban heat island and improve outdoor thermal comfort. ETH Zurich.
- Rupprecht, C. D. D.; Byrne, J. A., 2014: Informal Urban Greenspace: Comparison of Quantity and Characteristics in Brisbane, Australia und Sapporo, Japan. *PLoS ONE*, 9. Jg. (6): e99784.
- Russo, A.; Cirella, G., 2018: Modern Compact Cities: How Much Greenery Do We Need? *IJERPH* 15: 2180.
- Scherer, D., 2007: Viele kleine Parks verbessern Stadtklima. Mit Stadtplanung das Klima optimieren. *TASPO-Report: Die grüne Stadt* 15.

- Santamouris, M., 2014: Cooling the Cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy* 103: 682–703.
- Schleswig-Holstein-Landesamt für Umwelt, 2023: Wasserrechtliche Anforderungen zum Umgang mit Regenwasser in Schleswig-Holstein. Teil 1: Mengenbewirtschaftung A-RW 1. Zugriff: <https://www.schleswig-holstein.de/DE/fachinhalte/A/abwasser/Downloads/wasserrechtlicheAnforderungen> [abgerufen am 25.09.2023].
- Schüle, S. A.; Gabriel, K. M. A.; Bolte, G., 2017: Relationship between neighbourhood socioeconomic position and neighbourhood public green space availability: An environmental inequality analysis in a large German city applying generalized linear models. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 220. Jg. (4): 711–718.
- Schwaab, J.; Meier, R.; Mussetti, G.; Seneviratne, S.; Bürgi, C.; Davin, E. L., 2021: The role of urban trees in reducing land surface temperatures in European cities. *Nature Communications*, 12. Jg. (1): Article 1.
- SenStadt – Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen Berlin, 2020: 06.05 Versorgung mit öffentlichen, wohnungsnahen Grünanlagen. Zugriff: https://www.berlin.de/umweltatlas/_assets/nutzung/oeffentliche-gruenanlagen/de-texte/kc605_2020.pdf [abgerufen am 05.09.2023].
- Shi, Z.; Yang, J.; Zhang, Y.; Xiao, X.; Xia, J. C., 2022: Urban ventilation corridors and spatiotemporal divergence patterns of urban heat island intensity: A local climate zone perspective. *Environmental Science and Pollution Research*, 29. Jg. (49): 74394–74406.
- Simpson, C. H.; Brousse, O.; Ebi, K. L.; Heaviside, C., 2023: Commonly used Indices disagree about the effect of moisture on heat stress. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 6. Jg. (1): Article 1.
- Sohn, W.; Kim, J. H.; Li, M. H.; Brown, R. D.; Jaber, F. H., 2020: How does increasing impervious surfaces affect urban flooding in response to climate variability? *Ecological Indicators* 118: 106774.
- Spanjar, G.; Bertlett, D.; Schramkó, S.; Kluck, J.; Zandbrink, L.; Föllmi, D., 2022: Cool Towns Intervention Catalog Proven solutions to mitigate heat stress at street-level. Amsterdam University of Applied Science, Center of Expertise Urban Technology.
- Stadt Bonn, 2019: ZURES Planungshinweiskarte Nachtsituation. Zugriff: https://www.bonn.de/medien-global/amt-67/klimaschutz/ZURES_Planungshinweiskarte_Nachtsituation.pdf [abgerufen am 12.05.2023].
- Stadt Freiburg, 2023: Klimaanpassungskonzept Handlungsfeld Hitze. Zugriff: <https://www.freiburg.de/pb/1292965.html> [abgerufen am 25.07.2023].
- Stadt Gelsenkirchen, 2023: Stadtklimamanagementsystem. Zugriff: <https://www.gelsenkirchen.de/de/infrastruktur/umwelt/klima/klimawandel/stadtklimamanagementsystem.aspx> [abgerufen am 11.06.2023].
- Stadt Leipzig, 2023: Stadtklima in Leipzig. Zugriff: <https://www.leipzig.de/umwelt-und-verkehr/energie-und-klima/stadtklima> [abgerufen am 25.07.2023].
- Stewart, I. D.; Oke, T. R., 2012: Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93. Jg. (12): 1879–1900.
- Street, R. B.; Jude, S., 2019: Enhancing the value of adaptation reporting as a driver for action: lessons from the UK. *Climate Policy*, 19. Jg. (10): 1340–1350.
- Synnefa, A.; Santamouris, M.; Akbari, H., 2007: Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings*, 39. Jg. (11): 1167–1174.

- Taubenböck, H.; Reiter, M.; Dosch, F.; Leichtle, T.; Weigand, M.; Wurm, M., 2021: Which City is the greenest? A multi-dimensional deconstruction of city-rankings *Computers, Environment and Urban Systems* 89: 101687.
- Tymków, P.; Józków, G.; Walicka, A.; Karpina, M.; Borkowski, A., 2019: Identification of waterbody extent based on remote sensing data collected with unmanned aerial vehicle. *Water*, 11. Jg. (2): 338.
- UBA – Umweltbundesamt, 2021a: Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021 (Kurzfassung). *Climate Change*, 2021. Jg. (26).
- UBA – Umweltbundesamt, 2021b: Bessere Nutzung von Entsiegelungspotenzialen zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen und zur Klimaanpassung. Umweltbundesamt. Zugriff: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bessere-nutzung-von-entsiegelungspotenzialen-zur> [abgerufen am 20.08.2023].
- Vandecasteele, I.; Marí i Rivero, I.; Baranzelli, C.; Becker, W.; Dreoni, I.; Lavallo, C.; Batelaan, O., 2018: The Water Retention Index: Using Land Use Planning to manage water resources in Europe. *Sustainable Development*, 26. Jg. (2): 122–131.
- VDI – Verein Deutscher Ingenieure, 2015: Umweltmeteorologie – Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. VDI 3787, Blatt 1.
- Ward Thompson, C.; Aspinall, P.; Roe, J.; Robertson, L.; Miller, D., 2016: Mitigating Stress and Supporting Health in Deprived Urban Communities: The Importance of Green Space and the Social Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13. Jg. (4): Article 4.
- Wang, Y.; Akbari, H., 2015: Development and Application of ‘thermal radiative power’ for urban environmental evaluation. *Sustainable Cities and Society* 14: 316–322.
- Wang, Y.; Zhang, X.; Xu, J.; Liang, C.; She, D.; Xiao, Y., 2021: Evaluating effects of urban imperviousness connectivity on runoff with consideration of receiving pervious-area-properties. *Urban Water Journal*, 18. Jg. (8): 598–607.
- Watson, I. D.; Johnson, G. T., 1987: Graphical Estimation of sky view-factors in urban environments. *Journal of Climatology*, 7. Jg. (2): 193–197.
- 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.
- WHO – World Health Organization, 2016: Urban Green Spaces and Health. *Urban Green Spaces and Health*. Zugriff: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345751> [abgerufen am 20.08.2023].
- Wüstemann, H.; Kalisch, D., 2016: Towards a national indicator for urban green space provision and environmental inequalities in Germany: Method and Findings SFB 649 Working Paper, No. 2016-022. Berlin.
- Wüstemann, H.; Kalisch, D.; Kolbe, J., 2017: Access to urban green space and environmental inequalities in Germany. *Landscape and Urban Planning* 164: 124–131.
- Wong, N. H.; Tan, C. L.; Kolokotsa, D. D.; Takebayashi, H., 2021: Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2. Jg. (3): 166–181.
- Zhou, J.; Liu, J.; Shao, W.; Yu, Y.; Zhang, K.; Wang, Y.; Mei, C., 2018: Effective Evaluation of Infiltration and Storage Measures in Sponge City Construction: A Case Study of Fenghuang City. *Water*, 10. Jg. (7): 937.

Ziter, C. D.; Pedersen, E. J.; Kucharik, C. J.; Turner, M. G., 2019: Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during Summer. *Proceedings of the PNAS*, 116. Jg. (15).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Übersicht über Anpassungsmaßnahmen	16
Abbildung 2 Übersicht über Anpassungsmaßnahmen	17
Abbildung 3 Schema für die Einstufung von Indikatoren je nach Ansatzpunkt im Wirkmodell	18
Abbildung 4 Übersicht der Indikatorbereiche	23
Abbildung 5 Ablaufdiagramm des Indikatoren-Auswahl-Prozesses	42
Abbildung 6 Systematischer Aufbau und logische Verknüpfung zwischen Kern-Initial-Index auf Bundesebene und kommunaler Ebene am Beispiel des Indikatorenbereichs „Klimaaktives Grün“	48
Abbildung 7 Hydrologisches Dreieck zur (schematischen) Darstellung der Bilanzgrößen im unbebauten und bebauten Zustand	67
Abbildung 8 Übersicht der Kernergebnisse für Klimaanpassung durch Stadtentwicklung mit den Indikatoren "Hitzevorsorge durch klimaaktives Grün" und "Naturnaher Wasserhaushalt" sowie dem Vorschlag der räumlichen Priorisierung	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Darstellung klimatischer Einflüsse (Wertebereiche entsprechend mehreren untersuchten Objekten) von Vegetationsstrukturen im städtischen Kontext auf die Lufttemperatur sowie den thermischen Komfort in °C PET	54
Tabelle 2 Übersicht von einer möglichen Anwendung der Indikatoren im Bereich „Klimaaktives Grün“, untergliedert nach „Zielwert“, „Stadtgebiet“ sowie dem jeweiligen „Erfüllungsgrads des Zielwerts“. Dabei findet die Klassifizierung in diesem Beispiel ungewertet linear statt.	57
Tabelle 3 Übersicht für eine beispielhafte Berechnung des Indikators ΔW unter Berücksichtigung des Abflussanteils, des Versickerungsanteils sowie des Verdunstungsanteils, welche in das Verhältnis zu den Flächenanteilen der „naturnahen un bebauten Flächen“, der „befestigten Flächen“ sowie dem daraus und „anteilig gewichtetem Mittel“ gesetzt werden. Das berechnete Verhältnis wird jeweils für einen Referenzzeitpunkt (in der Vergangenheit) sowie für einen „aktuellen“ Zeitpunkt ermittelt.	69